Българска академия на науките
Институт по информационни и комуникационни технологии
Секция: „Вградени интелигентни технологии“

Д И С Е Р Т А Ц И Я

за получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

автор: **маг. инж. Стефан Карастанев**

Тема:

РЕИНЖЕНЕРИНГ НА ИНДУСТРИАЛНИ РОБОТИ

научна област:	5. Технически науки
професионално направление:	5.2. Електротехника, електроника и автоматика
научна специалност:	“Автоматизирани системи за обработка на информация и управление“
научен консултант:	**проф. д-р Димитър Неделчев Карастоянов**

Българска Академия на Науките – София, 2019

Благодарности

Благодаря на своя научен консултант проф. д-р Димитър Карастоянов, за ползотворната съвместна работа, за всички съвети и градивните критики, които отправи.

Благодаря на колегите фирма „СПЕСИМА” ООД и от секция „Вградени интелигентни технологии“ на ИИКТ-БАН за методологичната помощ, съветите и препоръките, без които настоящата дисертация не би се случила.

С ъ д ъ р ж а н и е:

№	Наименование	Стр.
Гл. 1.	**Обзор, анализ и систематизация на мехатронни роботизирани системи**	**6**
	1.1. Мехатроника - историческа справка	*6*
	1.2. Индустриални роботи	*8*
	1.3. Роботи в дъговото заваряване	*10*
	1.4. Монтажни роботи	*17*
	1.5. Обслужващи роботи	*22*
	1.6. Реинженеринг на роботи и роботизирани системи	*23*
	1.7. Цел и задачи на дисертационната работа	*43*
Гл. 2.	**Изследване на механика, електроника и софтуер на *ИУР***	**44**
	2.1. Метрика и кинематика на механичната конструкция на ИУР	*44*
	2.2. Динамични изследвания на ИУР	*49*
	2.3. Изследване на хардуерната система на избрания типопредставител на ИУР	*52*
	2.4. Изследване на софтуер	*69*
Гл. 3.	**Създаване на методики за изследване на *ИУР***	**87**
	3.1. Създаване на методика за изследване на механичните компоненти	*87*
	3.2. Създаване на методика за изследване на хардуера за управление на робота и използваните сензори	*92*
	3.3. Разработване на методика за изследване на софтуера	*97*
	3.4. Изследване и анализ на математическия модел, имплементиран в софтуера, чрез експериментална проверка на правата и обратната задача на кинематиката	*101*
	3.5. Създаване на концепция за цялостен реинженеринг на избрания типопредставител на ИУР	*102*
	3.6. Изработка на хардуерната система	*104*
	3.7. Модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот KUKA KR-150	*118*
	3.8. Модул за синтез на заданието за движението на осите	*121*
	3.9. Модул за синтез на движения в декартовото пространство	*124*
	3.10. Модул за обработка на спомагателните входно-изходни сигнали	*128*
	3.11. Модул за реализация на базовата логика на процеса	*130*
	3.12. Модул за синтез, съхранение и обработка на програмирани движения	*144*

3.13. Модул ръчно управление *147*
3.14. Модул за графичен потребителски интерфейс *150*
3.15. Модул спомагателни функции *155*
Гл. 4. Изграждане на модернизирания *ИУР* **158**
4.1. Монтаж на всички елементи, включително и крайния ефектор, определящ специфичното приложение на избрания типопредставител на ИУР *158*
4.2. Асемблиране на хардуерната част на таблото за управление *169*
4.3. Основни параметри, режими на работа и конфигуриране на сервозадвижванията *176*
4.4. Тестване на потребителските програми за движение на робота в пространството на ставите на робота и в декартовото пространство, както и изпълнението на базовата машинна логика *190*
4.5. Изследване на механичната конструкция на избрания типопредставител на ИУР вследствие на извършения реинженеринг *196*
4.6. Проверка на динамичните характеристики на ИУР *209*
4.7. Изследване на хардуерните решения на ИУР вследствие на извършения реинженеринг *212*
4.8. Изследване на функционалността на новосъздадения софтуер *219*
4.9. Изследване на кинематичното моделиране на робота (права и обратна кинематична задача) и синтез на движения в декартовото пространство *224*
Гл. 5. Верификация на методиките за реинженеринг вследствие на извършените дейности **229**
5.1. Верификация на методиката за възстановяване на механичната конструкция *229*
5.2. Верификация на методиката за оценка на хардуерната система за управление *232*
5.3. Верификация на методиката за оценка на софтуерното Осигуряване *235*
5.4. Изработване на концепция за комерсиализация на продукта *240*
Гл. 6. Оптимизации и иновации при реинженеринг на индустриални роботи **243**
6.1. *Система за 3D симулация и offline програмиране* *243*
6.2. *Безжичев пулт за управление* *247*

Научни и приложни приноси в дисертацията: ***251***

Литература **253**

Списък с публикации на автора **257**

Декарация за оригинаност **258**

Списък на използваните съкращения

ИР – Индустриален робот

ИУР – Индустриален универсален робот

МКЕ – Метод на крайните елементи

ОВ – Обратна връзка

ООВ – Отрицателна обратна връзка

ПОВ – Положителна обратна връзка

РС – Роботизирана система

УР – Универсален робот

ШИМ – Широчинно-импулсна модулация

HMI - Human-Machine Interface

KSS - Kuka System Software

KRL - Kuka Robot Language

PLC – Programmable logic controller

RDC – Remote Desktop Connection

TCP – Tool Center Point

1. Обзор, анализ и систематизация на мехатронни роботизирани системи

1.1. Историческа справка

Думата “мехатроника” е създадена през 1969 г. от инженер във фирмата “Яскава” – Япония. През 1971 е направена търговска регистрация, от която фирмата се отказва през 1982 след широкото разпространение на термина. Първоначално, а и досега при по-повърхностно и консервативно тълкуване, терминът се е възприемал като устройство с механична и електронна част. Сред многото тълкувания е придобило гражданственост определението, че мехатрониката е интеграция на машинно инженерство с електроника и интелигентно компютърно управление при проектиране и производство на изделия и технологии, [1].

Като първи етап в развитието можем да посочим седемдесетте години на 20 век – тогава мехатрониката основно се развива на базата на ползуването на сервотехнологиите, главно в роботиката (сервоуправляеми движения и позициониране) и фототехниката (фотоапарати с автоматично фокусиране). Следващият етап е през осемдесетте години и е свързан с развитието на информационните технологии и масовото ползуване на микропроцесори в управлението на механичните системи. Като трети етап можем да определим деветдесеттте години и развитието на комуникационните технологии, довели до появата на устройства, свързани в мрежи. По същото време се появяват и миниатюрни сензори, задвижвания и други компоненти, с което започва да се говори и за микромехатроника.

Терминът “мехатроника” е с японски произход, като в Япония обикновено под него се разбират два аспекта:

- механично проектиране, задвижване, приложение на сензори в сложни интелигентни системи, отчитайки равнището на технологията и пазарните условия;

- постоянно обучение по мехатроника на инженерни кадри.

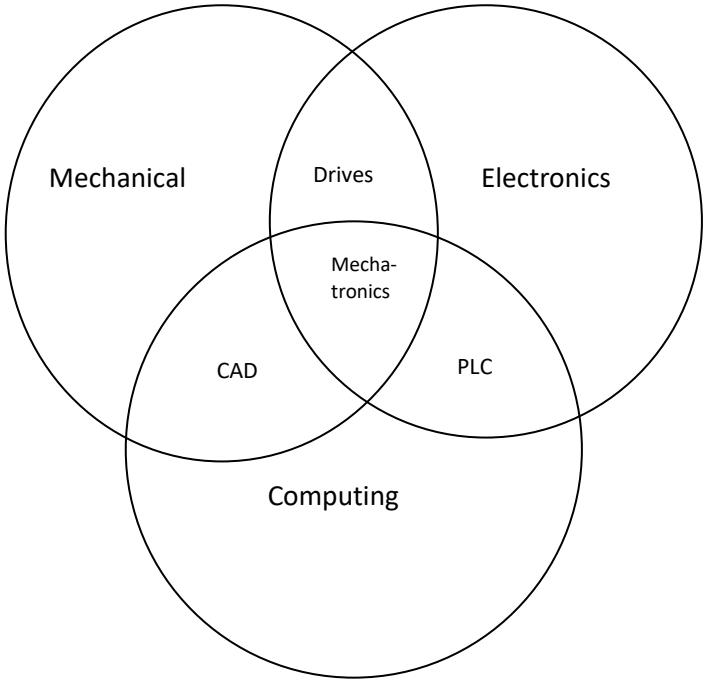
През 80-те години микропроцесорните продукти завладяват пазара. Това е видно в най – голяма степен при персоналните компютри, които са с все по–увеличаващо се бързодействие и все по–ниска цена. За това не бива да ни изненадва факта, че микрокомпютрите навлязоха във всяка област на машинното инженерство. Възможностите им за обработка на данни и лесното използване на микрокомпютрите и други микропроцесорни устройства ги правят незаменими при изграждането на системи за следене и контрол. Това значи, че трябва да отпаднат ограниченията на машинните инженери върху чисто механичните аспекти на проектирането, тъй като по – важно е какво правят подсистемите, които те проектират, отколкото от какви детайли са изградени. Тези подсистеми обединяват контролни функции, силови системи, комуникационен интерфейс и подходящ софтуер. Това е така наречената системна гледна точка при проектирането, която толкова печелившо се използва в Япония от 70-те години насам, а интеграцията на традиционно различните инженерни технологии става известна като мехатроника.

На фиг. 1 са представени различните компоненти на мехатрониката и връзките между тях, [1].

Фиг. 1. Елементи на мехатрониката

Други автори свързват понятието “мехатроника” с 11 Международен симпозиум по индустриална роботика (ISIR) в Токио, Япония, в 1981 г., а още през 1975 г. акад. Артоболевски съобщава за очакван мост (симбиоза) между Механиката на машините и механизмите с Теорията на автоматичното регулиране и управлението. Съгласно това виждане мехатрониката е синергетична (действаща съвместно) интеграция на машинното инженерство с електрониката и интелигентното компютърно управление. Това е специфична стратегия за намиране на оптимален път при интегрирането на МЕХА-никата (механизмите със задвижванията им) и на елек-ТРОНИКАТА (хардуер като например контролери, сензори, пултове и други, заедно със софтуера, съдържащ принципите и законите за управление на механизмите, двигателите, сензорите, спирачките и други апаратни компоненти, както и по-високите нива на управление, включващи елементи на изкуствения интелект). Важна част от една мехатронна система са сенздорите, които освен за определяне положението на различните движещи се части, служат и за определяне на отклоненията от предписаните позиции или размери на части от системата или обекта, [2].

На фиг. 2. е представена опростена схемна композиция на научната област “мехатроника”:



Фиг. 2. Схемна композиция на научната област “мехатроника”

1.2. Индустриални роботи

Терминът “робот” има славянски произход. Образуван е от чешката дума “robota”, която означава тежък и непосилен труд. С него чешкият писател К. Чапек през 1920 г. назовава в пиесата “R.U.R” (Росумски универсални роботи” механичните работници, помагащи на човека. Роботите са обрисувани като инженерен продукт, сравним с човека в механично и интелектуално отношение.

Главните структурни компоненти на един робот са [1]:

- механична конструкция. При промишлените роботи основно това е вид ръка, изпълнена като отворена кинематична верига или като затворена структура. При мобилните роботи по-често става въпрос за тяло със средства за придвижване – колела, вериги, крака, криле и др.

- двигателна и изпълнителна система. Задвижванията преместват по определен закон отделните звена на ръката и/или целия робот, като доставят работния орган в зададена точка. Изпълнителните механизми биват хващачи, инструменти, технологично оборудване, сензори и др.

- информационно-управляваща система. В управлението на робота постъпват данни от човека-оператор, за състоянието на робота, от околната среда. На база на заданието от човека се изработват управляващи въздействия за двигателните и изпълнителни механизми.

Като технически системи роботите се характеризират с:

- универсални (многофункционални) двигателни възможности,

- гъвкаво управление на двигателни и изпълнителни органи,

- ползуване на информация от работната среда в управлението.

Според това, дали оперират с обекти или се придвижват спрямо основата, роботите биват манипулационни (вкл. технологични) и локомоционни (мобилни). Управляващите им системи могат да работят самостоятелно (автоматични) или чрез периодични команди от наблюдаващ оператор (дистанционно управляеми). При отчитане на изменения в работната среда и в манипулираните обекти имаме адаптивни роботи. В зависимост от областите на приложение можем да говорим за промишлени и изследователски роботи. Специален клас са учебните роботи. Напоследък все повече се развива един смесен клас – обслужващи и битови роботи.

Основните области на приложение на роботите са според извършваните от тях видове дейности, а именно:

- спомагателни – обслужване на машини и оборудване, товаро-разтоварни работи;

- основни – заваряване, монтаж, покрития, рязане, шлифоване, лазерна обработка;

- транспортни – пренос между машини, в технологична линия, в рамките на цеха, извънцехов транспорт, подреждане;

- изследователски, разузнавателни, аварийно-спасителни;

- медицински, битови, обслужващо-развлекателни.

Първи преки предшественици на съвременните роботи са разработените през 40-те и 50-те години манипулатори с ръчно дистанционно задвижване (телеоператори). Те се прилагат при работа с радиоактивни и химически отровни материали. Някои от тях се оборудват с двигатели и просто командно (бутонно) или копиращо управление. Съчетаването на традиционните гърбични автомати с електронни контролери и компютри пък води до внедряване на прости, автоматични манипулатори при автоматизация на производствени процеси в машиностроенето и технологиите.

Първите представители на роботите са автомати без възможности за препрограмиране, често вградени в основното оборудване (автооператори). През 59-60 г. американските фирми Planet и AMF внедряват програмируеми манипулатори с автоматично управление, които на пазара биват наречени промишлени роботи. Движенията на тези устройства са прости и некоординирани, ограничават се между малък брой точки на позициониране, които се препрограмират чрез ръчна настройка.

Развитието на цифрово-програмното управление и на системите с обратна връзка довеждат до серийно производство на промишлени устройства с типични белези на роботи (60-61 г., Unimate). Следва снабдяване на робота с визуални, тактилни и други сензори за възприемане на работната сцена. С бурното развитие на компютърната техника в управленията на роботите се вграждат и езици за програмиране от високо ниво, аналитично описание на целта, елементи на изкуствен интелект.

В България пръв серийно произвеждан робот е РБ 210 за нанасяне на бояджийски покрития (77-78 г.). Следват роботи за обслужване на металорежещи машини РБ 241, робот за дъгово заваряване РБ 251 и др. В областта на учебната роботика са известни роботите от серията Робко.

Едно световно разпространно определение за робот е, [1]:

“Роботът е препрограмируем, мултифункционален манипулатор, предназначен да пренася материали, детайли, инструменти или специални устройства чрез различни програмирани движения за извършване на разнообразни дейности”.

Според стандарт на НРБ 5948-87, “*промишлен робот е автоматична машина, стационарна или подвижна, състояща се от манипулатор и препрограмируемо устройство за програмно управление, която в производствения процес изпълнява двигателни и управляващи функции”*.

За разлика от роботите обикновените промишлени манипулатори са автоматични и напълно или частично непрограмируеми устройства. Често те са твърдо вградени в основното технологично оборудване и изпълняват единствени отнапред определени функции. Могат да се считат като нулево поколение на промишлените роботи.

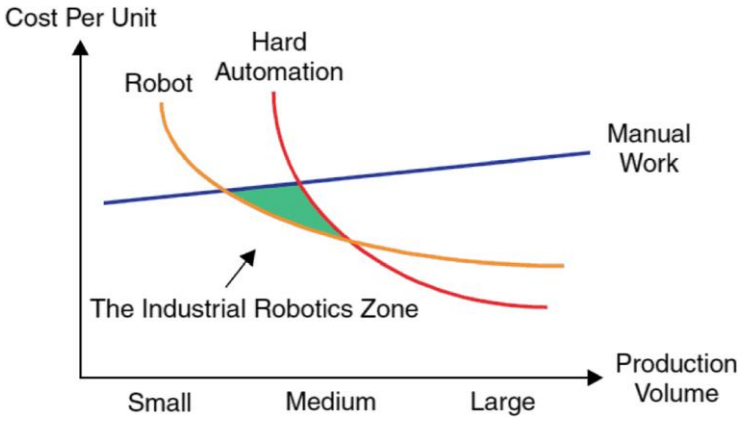
Един съвременен промишлен робот представлява сложна система, състояща се от механична конструкция, елементи за предаване на движенията, захранвания и задвижвания, работни органи, компютърна електроника, програмно управление, средства за наблюдение и комуникация. В този смисъл **промишлените роботи са типични мехатронни системи** с пълен набор от съставящите ги елементи.

Едни от основните сфери на приложение на индустриалните роботи са заваряването, монтъжът и обслужването на машини (манипулации с детайли).

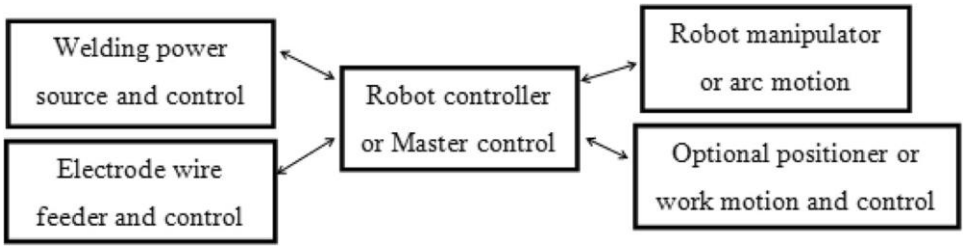
1.3. Роботи за дъгово заваряване

Промишлени роботи и механизирано оборудване станаха незаменими за индустриално заваряване с висока производителност [3], тъй като ръчното заваряване води до ниска производителност, дължаща се на неблагоприятната работна среда, [4]. Динамичното пазарно поведение и силната конкуренция принуждават производствените компании да търсят оптимални производствени процедури. Като е показано на фигура 3, [5], за малки и средни производствени обеми, роботизираното производство дава най-добрата цена на единица произведена продукция в сравнение с ръчното и с твърдата автоматизация. В допълнение към конкурентните единични разходи, роботизирани заваръчните системи носят други предимства, като подобрени производителност, безопасност, качество на заваряване, гъвкавост, малко работно пространство и намалени разходи за труд.

Заваряването е неразделна част от модерното промишлено производство и роботизираното заваряване се счита за основен символ на модерната заваръчна техника, [6]. В най-ранните приложения на роботизираното заваряване, т.нар. първо поколение роботизирани системи за заваряване, заваряването беше разглеждано като двупасова система за заваряване, в която първият пас беше посветена на изучаването на геометрията на шева и беше последван от действителното проследяване и заваряване на шев във втория пас. С развитието на технологиите дойде второто поколение роботизирани заваръчни системи, които проследяват шева в реално време, изпълнявайки едновременно фазите на изучаване и проследяването на шевовете. Най-новата технология в роботизираното заваряване е системи от трето поколение, в които системата не само работи в реално време, но също така изучава бързо променящата се геометрия на шева, докато работи в неструктурирана среда, [7]. Фигура 4 показва основните компоненти на роботизираната система за дъгова заварка, [8].



Фиг. 3. Зона на роботизираното заваряване



Фиг. 4. Основни компоненти на роботизирана система за дъгово заваряване

1.3.1. Основни аспекти на роботизираното заваряване

- Конфигурации на роботизирана заваръчна система

Роботите могат да бъдат категоризирани въз основа на критерии като степен на свобода, кинематична структура, вид на задвижването, геометрия на работното пространство и характеристики на движението, [9]. При избора на роботи за конкретно приложение трябва да се вземат предвид всички тези фактори. Въз основа на работното пространство [10], антропоморфните са най-често използваният тип при индустриално роботизирано дъгово заваряване.

- Фази на заваръчните операции

Заваръчната операция се състои от три различни фази, които се нуждаят от критично внимание при проектирането на напълно автоматизирана роботизирана система за заваряване, за да се постигнат добри резултатии качеството на заваряване, [7]:

Фаза на подготовка. В тази фаза заваръчният оператор установява заваряваните части, апарата (източник на захранване, робот, програма за робота и т.н.) и параметрите на заваръчния процес, заедно с вида газова защита и заваръчен тел. Когато се използва CAD / CAM или друго офлайн програмиране, предварителната заваръчна програма за робота е достъпна и пусната онлайн. Следователно, роботизираната програма може да се нуждае само от незначителна настройка за калибриране, което лесно може да бъде направено от заваръчния оператор, който извършва избрани онлайн симулации на процеса.

Фаза на заваряване. Автоматичното оборудване трябва да има същите способности като ръчно заваряване, т.е. системата трябва да бъде способна да поддържа ориентацията на горелката, да следва желаната траектория (която може да е различна от планираната), да извършва проследяване на шевовете и промяна на пааметрите заваръчните процеси в реално време, като по този начин емулира адаптивното поведение на ръчните заварчици.

Фаза на анализ. Фазата на анализ обикновено е пост заваръчна фаза, в която заваръчният оператор проверява получената заварка, за да се установи дали е приемлива или дали са необходими промени в предишните две фази. Използването на усъвършенствани сензори, като 3D лазерни камери, позволява осъществяването на тази фаза онлайн по време на фазата на заваряване.

1.3.2. Проблеми при роботизираното заваряване

- Съгласуваността, необходима за заваряване на детайл след детайл, при липса на подходящ контрол, може доведе до колебания в качеството поради лошо фиксиране или вариации в процеса на метално формоване.

- В случай на производство или ремонт с ниско или средно количество, времето и усилието, положени за програмиране на робота за заваряване на нова част може да бъде доста високо, [11].

- Роботизираното заваряване изисква подходящ дизайн на частите, съгласувани форми на полето а заваряване (шева)и толерантност в размерите не над 0,5 до 1 мм. Промяна на шева изисква използването на сензорни технологии за запълването му, [12].

- Автоматизирането на заваряването чрез роботизирани системи е с висока начална цена, така че точното изчисление на първоначалната цена и точното изчисляване на възвръщаемостта на инвестициите са от съществено значение, [13].

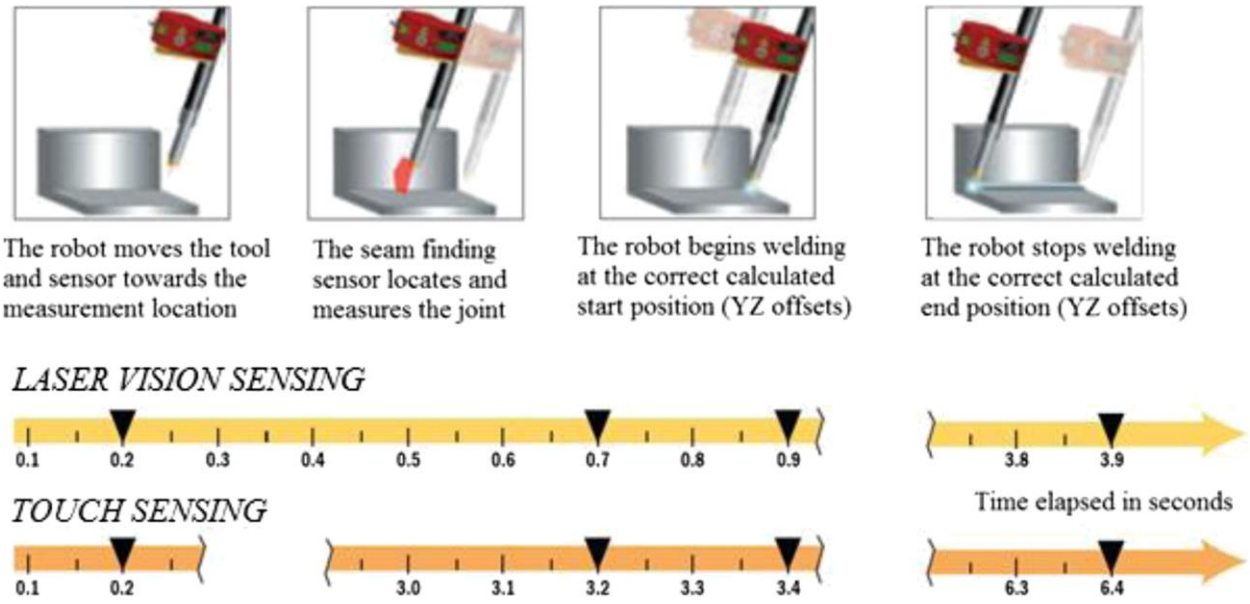
- Възможния недостиг на квалифицирани заварчици с необходимото знание и обучение представлява ограничение.

- За разлика от адаптивното човешко поведение, роботите не могат независимо да вземат автономни коригиращи решения и трябва да бъдат допълнени от използването на сензори и стабилна система за управление и за вземане на решения.

- В някои области не може лесно да се извърши роботизирано заваряване, като съдове под налягане, вътрешни резервоари и корабни тела, дължащи се на ограничения на работното пространство, [14].

- Повечето сензорни интелигентни системи налични на пазара не са тясно интегрирани с контролера на робота, което ограничава производителността на роботизираната система, като повечето промишлени роботи предлагат около 20-Hz обратна връзка като интерфейс за програмиране. Следователно, роботът не може да отговори на информацията от датчика бързо, което води до забавяне и понякога нестабилно производство.

За адаптиране към неточности в габаритите на заваряваните детайли, както и при неточности в позиционирането им, се прилагат различни видове сензорни системи и адаптивно следене на заваръчния шев. На фиг. 5. е показано сравнение между лазерна визуална и тактилна сензорна система за откриване на заваръчен шев и заваряване, [15].

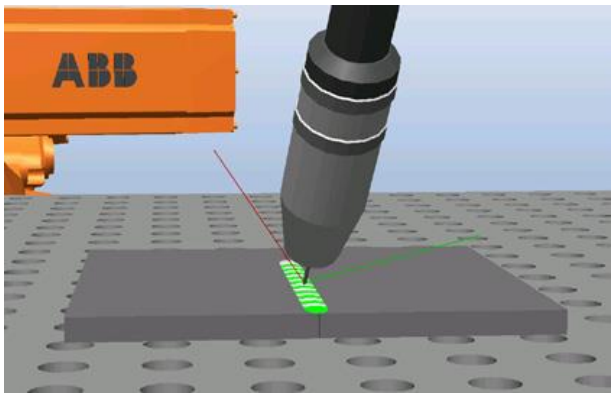


Фиг. 5. Сравнение между лазерна визуална и тактилна
сенорна система за откриване на шева и заваряване [15]

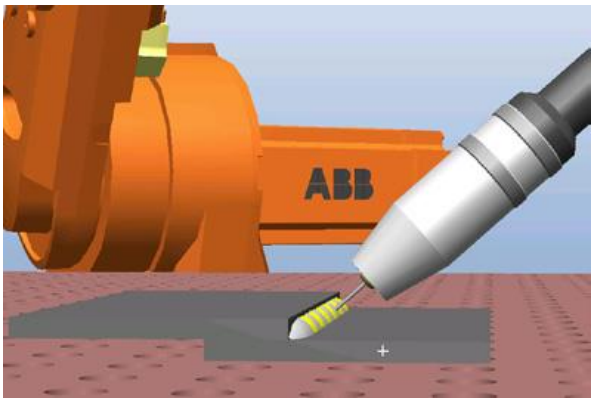
1.3.3. Примери на заваръчни роботи и роботизирани заваръчни системи

ABB предлага както добър заваръчен робот, така и иновативни решения за откриване и проследяване на заваръчния шев в реално време (Sensor Based Adaptive Arc Welding).

Основната част от заваръчните шевове са праволинейни. Те биват между две плочи със скосяване (равнинен прав шев - фиг. 6.), между две плочи под ъгъл 90^0 или една над друга (вътрешен ъгъл – фиг. 7.), както и две плочи на 90^0 (външен ъгъл – фиг. 8.)

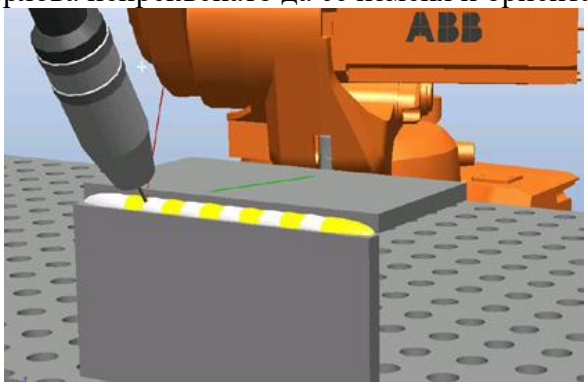


Фиг. 6. Равнинен шев



Фиг. 7.Вътрешен ъгъл

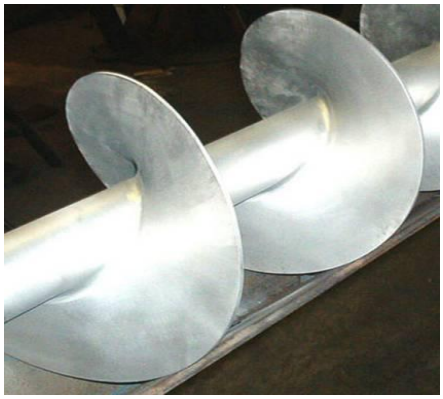
Друга възможност, изискваща траекторно управление, е заваряването по дъга от окръжност – фиг. 9. Тук следва да се отбележи, че освен следене на траекторията на шева, трябва непрекъснато да се изменя и ориентацията на заваръчната горелка.

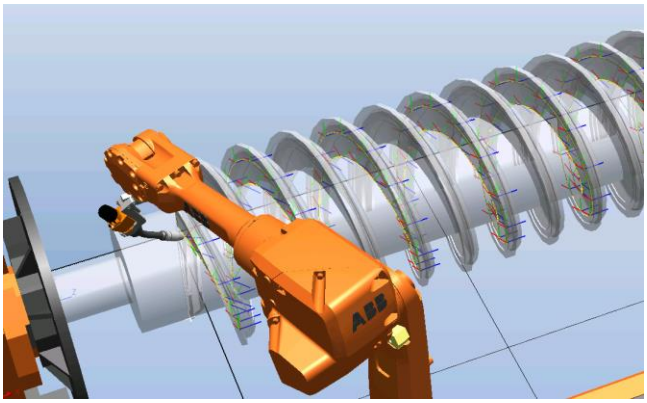


Фиг. 8. Външен ъгъл

Фиг. 9. Заваряване по дъга от окръжност.

По принцип по-сложна е ситуацията при съвместяване на движението по права линия и движението по дъга от окръжност, т.н. винтова линия – фиг. 10. Това понякога е илюзорно, защото транслацията и/или ротацията на детайла може да се извършва от манипулатор на детайла, а заваръчната горелка да е неподвижна или да следва проста траектория.


Фиг. 10. Винтов шев



Фиг. 11. Заваръчен робот ABB при заваряване на винтов шев

На фиг. 11. е показан робот ABB при заваряване на винтов шев, където детайлът се върти, а заваръчният робот извършва праволинейно движение и заваряване.

Тук ще коментираме няколко метода за откриване на шевовете, съвместно с робот ABB, чрез:

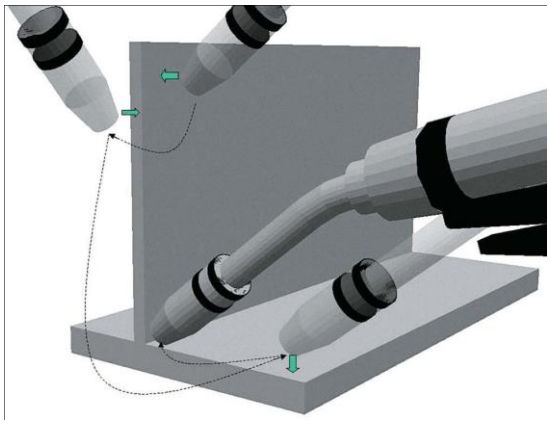
о Тактилно установяване (чрез докосване)

о Сензор за близост (индуктивни)

На фиг. 12. е показано тактилно локализиране на ъглов заваръчен шев чрез следната процедура:

- Докосване до едната плоча,
- Докосване до единия ръб,
- Докосване до другата плоча,
- Заваряване от началото на шева.

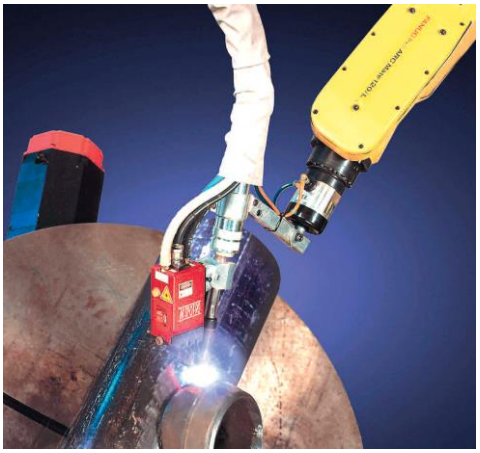
С тази процедура се открива както началото, така и направлението и траекторията на заваръчния шев.



Фиг. 12. Тактилно локализиране на ъглов шев

FANUC Robotics предлага адаптивен процес на заваряване в реално време, като комбинира изпитана технология на дъгова заварка с възможностите за съвместно наблюдение на Серво робот сензор – фиг. 13. Работещ в рамките на ArcTool приложнен софтуер е дефинируем от потребителя адаптивен алгоритъм, който използва обратна връзка от датчика за динамично регулиране на параметрите на заваряванет Тези параметри включват скорост на движение, напрежение и скорост на подаване на тела, обемно запълване на заваръчната вана. Тази опция ArcTool позволява на робота да адаптира процес на заваряване динамично, като геометрията на ставите се променя,

На фиг. 14. е показан робот от серията FANUC ARC Mate интегриран със Servo Robot MSPOT-90 лазерен скенер.

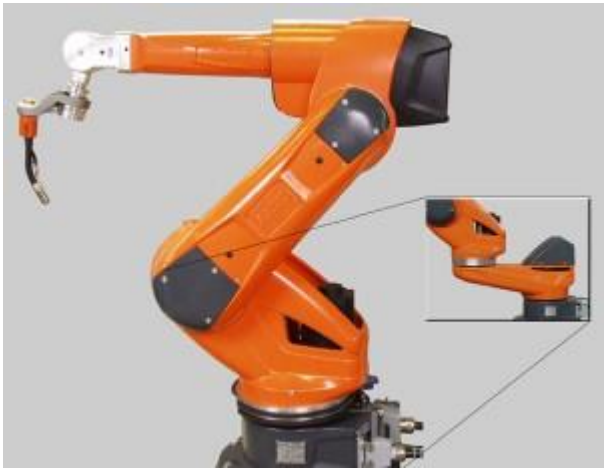


Фиг. 13. Заваръчен робот FANUC

Фиг. 14. FANUC ARC Mate + Servo Robot MSPOT-90

CLOOS е един от водещите в разработването и производството на роботи за заваряване с висока стойност за индустриални приложения. Благодарение на интегрирането на иновативни технологии, новото поколение роботи за заваряване QIROX® предлага допълнителни предимства в качество производителност – фиг. 15а. Сред основните акценти е въвеждането на незадължителна седма ос- фиг. 15.б. Това допринася за значително увеличаване на гъвкавостта и динамиката на робота за заваряване QIROX®. В резултат на това автоматизираните заваръчни процеси се конфигурирани по по-ефективен начин. Хоризонталното движение е възможно до 550 мм.

а



б

Фиг. 15. Заваръчен робот QIROX® на CLOOS

Заваръчният робот на **PANASONIC** претендира за най-добрия в класа си висикоскоростен модел – фиг. 16. Има цифрова връзка с токоизточник на Panasonic. Комуникациите се осъществяват чрез Profibus, Ethernet и др. Контролерът може да управлява до 27 оси едновременно. Освен стандартните функции на заваряване има следните фукнции за адаптация по заваръчния шев:

- Осцилации,
- Припокриване,
- Рестартиране на дъгата
- Автоматично освобождаване на тела при залепване във ваната,
- Сензор за дъгата,
- Сензор за допир,
- Управление на до 5 различни типа заваръчни машини,
- Синхронизирано движение между няколко робота.

-

Фиг. 16. Заваръчен робот Panasonic

Фиг. 17. 6-осен декартов заваръчен робот

Един специфичен пример на декартов заваръчен робот е даден на фиг. 17. Това е **6-ОСЕН ДЕКАРТОВ ЗАВАРЪЧЕН РОБОТ KBWELD HD6**

Иновативният декартов робот, уникално разработен от КИМЕКС ООД, позволява ефективното му използване за заваряване и плазмено рязане на тръби и профили.

Декартовият робот с 3 линейни и 3 ротационни оси е оптимизиран за максимален достъп и производителност.

Характеристиките на механичният дизайн правят системата оптимална за големи работни пространства и всякакви размери. Някои основни предимства на конструкцията са:

- Контролер монтиран към робота;
- Токоизточници монтирани към робота;
- Програматор движещ се заедно с робота;
- Възможност за използване на 250кг кангали заваръчна тел монтирани към робота;
- Синхронизация между 2 и повече робота;

Заваръчните роботизирани комплекси на фирма **KUKA** са едни от най-разпространените – фиг. 18. Те са подходящи за дъгово МИГ/МАГ заваряване, оборудвани са със свой заваръчен токоизточник, имат развито траекторно управление. При снабдяване със подходяща сензорика могат извършват адаптивно заваряване.

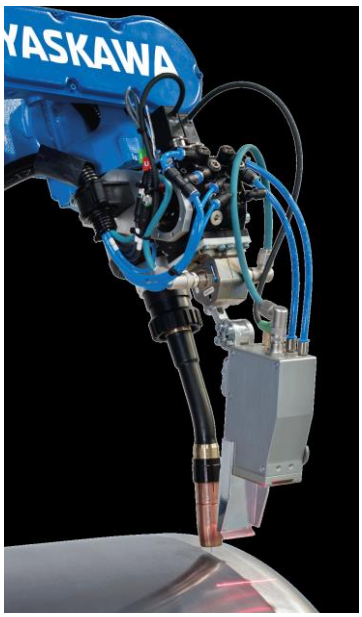
На фиг. 19. е показан **Заваръчен робот KUKA VK30** със следните данни:

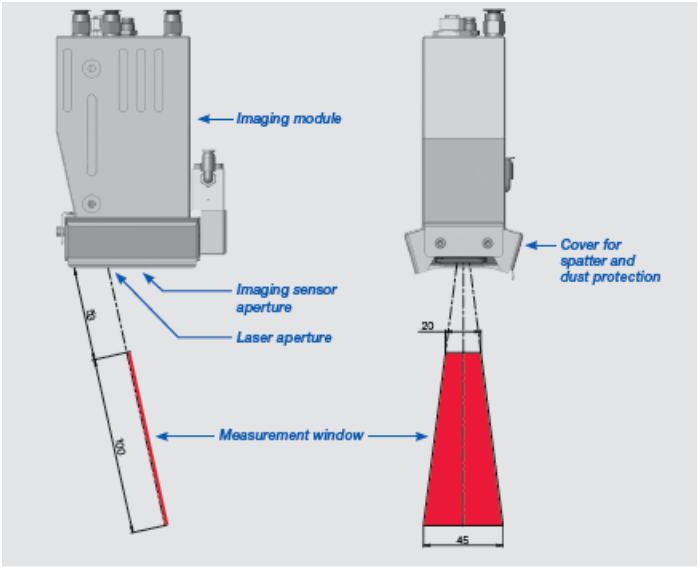
- Година на производство: 1996
- Обхват (обсег): 1950 мм
- Маса с 3 оси на позициониране за заваряване - диаметър 600 мм
- Оборудван с МИГ/МАГ токоизточник (година на производство 2012; водно охлаждане; дистанционно)

Фиг. 18. Заваръчен комплекс KUKA

Фиг. 19. Заваръчен робот KUKA VK30

Фирмата **YASKAVA** предлага адаптивно роботизирано заваряване с визуален сензор – фиг. 20. Системата за видеонаблюдение на MOTOSense дава функционалност на роботите YASKAWA за откриване, следене и заваряване по реалната траектория в реално време. Системата може да се използва в TIG, GMAW (MIG / MAG) процеси. Освен това тя поддържа параметри за широк кръг от материали като неръждаема стомана, алуминий и др.





Фиг. 20. Робот YASKAVA Фиг. 21. Визуална система на YASKAVA

Основни предимства:

• Намалена цена поради абсолютно позициониране и не е необходима повторяемост
• Уникално решение за сензори при нулево отваряне на шевовете
• Гъвкаво решение за специфични задачи по заваряване
• Интегрирано решение за роботизирани контролери YASKAWA

На фиг. 21. е показана структурата на визуалната система на YASKAVA.

1.4.Монтажни роботи

Монтажът на машиностроителни изделия, представляващи най-често твърди тела, е геометричен проблем, изискващ точно позициониране. Ако монтираните детайли са изработени с необходимата точност, и ако хващачите и позициониращите устройства са също точни, задачата за съвместяване на детайлите се свежда до задача за траекторно управление на монтажния робот.

В реални условия тези изисквания се нарушават най-често поради технически и икономически ограничения. Тогава относителното разположение на монтираните детайли се отклонява от желаните позиции с неизвестна отнапред линейна и ъглова грешка. За осигуряване на работоспособност на роботизираната монтажна система в тези условия трябва или да се намалят грешките в размерите и разположението на детайлите, или да се изгради адаптивна монтажна система с ползване на сензорна информация по време на работа и съответно промяна на параметрите на движението при монтаж, [1].

Сред основните предимства на роботизираните технологии в асемблирането на компоненти, възли и сглобени единици и монтажа на детайли и машини са по-високата прецизност и скорост на работа, както и способността на робота да изпълнява безпроблемно комплексни, рискови за човека и повторяеми операции. В допълнение, роботизираните системи за монтаж и асемблиране могат лесно да бъдат преоборудвани и пренастроени при промяна на извършваните технологични операции и обектите, с които се манипулира, което осигурява висока гъвкавост на производството, [16].

В зависимост от приложението, монтажните роботи могат да бъдат оборудвани със системи за машинно зрение и за измерване на усилия (force sensing). Технологиите за машинно зрение направляват робота при повдигане, транспортиране и поставяне на

компоненти на технологичната линия (pick-and-place операции), намалявайки или дори елиминирайки нуждата от допълнителни системи за прецизно позициониране.

Функциите за визуален контрол направляват робота и при завъртането и пространственото ориентиране на компонентите, за да си паснат при сглобяването. Технологиите за измерване на сили са от изключителна полза при операции като поставяне на един компонент в друг. Те изчисляват каква е необходимата сила за осъществяване на сглобката и каква сила прилага роботът.

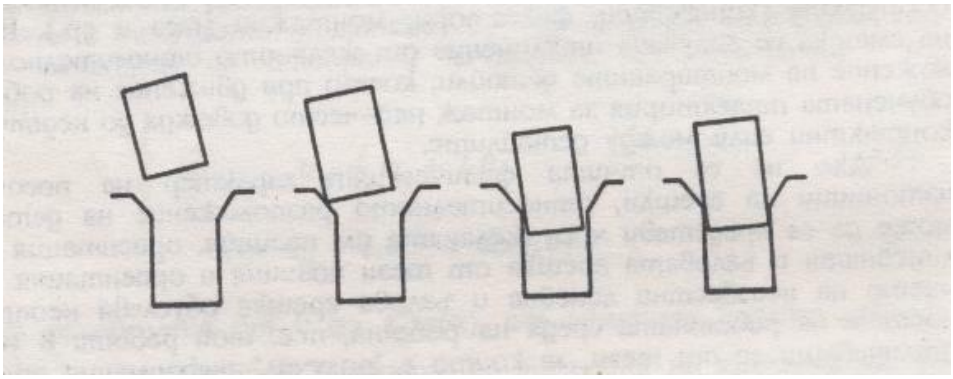
1.4.1. Предимства и приложения на монтажните роботи

Монтажните приложения обикновено включват широк набор от дейности, включително: идентифициране и сортиране на детайли, подаване на детайли към технологична линия/машина (bowl feeding, bin picking), широк набор от операции на роботизираните манипулатори, смяна на инструменти, измерване на сила, захващане и монтаж на детайли, визуална инспекция и др. Сред най-популярните приложения на монтажните роботи са асемблирането на двигатели, помпи, предавателни механизми в автомобилостроенето, монтаж на възли и машини в транспортното машиностроене, монтажни операции в електронното и електротехническо машиностроене, производството на медицинско оборудване и битови електроуреди и т. н., [16].

Този тип роботизирани системи са подходящи за приложения, в които са необходими висока скорост и прецизност, включително монтаж на изключително малки или сложни за човешката ръка детайли, както и за приложения, в които чистотата е приоритет, като монтажни операции в чисти стаи, в електронното производство, асемблирането на медицински устройства и изделия и т. н. Роботизираните системи гарантират по-ниски производствени разходи, както и нисък риск и бърза възвръщаемост на инвестицията. В допълнение, монтажните роботи осигуряват и в пъти по-голям производствен капацитет в комбинация с усъвършенствано качество на продукцията. За разлика от специализираните за асемблиращи/монтажни операции системи за автоматизация, роботите разполагат с достатъчна гъвкавост при преконфигурирането за асемблиране на различни продукти от една линия или фамилия, както и при всякакъв тип промени на продуктовия дизайн, [16].

1.4.2. Монтажна операция “вал – отвор”

Според изследвания на учени близо 60% от монтажните операции в машиностроенето могат да бъдат определени или сведени до монтаж на вал в отвор, [1]. За простота и поради осовосиметричност на детайлите, разглежданията могат да бъдат направени в равнината, фиг. 22.



Фиг. 22. Основни фази на монтажната операция “вал-отвор”

Приемат се следните допускания:

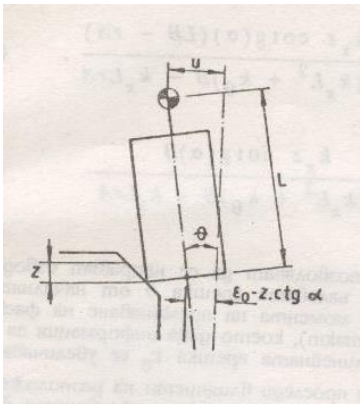
- валът е окачен на монтажното устройство по оста му на симетрия,

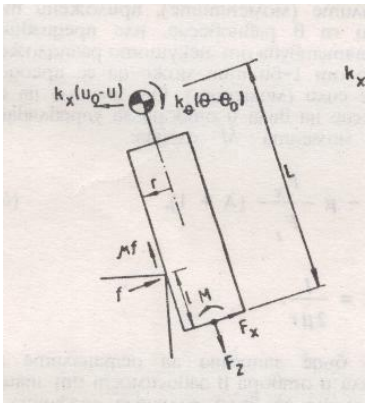
- окачването е податливо за линейна и ъглова деформация,
- подвеждането на вала към отвора е по оста му на симетрия,
- поне единият от детайлите е изработен с подвеждаща фаска,
- силата и моментът върху вала се привеждат в центъра на челото.

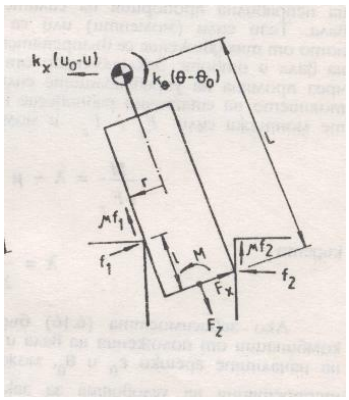
Основната задача при геометричен и силов анализ е проследяване на взаимното разположение на вала и отвора в процеса на монтаж и пресмятането на контактните сили във всеки момент от движението. Анализът дава възможност да се изучи влиянието на параметрите на окачването и служи за основа на синтеза на адаптивна система.

Основните фази на монтажната операция "вал – отвор" са:

- преминаване на фаската. Текущите стойности на линейната **ε** и ъгловата **θ** грешки в относителното разположение на вала спрямо отвора в момента на контакт са свързани с текущото отстояние **u** на центъра на окачване от оста на симетрия и дават информация за влиянието на разположението на центъра на окачване и параметрите на окачване върху трансформацията на ъгловата и линейната грешки (фиг.23).







Фиг.23.Преминаване на фаска Фиг.24.Едноточков контакт Фиг.25.Двуточков контакт

$$u_0 = \varepsilon_0 + L.\theta_0$$

$$u = \varepsilon_0 + L.\theta_0 - z.\mathrm{cotg}(\alpha)$$, α - ъгъл на фаската

- едноточков контакт. В момента на преминаване на фаската дължината на вмъкване на детайла в отвора **l** е нула. При това предположение може да се получи стойността на ъгловата грешка в момента на възникване на контакта. Тук действат следните геометрични ограничения (фиг. 24):

$$u = c.R + L.\theta - l.\theta$$, r, R – радиуси на вала и на отвора

- двуточков контакт. Имаме четири комбинации според знаците на началните линейна ε_0 и ъглова θ_0 грешки (фиг. 25). При определени геометрични или силови съотношения могат да възникнат две явления, които могат да възпрепятстват монтажа – jamming (заклинване от 1-ви тип) и wedging (заклинване от 2-ри тип), [1].

$$D = l.\mathrm{tg}(\theta) + d.\cos(\theta)$$, d, D – диаметри на вала и отвора

което за малки стойности на θ добива вида:

$$l.\theta = c.D$$, $c = (R-r)/R$

Заклинването от 1-ви тип се характеризира със спиране на движението вследствие на неправилна пропорция на силите (моментите), приложени върху вала. Те или са в равновесие, или предизвиканото от тях движение се възпрепятства от текущото разположение на вала и отвора. Заклинването от 1-ви тип може да се преодолее чрез промяна на управляващите сили (моменти).

При заклинването от 2-ри тип движението също спира, но тук причините са геометрични, а не силови. Контактните сили в двете точки на контакт са насочени една срещу друга и акумулират енергия в детайла. Поради това то не може да бъде преодоляно чрез промяна на управляващите сили. Остава да се разглоби съединението и да се монтира отново, ако това е възможно.

1.4.3. Примери на монтажни роботи

Типично, високотехнологичните монтажни роботи в машиностроенето са в някоя от следните конфигурации: шестосни антропоморфни роботи, четириосни SCARA (Selective Compliance Assembly/Articulated Robot Arm) роботи, както и все по-масово използваните делта роботи с паралелна кинематика. Последните са проектирани за таванен монтаж и използват моторизирани механизми за задвижването на три (или повече) свързани рамена. Това им позволява да изпълняват монтажни операции със завидна прецизност и скорост, макар товароносимостта им да е значително по-малка в сравнение с тази на класическите шарнирни топологии. Обикновено делта роботите са с три или четири оси, но някои производители предлагат модели с до шест оси, подходящи за комплексни високоскоростни асемблиращи операции, [16].

Новия робот на **FANUC SR-3iA** е първият модел от серия SCARA роботи – фиг. 26. .

Фиг. 26. Робот на FANUC SR-3iA серия SCARA

Новият SCARA робот на FANUC предлага висока скорост и прецизност за приложения в широк кръг от индустрии, включително производство на потребителска електроника, автомобилни компоненти, пластмаси, лабораторна автоматизация, електроуреди и медицински изделия. Типични приложения на SCARA робот са pick and place, окомплектоване, изпитване, инспекция, опаковане, [17].

Характеристики на модел SR-3iA:

- Полезен товар - 3 кг
- Обхват - 400 мм
- Ход - 200 мм
- SCARA роботът се задвижва от R-30iB Compact Plus контролер.

Роботът на **ABB: IRB 910SC - SCARA** е бърз, евтин и точен – фиг. 27. Той е подходящ за сглобяване на малки части, обработка на материали и инспекция, [18].

Параметри:

- Подемност: до 6 кг
- Обхват: 45-65 см

Предимства:

- ISO-5 за чисти стаи
- IP54 защита
- Различни позиционирания
- Лесна интеграция
- Модулен дизайн
- Кратък цикъл
- Висока точност

Фиг. 27. Робот на ABB: IRB 910SC - SCARA

Фиг. 28. Хващач за монтажни роботи на FESTO

FESTO е разработил нов универсален хващач MultiChoice за монтажни роботи, [19]. Той има променлив захват, базиран на човешката ръка, и комбинира различни начини на

захващане. Пръстите му могат да бъдат превключвани така, че да са с паралелен захват или с центрираща посока – без това да изисква никакви преобразувания – фиг. 28.

Адаптивните пръсти с Fin Ray структура се приспособяват сами гъвкаво към най-различни форми и са много чувствителни, без нуждата от допълнителни сензори или технологии за управление.

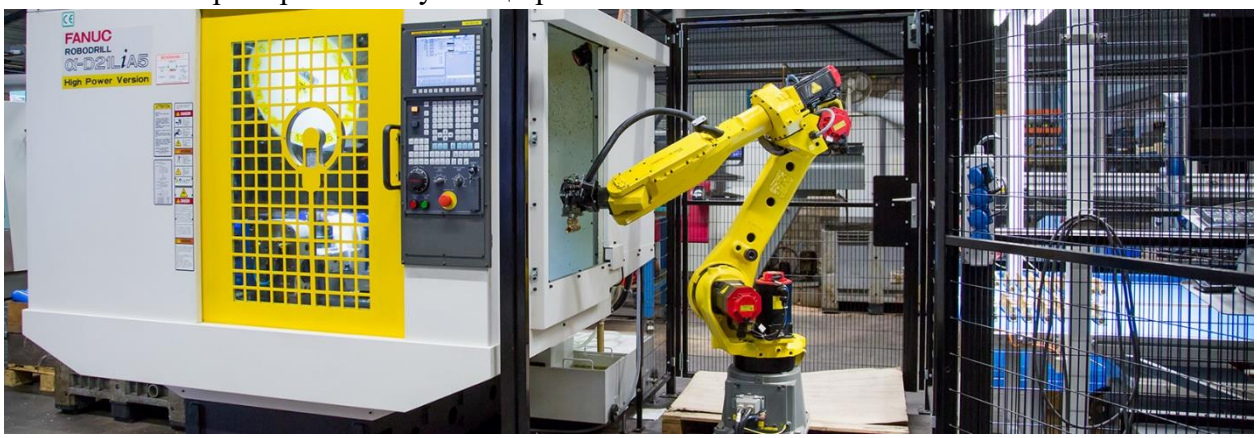
MultiChoice е насочен към приложения, в които се захващат най-различни по форма обекти, например при спомагателните роботи за асемблиране или в производствени предприятия, където се произвеждат разнообразни продукти. В момента често се налага използването на сменяеми системи, които се оборудват с различни хващачи.

1.5. Обслужващи роботи

Роботизираните системи за обслужване на металообработващи и металорежещи машини свеждат до минимум времето за зареждане и разтоварване на детайли, като напълно автоматизират процеса. Роботизираното обслужване включва по-висока скорост, прецизност и повторяемост на операциите в сравнение с ръчното обслужване от човек асистент. Автоматизираното подаване на детайли може да бъде от поточна линия, контейнер или входящ бункер, а прецизното повдигане, транспортиране и поставяне на детайла обикновено се координира от система за машинно зрение. В края на обработващия цикъл машинният контролер отваря преградата за достъп на робота и му подава сигнал, че може да навлезе в зоната на обработка, за да разтовари готовия детайл и да зареди нов посредством специален хващач (грипер) в края на роботизираното рамо. След края на тази операция предпазната преграда отново се затваря и машината започва следващия цикъл на обработка. Докато трае той, роботът обикновено извършва спомагателни операции като зачистване, обезмасляване и измерване на вече обработените детайли. В някои клетки операциите са конфигурирани така, че основният обслужващ робот е асистиран от втори спомагателен робот, който обикновено се грижи за поставянето на готовите изделия на палета или за подаването им към технологична линия. Роботизираното обслужване на металообработващи машини позволява непрекъснато редуване на обработващите цикли без нужда от прекъсвания за почивка на операторите или за смяна на персонала. Също така е важно, че такъв тип роботи обслужват обикновено големи, скъпи, високоскоростни и много бързи машини, при които е много важно престоят между циклите да е минимален, [1], [16].

Роботът може да бъде монтиран на тавана или директно върху машината. Сред най-популярните приложения на обслужващите роботи са операциите по машинна обработка (струговане, фрезоване, шлифоване, пробиване и т.н.), формоване, щамповане и т. н., [16].

Някои примери за обслужващи роботи са:



Фиг. 29. Клетка с роботи на FANUC

На фиг. 29 са показани две машини α-ROBODRILL D21LiA5, заобиколени от роботизирани клетки, включващи роботи R-2000iB на **FANUC** и продуктов склад. Операторите подготвят отливките и ги поставят върху палетите. Роботите занасят палетите до машините и ги свалят. С помощта на визуалната система на FANUC по-малките продукти се взимат направо от роботите и се поставят върху конвейера, [20].

На фиг. 30 са показани серия манипулатори **MPS на фирма СПЕСИМА ООД** за работа с машини за леене и полутечно щамповане.

Дозиращ манипулатор

Обмазващ манипулатор

Манипулатор – екстрактор

Фиг. 30. Обслужващи манипулатори на фирма СПЕСИМА

Манипулаторите имат висока точност, скорост и повторяемост, изградени са на модулна основа и се предлагат във варианти за различни по големина машини. Други видове манипулатори на фирма СПЕСИМА са сериите GRIPMAT, SPEEDMAT др. Фирмата извършва също реинженеринг на индустриални роботи, автоматизация на производството и др.

1.6. Реинженеринг на роботи и роботизирани системи

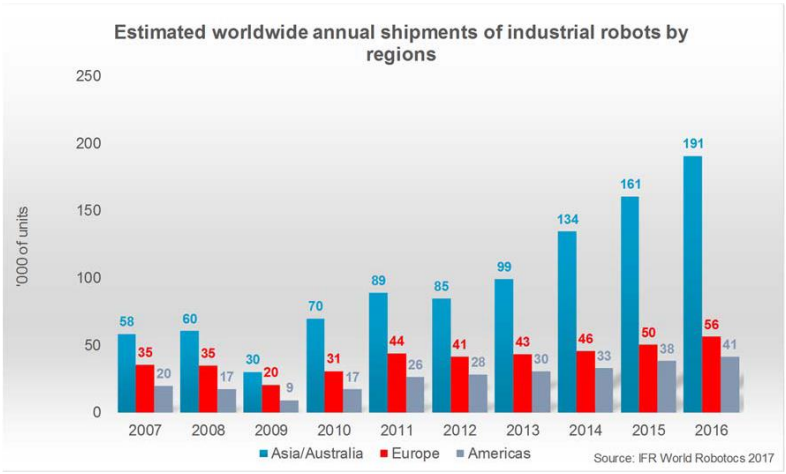
За изясняване на нуждата, целите и задачите при реинженеринг на индустриални роботи ще бъде извършено следното:

- Анализ на развитието на съвременната индустриална универсална роботика (ИУР)
- Изследване на внедряването на ИУР във водещи индурстиални райони
- Изследване и класификация на основните параметри и приложения на ИУР
- Основни системи на ИУР
- Реинженеринг на индустриални универсални роботи
- Подбор на индустриален робот за реинженеринг

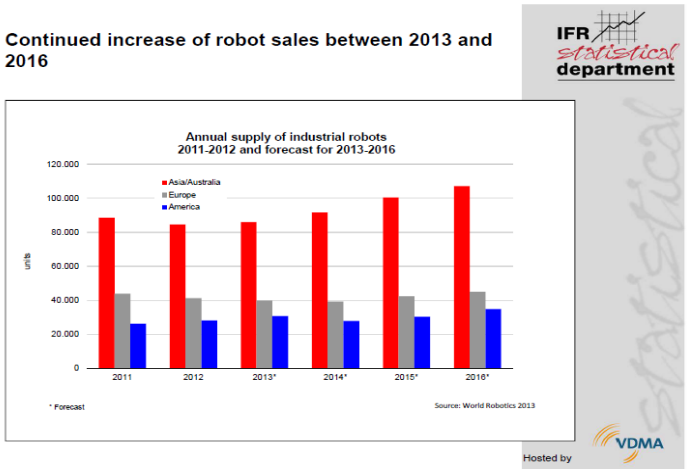
1.6.1. Проучване и анализ на информацията за развитие на съвременната ИУР

Представените графики (*фиг. 31*, *фиг. 32*, *фиг. 33*, *фиг. 34*, *фиг. 35* и *фиг. 36*) показват световното годишно производство на *ИУР*, с нарастване и характерни застои при рецесия.

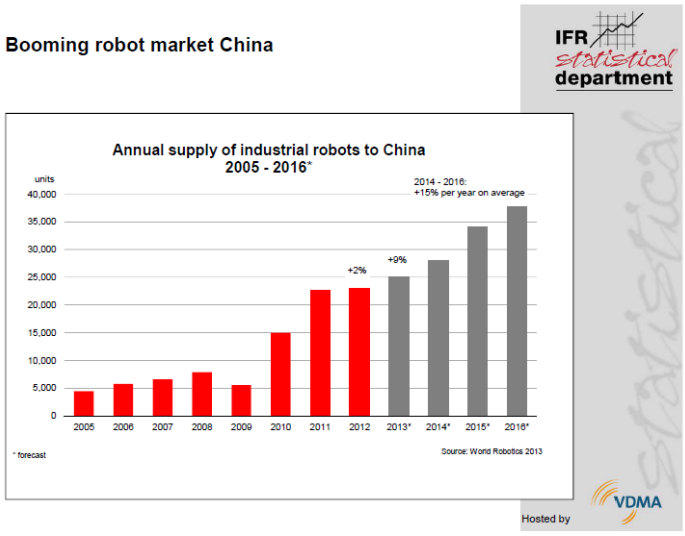
Според *IFR (Международна федерация по роботика)* през 2013г. са произведени 162 000 броя *ИУР*. Според тогавашната прогноза за следващите три години броят на *ИУР* ще нараства приблизително с *6%*, за да достигне *193 000* през *2016г.*



Фиг.31 Световно годишно производство на ИУР, с нарастване и застои при рецесия



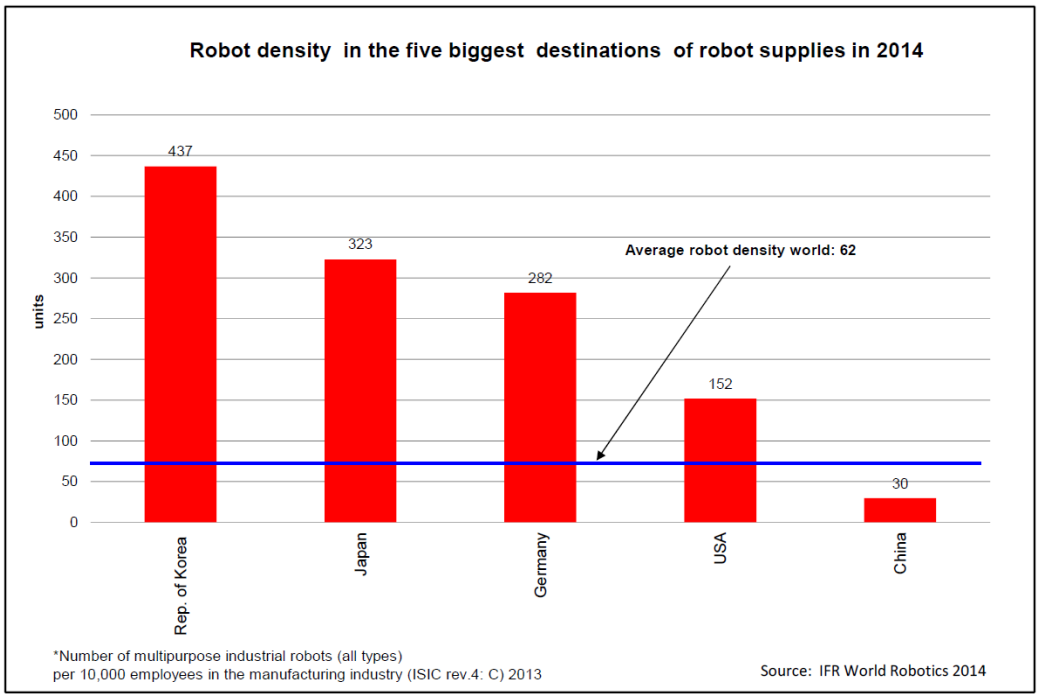
Фиг. 32 Съотношение между ползването на *ИУР* в *Азия/Австралия*, *Европа* и *Америка*



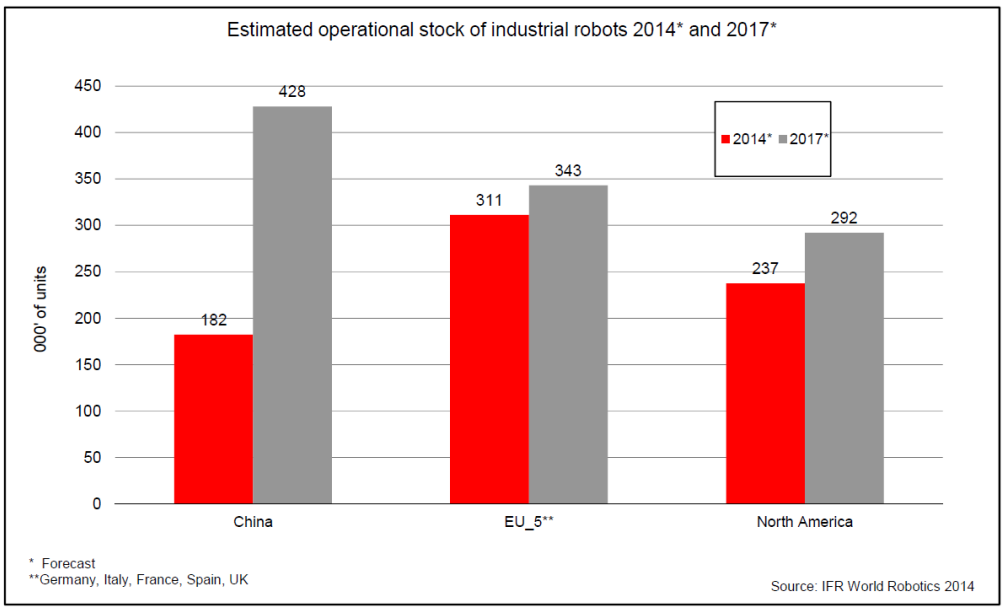
Фиг. 33 Продажби на *ИУР* в *Китай*

1.6.2. Изследване на внедряването на ИУР във водещи индурстиални райони

На *фиг. 34* е илюстрирано в кои страни се е използвало най-много *ИУ*Р. Сравнението е направено, като съотношение на: брой *ИУР* към 10 000 работни места, в индустриалното производство. В първата петица са Южна Корея, Япония, Германия, Швеция и Италия.



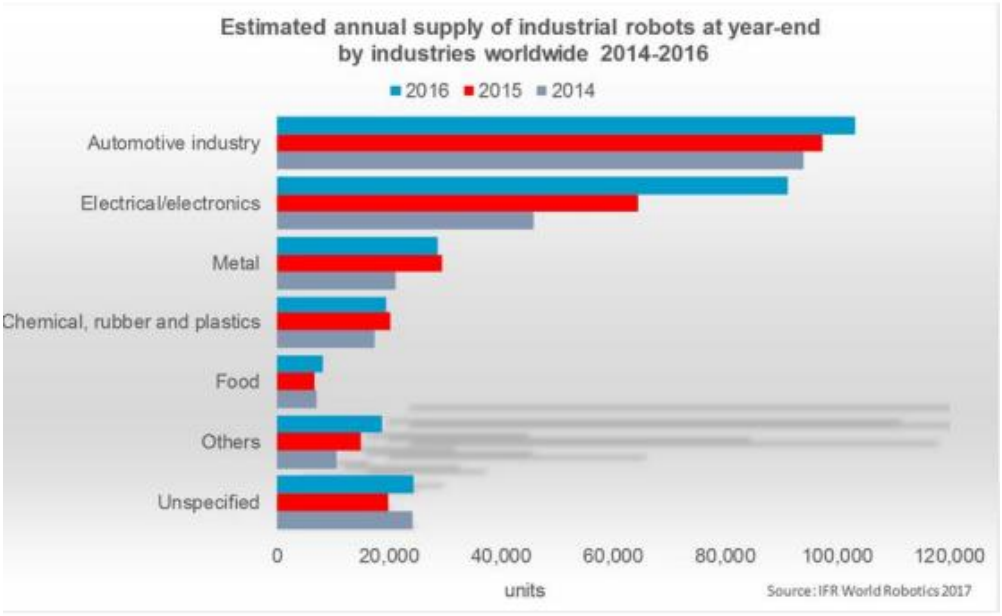
Фиг. 34 Държави с най-голямо разпространение на *ИУР*



Фиг. 35 Внедряване на *ИУР* в три от водещите индустриални региона- *Китай, Европейски съюз* и *Северна Америка*

На *фиг. 35* е илюстрирано сравнението между китайската икономика, по отношение внедряването на универсални роботи до *2017 г.* и водещите икономики на другите два силни индустриални региона – Европа и Северна Америка.

Във *фиг. 36* се вижда, че над *50%* от *ИУР* са се внедрявали в автомобилостроенето.



Фиг. 36 Промишлени сектори, в които се внедряват *ИУР*

На база този анализ се стигна до заключението, че **реинженерингът на универсални роботи има огромен потенциал,** тъй като годишно на вторичния пазар се появяват над 80 000 робота, които могат след модернизиране да се насочат в други специфични области и индустрии като:

- химическа и циментова индустрия;
- металургия;
- машиностроене;
- хранително-вкусова промишленост;
- складово стопанство и логистика;
- галванични и химически обработки;
- заваръчни и множество други операции;
- плазмено наваряване и др.

Проучванията, както и анализът, направени от базата данни на *IFR (Международна федерация по роботика)* показаха, че в страните от *Югоизточна Европа* има големи възможности за внедряването на *ИУР*. Поради по-ниската си платежоспособност и остарели технологии тези страни често не могат да си позволят закупуването на ново оборудване за автоматизация, така че след реинженеринг и модернизация на хардуера и софтуера - универсалните роботи могат успешно да се пренасочат на пазарите освен в България, и в бившите Югославски републики, Румъния, Русия, Украйна, Беларус, Турция и др. страни от Черноморския регион.

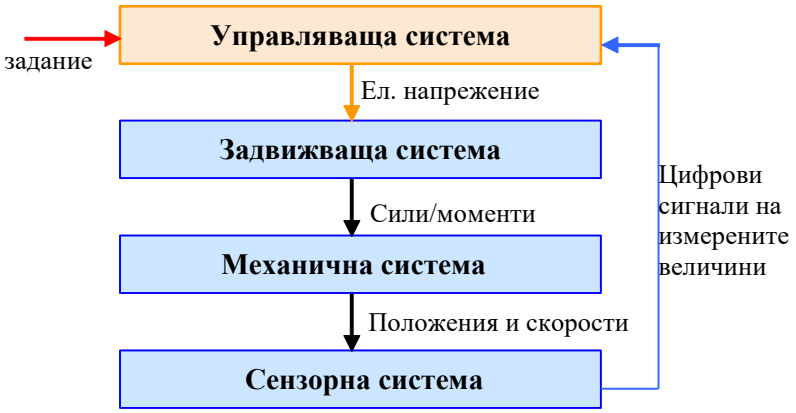
Индустриалното направление *Мехатроника* (съчетание на модерна механична конструкция със съвременен хардуер и авангарден софтуер) играе все по-голяма роля в промишленото развитие на водещите световни икономики и че автомобилостроенето, промишлената и битова електроника и основно роботиката са неизменна част от *Мехатрониката*, която е определена, като основен приоритет в *Стратегията за*

интелигентна специализация на България в периода 2014 – 2020 г. На база на извършения литературен обзор бяха посочени следните изводи:

- в съвременните технически устройства все по-тясно се преплитат проблемите на механиката и електрониката, на *„кинематичния"* и *„електронния"* интелект;
- синтезът на механизмите решава геометричната част на задачата за управление на затворените кинематични вериги;
- работи се усилено в теоретично и приложно отношение за създаване на т.нар. интелигентни машини. Като първи стадий в тяхното развитие може да се приеме създаването на т.нар. хибридни машини, към които могат да бъдат отнесени индустриалните роботи;
- мехатронният подход за изследване на хибридни технически системи е все още в своя генезисен стадий на развитие, но по всяка вероятност ще се окаже една реалистична и особено перспективна насока при създаването на хибридни системи.

1.6.3. Изследване и класификация на основните параметри и приложения на *ИУР*

На *фиг. 37* е посочен основният принцип на мехатрониката, който изисква *ИУР* да се разглеждат като технически устройства от взаимосвързани системи: механична, задвижваща, управляваща и сензорна.



Фиг.37 Взаимосвързани системи на *ИУР*

Роботите да се разделят съобразно класификационния критерий *„степен на специализация"* на специални, специализирани (целеви) и универсални (многоцелеви).

Специалните индустриални роботи са с ограничени функционални възможности. Те са предназначени за изпълнение на определена технологична операция или обслужват конкретен модел на основно технологично оборудване. Когато управлението и задвижването на едно техническо манипулационно устройство (манипулатор) са непрограмируеми, тогава представлява т.нар. *автооператор*.

Специализираните индустриални роботи имат разширени функционални възможности [22]. Предназначени са за изпълнение на технологични операции от един вид, с възможности за обслужване на различни модели на основно технологично оборудване. Програмата им за действие съдържа разширен набор от информация, която в отделни свои части търпи корекции при изменение на външната среда. Например леярските дозиращи роботи реагират на промяната на нивото на стопения метал, следейки промяната на средата *въздух-стопен метал*, в резултат на което черпакът им се спуска все по-ниско към дъното на потата (пещта) при спадане на нивото на стопения метал в нея.

Универсалните индустриални роботи имат многоцелеви функционални възможности. Предназначени са за изпълнение на разнородни основни и/или спомагателни операции, като изпълнението им е възможно да се осъществи по различни начини.

При универсалните роботи с антропоморфна структура и обикновено шест степени на свобода, управлението трябва да гарантира траекторно движение, включително ориентация на манипулираните обекти в пространството. За тази цел трябва да се използват синхронни високопрецизни сервозадвижвания и контролери от най-съвременни поколения.

1.6.3.1. Механична система

В съответствие с движенията на човешката ръка различаваме три вида движения и съответно три вида структури, с три подвижни звена, които реализират тези движения: глобално, регионално и локално.

Глобалната структура осъществява преместване на целия робот спрямо координатна система, свързана със земята. Роботите, извършващи глобално движение (просто, равнинно или пространствено), се наричат *мобилни*. Обект на настоящото изследване са роботите без глобално движение, известни като *стационарни*.

Регионалната структура осъществява преместване на характеристична точка на третото подвижно звено, посредством съответна регионална структура (кинематична верига) на робота. В зависимост от комбинацията на *R (ротационни)* и *P (плъзгащи)* кинематични двоици на регионалните структури с три подвижни звена, те се разделят на четири групи:

- *R R R* – ъглова, реализираща позиционирането на характеристичната точка чрез три ротации на трите R-двоици. Такава структура се нарича още антропоморфна (човекоподобна), хомоморфна или хуманоидна.
- *R R P (R P R; P R R)* – сферична, реализираща позиционирането на характеристичната точка, чрез промяна на три сферични координати, спрямо координатната система на стойката.
- *R P P (P P R; P R P)* – цилиндрична, реализираща позиционирането на характеристичната точка, чрез промяна на три цилиндрични координати, спрямо координатната система на стойката.
- *R P P* – декартова (картезианска), реализираща позиционирането на характеристичната точка, чрез промяна на три декартови координати, спрямо координатната система на стойката.

Локалната структура осъществява ъглова ориентация на манипулирания обект спрямо координатната система на стойката посредством три ротации на локалната структура („китката“).

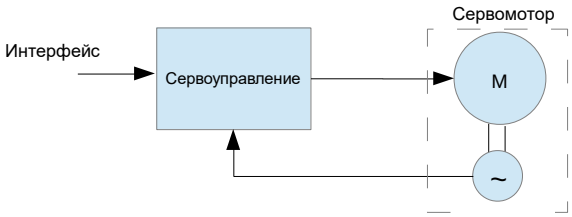
Изводът е, че множеството изследания върху съществуващите индустриални роботи показват една явна тенденция към налагане на роботите с антропоморфни стуктури, независимо от по-големите трудности при тяхното управление. Това се дължи преди всичко на конструктивните, технологичните и експлоатационните предимства на *R-двоиците* пред *P-двоиците*.

1.6.3.2. Задвижващата система на индустриалните роботи

Проследени са съвременните тенденции в задвижването на индустриалните роботи. Посочено е, че съществените аргументи при избора на сервозадвижване за *ИУР* трябва да бъдат: безопасността на работа; увеличаването на прецизността на позициониране и времето за реакция на цялата задвижваща система, чрез използването на високоскоростни цифрови интерфейси и високопроизводителни контролери; едновременната интерполация между всички оси и реализирането на сложни траектории в пространството; висока степен на свързаност към външни устройства, контрол и диагностика от разстояние, лесен за употреба потребителски интерфейс; нисък разход на енергия; използване на съвременни средства за намаляване на окабеляването и заеманата площ.

След сравнителна оценка на трите основни типа задвижване (хидравлично, пневматично и електрическо) се акцентира върху най-широко използваните електрически задвижващи системи с променливотокови и постояннотокови сервомотори за осъществяване на задвижването.

Тук са изтъкнати някои особености на сервомоторите - съществена тяхна отличителна черта е възможността да се управляват и по позиция, а не само по скорост. За разлика от конвенционалните електродвигатели те не могат да функционират самостоятелно. Тяхното управление се осъществява от системи, наречени сервоуправления. Това са електронни блокове, които преобразуват и модулират енергията във вид подходящ за управление на сервомотора. На базата на информация, предоставена от енкодер или резолвер в обратната връзка, сервоуправленето решава какви сигнали и енергия да подаде към сервомотора, за да се осъществи желаното движение. Комбинацията от сервомотор и сервоуправление е прието да се нарича сервозадвижване, което намира. широко приложение в индустриалната роботика и други промишлени отрасли – фиг. 38.



Фиг. 38 Блок схема на сервозадвижване – сервомотор и сервоуправление

Дадени са други основни класификационни критерии за сервозадвижващите системи:

- принцип на работа на сервомотора;
- вид на вградения датчик за обратна връзка;
- вид на сервоуправлението и интерфейса за управление.

Посочени са особеностите на постояннотоковите сервомотори, като са изтъкнати техните предимства и недостатъци. Изброените предимства включват: добри пускови характеристики; възможност за регулиране в широк диапазон на скоростта; висока динамика; лесна настройка и управление. Недостатъците са обобщени както следва: по-сложна конструкция, поради наличието на колектор и четки; необходимост от трансформатор за понижаване на напрежението; необходимост от периодична експлоатационна поддръжка; периодична настройка на серворегулаторите като следствие от

износване на колекторите; необходимост от ограничаване (лимитиране) на максималния момент (максималния ток), за да се предотврати размагнитването на магнити.

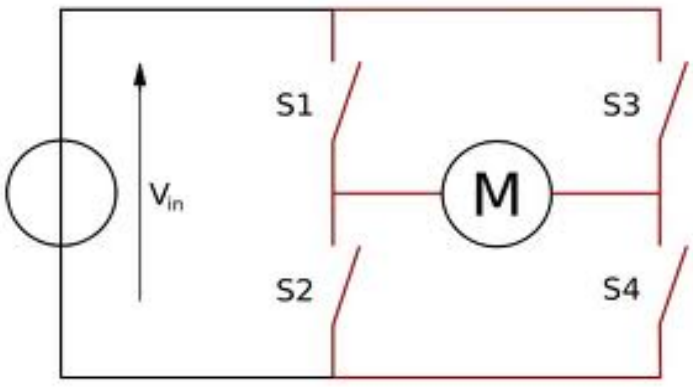
1.6.3.3. Управляващата система на индустриалните роботи

Хронологично е проследено развитието на управлявашите системи за автоматични и автоматизирани индустриални машини и роботи.

Разгледани са някои проблеми и подходи, които се прилагат в специализираната роботика. Разгледани са основните методи за управление на индустриални роботи, необходимите условия и параметри, трябва да се изпълнят при изграждането на хардуера и софтуера за управлението им. Като проблем се посочва, че е необходимо да бъде изпълнено общото условие за независима ставна управляемост (*НСУ*), което гласи, че знакът на задвижващия момент в която и да е става, трябва да е равен на знака на съответното ускорение, поне когато този момент има максимално възможна стойност. Това условие с нарастването на броя на управляваните звена става все по-трудно и сложно за изпълнение. Тъй като многозвенните индустриални роботи имат сложна динамика, се налага прилагане на оптимизационни алгоритми, които не са чувствителни към грешки в моделирането.Установи се, че е много подходящо да се прилагат многомерни бисекционни алгоритми, тъй като те не използват градиентни оценки на функциите на модела. В практически приложения, такива алгоритми не се нуждаят от динамични модели и оптимизацията на движение може да бъде наречена оптимално управление чрез самообучение. С гореспоменатите условия на управляемост, тези алгоритми за оптимално управление чрез самообучение имат необходимите математически гаранции за тяхната приложимост и сходимост. Освен това, много важно предимство на бисекционните алгоритми е, че те се нуждаят от минимум брой оценки на функции, което означава, че броят на пробните движения за достигане на дадена цел е минимален. Тази особеност е много подходяща за обучение на роботи, тъй като тези алгоритми ще могат да се реализират за възможно най-кратък срок, при оптимален разход на енергия и минимална амортизация.

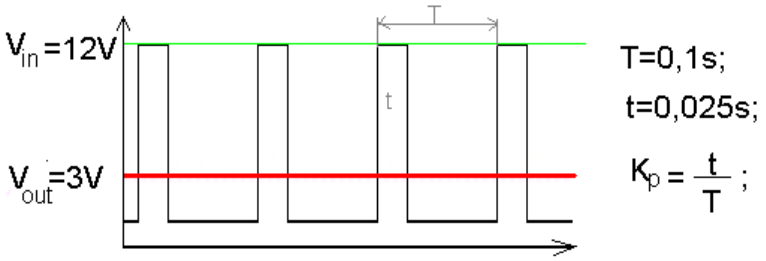
Съгласно друга задача тук са разгледани особеностите при управлението на постояннотоковите и променливотоковите сервомотори. Детайлно са разгледани различните типове двигатели и от двата вида, с техните конструктивни особености, предимства и недостатъци.

За постояннотоковия сервомотор е дадена примерна четирираменна схема на управление в двете посоки на въртене, показана на *фиг. 39*.



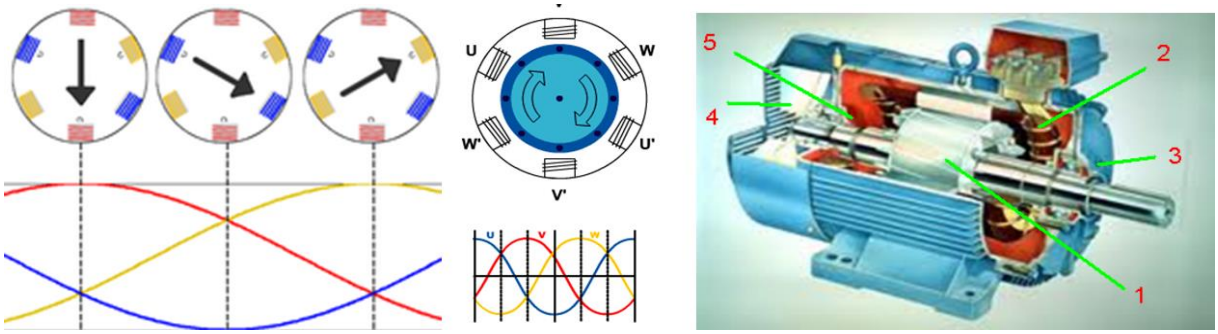
Фиг.39 Четирираменна схема на управление

Регулаторите, които се използват за управление, се състоят от изправител, силова част (изпълнена с тиристори или транзистори) и блок за управление. Регулирането на подаваното към сервомотора напрежение става чрез широчинно-импулсна модулация *ШИМ* (*фиг. 40*).



Фиг. 40 Широчинно-импулсна модулация (*ШИМ*), където: T - периода, t - продължителност на включване, Vin - входно напрежение, Vout - изходно напрежение, Kp е коеф. на запълване.

Разгледани са променливотоковите сервомотори с основните техни разновидности – асинхронни и синхронни сервомотори. Принципът на действие на двата вида двигателя са показани на *фиг. 41* и *фиг. 42*.

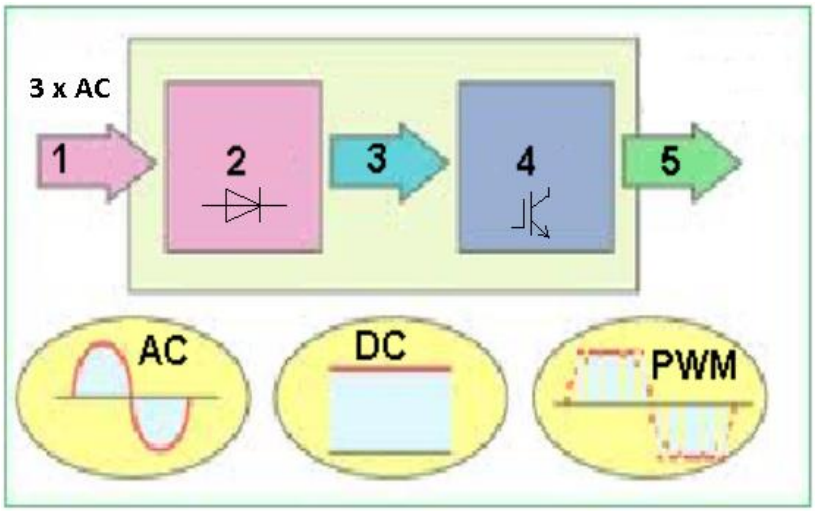


Фиг. 41 Принцип на действие и устройство на асинхронен серводвигател – 1 ротор, 2 статор, 3 лагерен щит, 4 охлаждане, 5 енкодер.

Фиг. 42 Принцип на действие и устройство на синхронен серводвигател

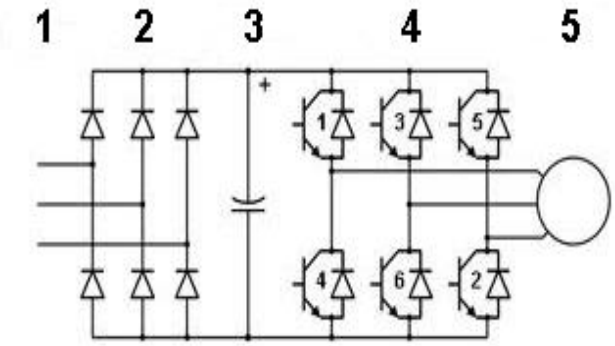
Като важна особеност при управлението на синхронните серводвигатели се изтъкна наличието на обратна връзка от датчик (енкодер или резолвер), даващ информация за абсолютната позиция на ротора в рамките на един оборот.

Беше констатирано, че за управление на променливотоковите серводвигатели се използват честотни преобразуватели. Честотните преобразуватели конвертират входното захранващо напрежение от един вид в друг, като променят неговата честота и форма (*фиг.43*).



Фиг. 43 Блок схема на честотен преобразувател. 1 – входно променливо напрежение, 2 – входен изправител, 3 – *DC*-шина, 4 – трифазен инвертор, 5 – изходно модулирано напрежение

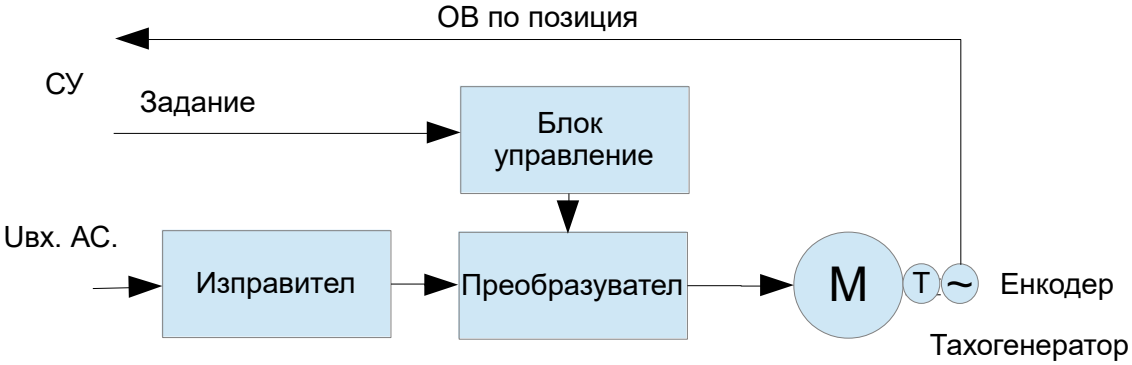
На *фиг.44* е представена схемата на трифазен инвертор, използван в честотните пробразуватели – обикновено той е изграден на базата на *IGBT* модул или дискретни *IGBT* транзистори.



Фиг. 44 Принципна схема на трифазен инвертор. 1-входно захранване, 2- изправител, 3- *DC*-шина, 4- инвертор, 5 – *AC* мотор.

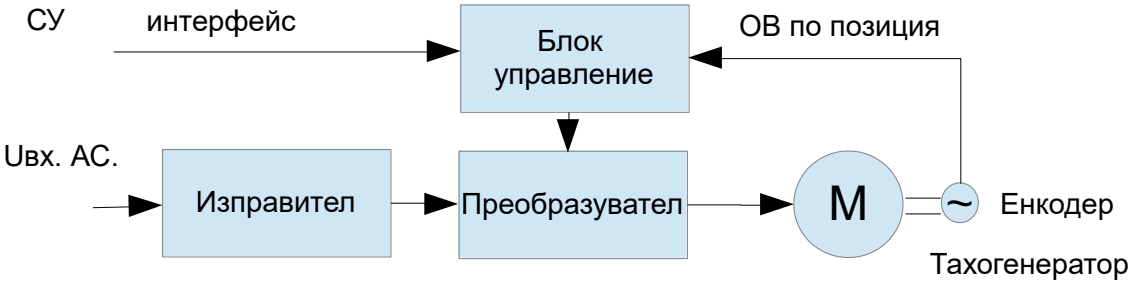
Разгледани са различните видове сервоуправления, осъществяващи контрол на серводвигателя: по въртящ момент; по скорост; по позиция; чрез синхронизация. Структурната схема на едно сервоуправление обикновено включва входен изправител, преобразувател (трифазен инвертор при *AC* серводвигателите) и блок за управление.

Установи се, че в основата на позиционния контрол е управлението чрез обратна връзка с вграден в серводвигателя датчик. Блок-схема на такъв тип сервоуправление е представена на *фиг. 45*.



Фиг. 45 Блок-схема на сервоуправление по скорост

Описан е и друг вид сервоуправление, което изпълнява цялата функционалност по управлението на сервомотора във всички режими на работа. Обратната връзка по позиция и скорост от енкодера или резолвера се затваря изцяло в тях, като по този начин се разтоварва външната система за управление (*фиг. 46*).

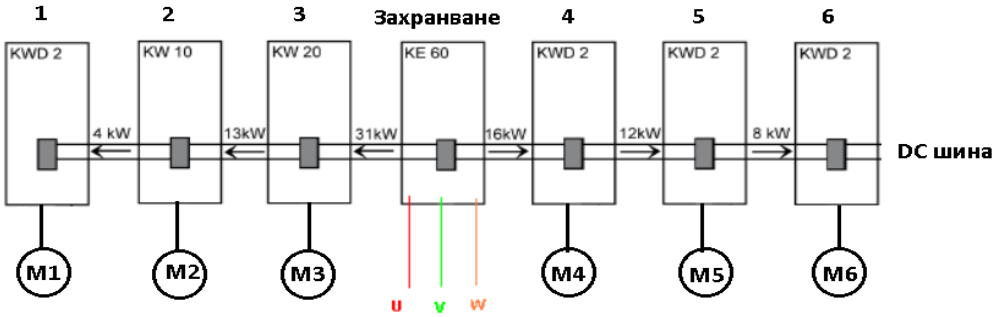


Фиг. 46 Блок схема на сервоуправление по позиция и задание по цифров интерфейс от системата за управление - *СУ*

Структурна схема на блок за управление е показана на *фиг. 47*.

Фиг. 47 Структурна схема на блок за управление в сервоуправленията

В случаите, когато се използват за управление на многоосни системи, сервоуправленията се комбинират в сервосистеми, с цел пестене на пространство и енергия (*фиг. 48*).

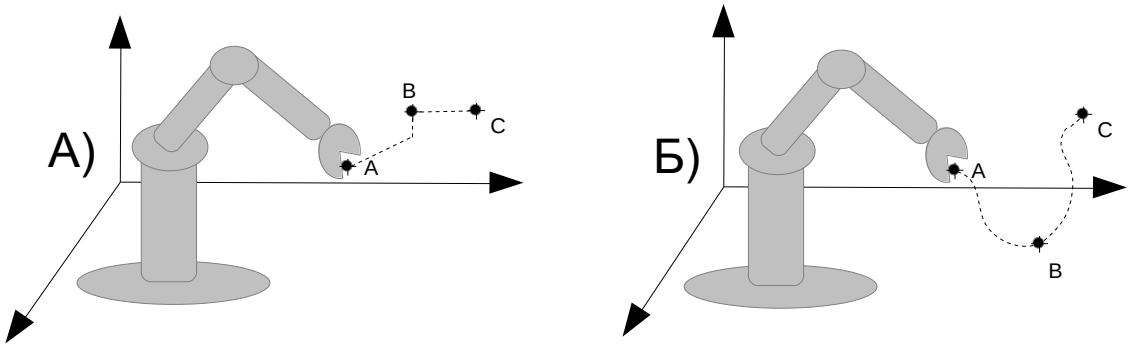


Фиг. 48 Модулна шестосна сервосистема с общ захранващ блок и споделена *DC* шина

1.6.3.4. Контролери за индустриални роботи

В дисертацията е описана работата на контролерите за управлението на сервомоторите. Посочено е, че контролерът е част от роботизираната система, която управлява манипулатора и спомагателните устройства, събира и анализира информацията за състоянието на системата, актуалната позиция на всички оси и свързаните датчици, а също така обменя данни между потребителите и други контролери, посредством полева шина – цифров комуникационен интерфейс.

Обобщени са два основни вида метода за управление на индустриални роботи от изследвания *„антропоморфен“* тип. При класическия метод на управление роботът се движи от една точка към друга. (*фиг. 49А*). С втория метод роботът се управлява по регулирана траектория (*фиг. 49Б*). В този случай, за да може роботът да се придвижи между две точки, контролерът трябва да изчисли неговата траектория. При изчисляването на траекторията се определят скоростта на въртене и посоката на въртене на всеки двигател, така че всички оси да достигнат до целта едновременно (т.е. необходимото движение по всяка от осите трябва да бъде извършено за едно и също време от стартирането на движението до достигането до целта). Траекторният метод на управление изисква наличието на по-голяма изчислителна мощност на контролера и по-голямо бързодействие на задвижващата система.



Фиг. 49 А) управление от точка в точка; Б) управлениел по регулирана траеткория

Разгледани са системите за управление на немската фирма *AMK*, които включват синхронни и асинхронни серводвигатели, оборудвани с оптични, цифрови енкодери или резолвери. Това са основно два типа системи:

- автономна – *iC/iX серия* (*фиг. 50*) – при нея има възможност за управление само на един серводвигател. Всяко задвижване от iC серията обединява в себе си захранващ блок,

инзправител, инверторен блок и управляваща част – т.е всичко необходимо за задвижване на един сервомотор;

Фиг. 50 Сервоуправления от серията *iC/iX* на фирма *AMK*

- модулна – съставена е от няколко отделни модула, които са: захранващ модул *KE* и един или повече инверторни модули *KW-единична ос*, *KWD-двоен инвертор*, *KWZ-двоен инвертор с вградено управление* (*фиг. 51*).

Фиг.51 Модулна сервосистема тип *KE/KW/KWD* на фирма *AMK*

1.6.3.5. Серводвигатели

В дейността е извършен преглед на предлаганите асинхронни серводвигатели от фирма *AMK* (фиг. 52).

Фиг. 52 Асинхронни серводвигатели от серията *DV, DH* и *DW*

Анализирани са техните предимства и недостатъци. Отчетено е, че сервомоторите *AMKASYN DV* не се размагнитват и се отличават с висока способност на претоварване и плавно въртене. Другият тип сервомотори *AMKASYN DH* са динамични и стабилни, и са особено подходящи за главни задвижвания или сервозадвижвания с голяма мощност. Сервомоторите от серията *AMKASYN DW* имат същите характеристики, като *DH* моторите, с тази разлика, че използват охлаждаща течност за отвеждане на топлината. Те практически не отделят горещ въздух, който да оказва термично влияние върху околните модули.

Разгледани са и предлаганите синхронни сервомотори от фирма *АМК* (*фиг. 53*).

Фиг. 53 Синхронни серводвигатели от серията *DT, DTK* и *DS/DP*

Синхронните сервомотори от серията *DS* и *DP* се отличават с компактна форма, висока динамика и широк диапазон на оборотите. Те представляват безчеткови *AC* серводвигатели с възбуждане от постоянни магнити. Серията високомоментни сервомотори *DT* се отличават с голям брой полюси и оптимизирана геометрия на стоманените пакети, и постигат голяма плътност на мощността и ефективен за системата въртящ момент.

1.6.4. Реинженеринг на индустриални универсални роботи

В тази точка е обосновано защо реинженерингът като дейност е икономически и технически изгоден. Посочва се, че:

- запазването на годни главно механични компоненти и модернизацията на хардуерната и софтуерната част на роботите е оптимален и високоефективен подход за реинженеринг на високотехнологични мехатронни изделия, каквито са индустриалните роботи;
- в повечето случаи *ИУР*, които са изведени от употреба или бракувани, запазват своята механична годност. Проблеми създават предимно системите за управление и приложният софтуер. Затова и голяма част от предлаганите на вторичния пазар *ИУР* са без системи за управление и/или сервозадвижване;
- ремонтът на старите контролери и сервозадвижвания е временно решение, ако въобще е възможен, тъй като фирмите производители пазят своето *know-how* и не предоставят информация относно хардуера и софтуера. Единственият вариант е да се търсят алтернативни съвременни контролери и сервозадвижвания за реинженеринг и модернизация на *ИУР*, които не само да ги направят годни за редовна употреба, но и да ги доближат или изравнят технологично, с предлаганите нови такива на пазара.

Определени са някои основни подходи към бъдещия реинженеринг на *ИУР*:

- Изваденитe от употреба *ИУР* от по-ново поколение обикновено вече са оборудвани със синхронни серводвигатели. В повечето случай те са напълно изправни и могат да работят още дълги години. Необходимо е единствено проверка за тяхната годност.

- Необходим е подбор на подходяща цифрова сервосистема за управление на серводвигатели. Тя трябва да е с отворена платформа, широк набор от параметри и процедури за настройка и адаптация. Тъй като *ИУР* се оборудват със серводвигатели на различни производители е необходимо избраният тип сервоуправление да може да се адаптира към различни видове серводвигатели. Типичен пример са *ИУР* на германската фирма *KUKA*. Тъй като техните серводвигатели са производство на *Siemens*, но разработени и предназначени само за *KUKA*, фирмата производител не дава информация за техническите им параметри. В този случай е необходимо изследване на серводвигатели и адаптиране на сервоуправлението към него.

- За управление на *ИУР* е необходимо да се избере съвременен индустриален контролер, предоставящ висока изчислителна мощ, богат набор от цифрови интерфейси и работа в реално време. Необходима е и гъвкава софтуерна платформа, с богат набор от готови технологични функции за разработка на управляващия софтуер на робота.

- Необходимо е да се търси възможност за реинженеринг на *ИУР* на база инспекция на механичната конструкция, разработване на нов хардуер и софтуер и насочването им към други индустрии със специфични изисквания.

Разглеждат се най-различни индустриални роботи с две, три, четири, пет и шест степени на подвижност, като са изследвани техните системи. Установено е доколко масите (дължините, напречните сечения) на звената и масите на съответните сервомотори намаляват (от основата към хващача), както и вида на задвижващите трансмисии, за да се получава добра *НСУ*, известна още като *декуплираност на задвижването* и свързана с *обобщена диагонално доминираща матрица* (ОДДМ). Това е в съответствие и с изискването за якост/товароносимост (както е при конзолните греди).

Установено е, че реинженерингът на универсални роботи има огромен ресурс, тъй като годишно на вторичния пазар се появяват над 80 000 робота, които могат след модернизиране да се насочат в множество други специфични области и индустрии.

За целите на реинженеринга на индустриални универсални роботи у нас могат да се използват продуктите на германската фирма „*АМК“ GmbH*, както и на фирма „*Електроинвент“ ЕООД - България.*

1.6.5. Подбор на индустриален робот за реинженеринг

Определени са критериите, по които да се извършва избор на подходящ за реинженеринг типопредставител на *ИУР*.

А. Механична система

- основни параметри: геометрични и масово-инерционни данни; кинематична структура и брой степени на подвижност (свобода);
- ограничения: якостни и *ОДДМ* условия;
- ниво на *НСУ*.

Б. Задвижваща система

- основни параметри: маса и разположение на моторите и редукторите;

- ограничения: якостни и *ОДДМ* условия;
- ниво на *НСУ*.

В. Управляваща система
- основни параметри и коефициенти на усилване;
- ограничения: изисквания за точност и големини на смущаващите въздействия;
- използвана енергия, енергийни загуби в двигателите.

Г. Сензорна система
- основни параметри: устойчивост на смущения, точност на обратна връзка;
- ограничения: *IP* защита;
- надеждност.

Посочено е, че реинженерингът е целесъобразен, ако чрез него се постига конкретен функционален и икономически ефект – цел, която си е поставил потенциалният потребител - *фирма „Спесима“ ООД* с идеята за реинженеринг на *ИУР* за бъдещото им индустриално приложение като екстрактори за обслужване на машини за леене под високо налягане в класа от 1100 до 2500 тона затварящо усилие. Това се дължи на факта, че фирмата е с традиции по отношение на специализираните роботи за обслужване на леярски машини за отливане на детайли от алуминий, цинк и магнезий. Също така се планира ползването на роботи *KUKA* за роботизация на дъговото заваряване.

При избора на подходящ типопредставител на първо място е необходимо да се установи за кой клас индустриални роботи реинженерингът е най-ефективен. Както беше посочено те се подразделят на *специални*, *специализирани* (целеви) и *универсални* (многоцелеви). Установено е, че според функционалните възможности на индустриалните роботи, които зависят предимно от степените им на подвижност (степени на свобода) и от типа на системата за управление, ***предимството безспорно е на индустриалните универсални роботи***, които разполагат и с адаптивно управление.

От направения анализ се установи, че множеството на индустриалните универсални роботи значително се ограничава, ако бъде определена тяхната структура. Множеството изследвания върху съществуващите индустриални роботи показват една явна тенденция към ***налагане на роботите с антропоморфни структури***, независимо от по-големите трудности при тяхното управление. Това се дължи преди всичко на конструктивните, технологичните и експлоатационните предимства на *R-двоиците* пред *P-двоиците*.

Друг важен критерии за избор на подобен типопредставител е ценовото съотношение между специалните, специализираните и универсалните индустриални роботи, което е 1:2:3 при приблизително равни други условия. Като се вземе предвид, че реинженерингът на едно индустриално изделие е толкова по-ефективен, колкото по-скъпа е неговата първоначална цена, то значително по-високата цена на универсалните индустриални роботи от тази на специализираните и особено от тази на специалните индустриални роботи, се стига до извода, че и по ценови критерий ***най-ефективен е реинженерингът на индустриални универсални роботи с антропоморфна структура***. Освен това индустриалният реинженеринг на тези роботи разкрива възможности за екологичен, енергоефективен и иновативен бизнес, което кореспондира с новите тенденции в индустрията.

От статистиката, показана на *фиг. 56* е видно, че над 50% от *ИУР* се внедряват в автомобилостроенето, което е изключително комплициран отрасъл, при който нормите за сигурност и надеждност, сервизно обслужване и др. са най-строги. Средно на всеки 5 до 7 години автоматизираните линии за производство на автомобили се подменят с нови, независимо от това в какво състояние се намира оборудването. Това предопределя първоначалното индустриално приложение на *ИУР*, към което се насочи изборът на подходящ типопредставител за целите на изследването. Установи се, че реинженерингът на този тип *ИУР* е особено целесъобразен, тъй като по принцип те са запазили в голяма степен своята функционална годност, особено като механична конструкция. Един съвременен индустриален робот има високотехнологични алуминиеви отливки, прецизни редуктори, серводвигатели и др., които са годни за употреба в реинженерингови роботи, предназначени за отрасли като металургия, машиностроене, химическа индустрия, складово стопанство и още много други отрасли.

1.6.5.1. Избор на конкретен индустриален универсален робот

След посочените съображения и критерии изборът на подходящ типопредставител на *ИУР* се свежда до определяне на фирма производител на *„универсални антропоморфни“* роботи за автомобилостроенето.

Съобразно критерии като отдалеченост на месторазположението на фирмата, годишна продукция, членство в *ЕС*, традиционно добри взаимоотношения и критерии, свързани с параметрите и качествата на вече излезлите от първична употреба индустриални роботи, се счита, че най-подходящ за реинженеринг при нашите условия е един от най-разпространените представители на тази гама универсални роботи – роботите ***KUKA,*** произведени и използвани масово в автомобилната индустрия на Германия. Изводите, методиките и верификацията за реинженеринг на универсални роботи на този производител са валидни и за други модели с еквивалентна *„антропоморфна“* структура и шест степени на подвижност (три за преместване на обекта в пространството и три за неговата ориентация).

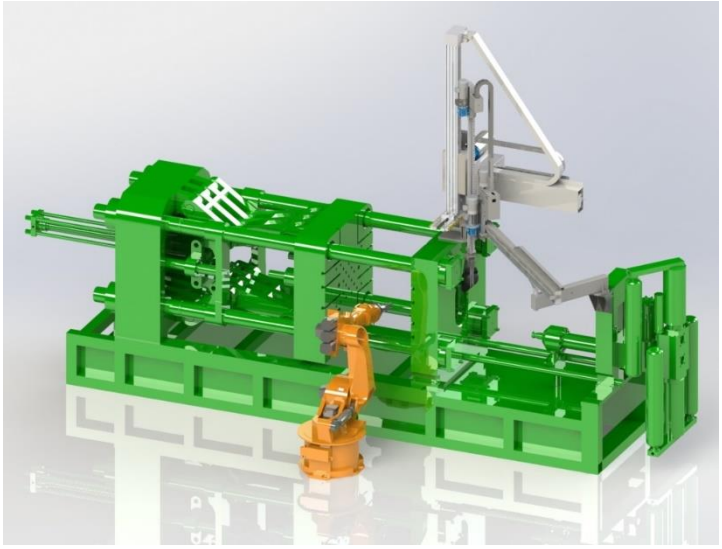
Избираме типопредставител на *ИУР,* масово използван в автомобилостроенето - роботът *KR150* на германската фирма *KUKA*, с товароносимост 150-200 кг. Този робот струва средно около 100 хиляди евро, а на вторичния пазар може да се намери на 15 пъти по-ниска цена. Роботът е с маса от 1300 кг., която включва високотехнологични алуминиеви отливки, шест двойно–циклоидни редуктора, шест синхронни безчеткови високомоментни ел. двигатели, снабдени с резолвери за обратна връзка и положение и др. Ако един такъв робот след 5 до 7 години експлоатация в автомобилостроенето бъде внедрен, след съответна технологична адаптация, в металургичното производство например, веднага може да се определи икономическият ефект от реинженеринга. Стойността на 1 кг. високотехнологична алуминиева отливка в Европа е около 3-4 евро, стойността на един двигател от този тип, заедно със сензорите за обратна връзка, достига до 3–4 000 евро, останалите механични и електрически компоненти формират общо себестойност от около 50 000 евро, които могат да бъдат спестени без каквито и да е вредни въздействия върху околната среда. Това води до икономия на материални ресурси, транспортни и логистични разходи.

В заключение може да се обобщи, че най-подходящият *ИУР* за рециклиране е роботът *KUKA KR150* на германската фирма *KUKA*, тъй като отговаря на поставените изисквания за: функционални възможности; антропоморфна структура; степени на подвижност;

пространствени движения; параметри на механичната и на задвижващата система; товароносимост; елементите на управляващата система; типа на управления; точността на позициониране и повторяемост.

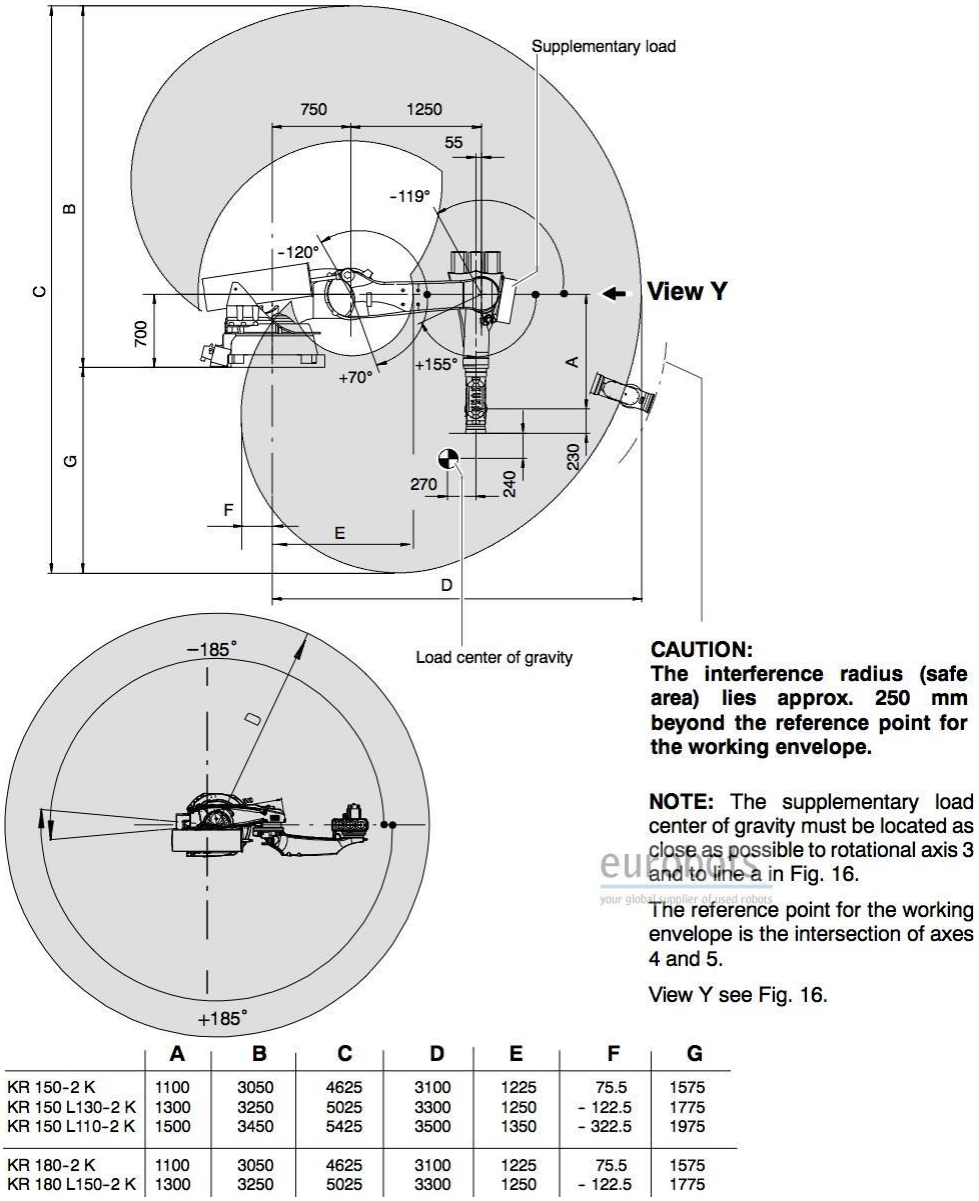
Като основание за избор на модел на *ИУР* за реинженеринг са посочени още: възможното приложение на робота за обслужване на хоризонтални машини за леене под налягане от тежък тип (*фиг. 54*), териториалната близост (Германия) на фирма *KUKA* и добрите взаимоотношения с други фирми от Германия – член на ЕС.

От *фиг. 55* и *фиг. 56* е видно, че индустриалния робот *KUKA тип KR150*, отговаря на структурните, геометричните и други функционални изисквания към *ИУР* за реинженриг.



Фиг. 54 Приложение на индустриален робот *KUKA* за обслужване на леярска машина 1100 т

Фиг. 55 Индустриален робот *KUKA*



	A	B	C	D	E	F	G
KR 150-2 K	1100	3050	4625	3100	1225	75.5	1575
KR 150 L130-2 K	1300	3250	5025	3300	1250	- 122.5	1775
KR 150 L110-2 K	1500	3450	5425	3500	1350	- 322.5	1975
KR 180-2 K	1100	3050	4625	3100	1225	75.5	1575
KR 180 L150-2 K	1300	3250	5025	3300	1250	- 122.5	1775

Фиг. 56 Работна зона на универсален робот *KUKA*

Изводът е, че е възможно реализирането на интелигентен подход за реинженеринг на подбрани индустриални роботи. Ще се запазват годни главно механични компоненти на роботите. Ще е нужна модернизация на хардуерната и софтуерната им част. За тази цел ще се извършат проучвания за производители на продукти, подходящи за използване при реинженеринг на *ИУР*.

1.6.5.2. Продукти на фирми, подходящи при реинженеринг на *ИУР*

Продукти на *фирма AMK GmbH,*

Тук са разгледани сервозадвижванията на германската фирма *AMK GmbH*, които включват серводвигатели и сервоуправления за тях. Това са основно променливотокови синхронни и асинхронни серводвигатели и цифрови сервоуправления за тях, допълнени с контролери за управление на движението (*motion controller*) и висококоростни цифрови интерфейси.

Продукти на фирма *Електроинвент ЕООД*

Тук следва да се посочи, че фирма *Електроинвент ЕООД* има дългогодишен опит в разработването и производството на инвертори за управления на сервозадвижвания. Фирмата е разработила и внедрила в производство няколко гами постояннотокови сервозадвижвания

(сервозадвижвания за окомплектоване с постояннотокови ел. двигатели). Те са класифицирани в зависимост от:

- начина на реализиране на силовия блок: транзисторни и тиристорни;
- реализиране на контрола – аналогови и цифрови.

Основно тези инвертори се окомплектоват с произвежданите в България постояннотокови електрически двигатели, с постоянни магнити за сервозадвижвания (аналози на двигатели *Fanuc – Model 0, Model 5, Model 10,Model 15, Model 20, Model 25, Model 30*, както и на български електрически двигатели от сериите *PI, 3PI, MBH, MT, MX*).

Изброени са техните предимства:

- възможност за лесно регулиране на двигателите в широк диапазон на скоростта – 1:5000 до 1:10000;
- възможност за работа при много ниски обороти, без допълнително охлаждане;
- възможност за петкратно претоварване по момент, което определя добри параметри на комплектното сервозадвижване.

Недостатъци:

- наличието на постоянни магнити (за този период основно феритни магнити) обуславя необходимост от технология за производство на двигателите;
- двигателите с постоянни магнити изискват прецизно управление от електронния преобразувател и лимитиране (ограничаване) на максималния ток, тъй като превишаването на максимално допустимия ток, може да доведе до размагнитване на постоянните магнити;
- наличието на колектор понижава надеждността на системата и изисква експлоатационна поддръжка и обслужване.

Изводът е, че изборът на подходящ серводвигател е много важен етап при проектирането на машината или робота. Трябва точно и ясно да се прецизират конкретните изисквания към него, както и към сервозадвижването като цяло. Трябва да се определят и основните параметри на работа, като номинален момент (мощност), режим на работа, максимална/минимална скорост, динамични характеристики и претоварване по време на преходни процеси. По този начин е решено да се определят параметрите на необходимите за изпълнението на изследването двигатели – кратност на пусковия ток (момент), пусков и максимален момент, инерционен момент, максимална скорост и т.н.

За избор на серводвигател са определени следните условия и изисквания:
- условие за съответствие с искания номинален и максимален момент, удовлетворяващ изискванията за претоварване по ток (момент);
- номинална/максимална скорост – този параметър определя до голяма степен производителността на машината, като е един много важен показател за всички металорежещи машини и роботи, работещи в автоматизирани линии;
- подходящ инерционен момент – обуславя бързодействието на системата и възможността за бърза смяна на режимите на работа;
- определяне на режимите на работа на двигателя, като част от цялата машина или робот, с цел оптимизиране на неговия избор;
- определяне на необходимите датчици за скорост и/или позиция.

Поставени са няколко основни проблема за решаване във връзка с използването на инвертори и сервозадвижвания за реинженеринг на индустриални роботи:

- възможност за работа с различни двигатели (произведени от различни производители, но с аналогични технически показатели);

- оптимизиране на силовия *IGBT* блок, с цел постигане на по-високи претоварвания и намаляване на топлинните загуби;
- възможност за надеждна работа с различни датчици за позиция (енкодер, резолвер и тахогенератор);
- разширяване на възможностите за дистанционен мониторинг и контрол;
- възможност за автоматична настройка на параметрите в реално време за оптимален режим на работа;
- разширяване на интерфейсните и комуникационни възможности на инверторите;
- изследване и подобряване на системите за охлаждане както на самите инвертори, така и на цялата система на индустриалните роботи;
- подобряване на шумоустойчивостта на инвертора за работа в тежки експлоатационни условия;
- механичен дизайн на преобразувателя, позволяващ удобен монтаж в таблото за управление на избрания типопредставител на *ИУР*, както и възможност за компановане и асемблиране на управление на няколко оси.

Изводът е, че от изключителна важност за разработването на сервозадвижванията и съчетаването на редица фактори, като мощност, компактни габарити, универсално захранващо напрежение и използвани силови полупроводникови елементи, се явява проблемът на топлоотдаването.

1.7. Цел и задачи на дисертационната работа

Основна цел на дисертационния труд е:

„Реинженеринг на индустриални универсални роботи (ИУР) втора употреба чрез реновиране на механиката, изграждане на нови електроника и софтуер, тестване на роботизираната система и внедряване в нови индустриани приложения”.

За изпълнение на целта ще се решат следните задачи:

1. Обзор, анализ и систематизация на мехатронни роботизирани системи
2. Подбор на типопредставител на ИУР за реинженеринг
3. Изследване на механиката, електронката и софтуера на *ИУР*
4. Създаване на методики за изследване на *ИУР*
5. Създаване на концепция за цялостен реинженеринг на избрания *ИУР*
6. Изграждане, тестване и верификация на модернизирания *ИУР*

2. Изследване на механика, електроника и софтуер на *ИУР*

Съгласно заложените цели и поставените задачи се определят кинематичните и динамичните характеристики на избрания типопредставител на *ИУР (индустриален универсален робот)*, обект на реинженеринга.

Дейностите тук определят метричните и кинематичните параметри на механичната конструкция на избрания типопредставител. За целта са изследвани видът и предавателните отношения на редукторите, използваните съединения, масла и греси. На база *МКЕ (метод на крайните елементи)* е изследвана и динамиката на робота – типопредставител.

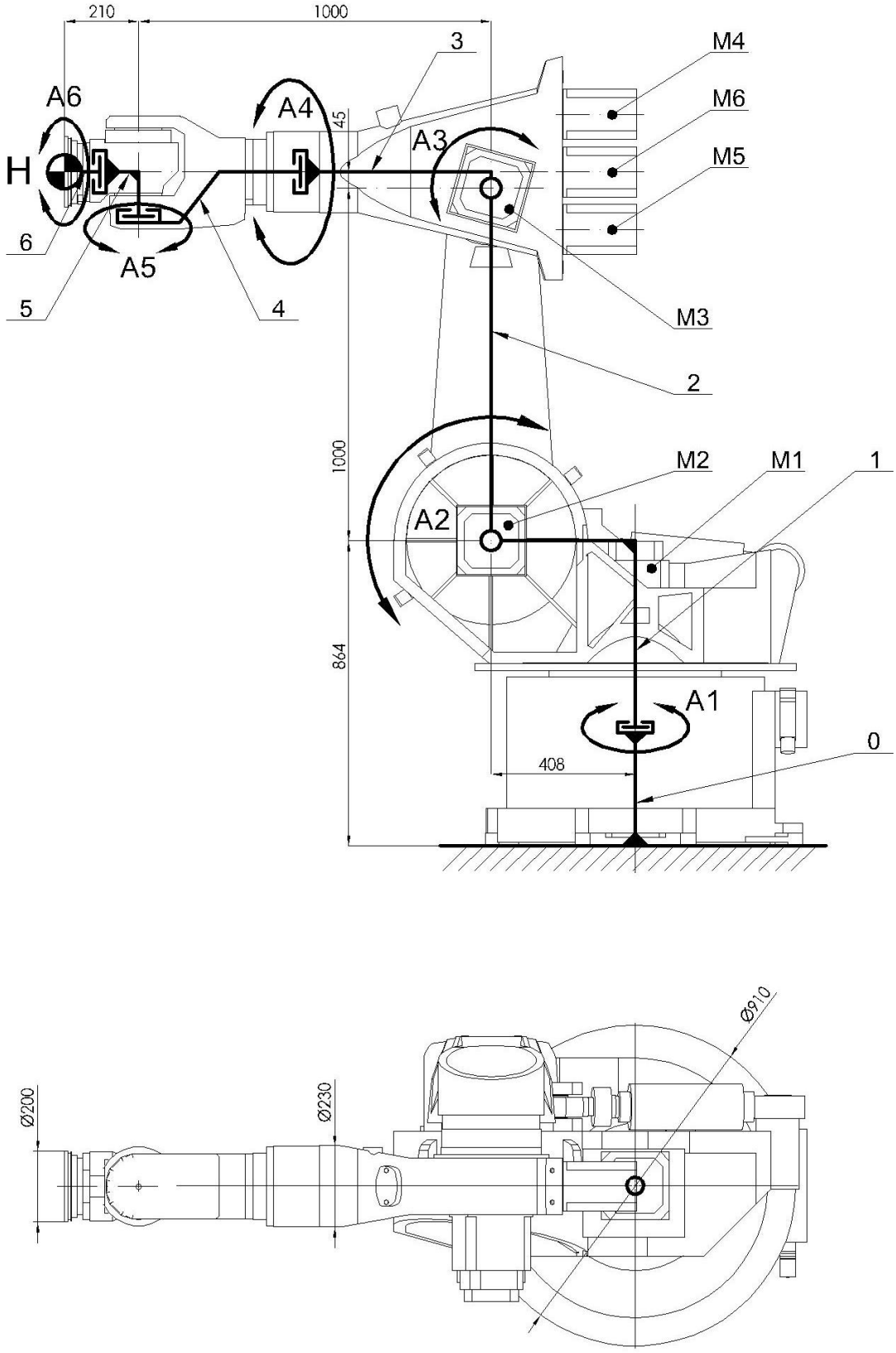
Моделът – обект на изследване - робот *KUKA KR 150* е показан на *фиг. 57*.

Фиг. 57 Общ изглед на робот *Kuka KR 150*

2.1. Метрика и кинематика на механичната конструкция на ИУР

В заложената за изпълнение дейност е фокусирано вниманието върху механичната система на робота, като основен елемент от нея е изпълнителният механизъм, осъществяващ транспортиращи и ориентиращи движения. В *ИУР* изпълнителните механизми се отличават със сравнително проста структура и гъвкаво програмиране, но имат и по-сложна управляваща система [30]. Извършените анализи в рамките на дейността са представени по-надолу в текста.

На *фиг. 58* е показана кинематичната схема на избрания типопредставител на *ИУР - KUKA KR 150*. От схемата се вижда, че е от антропоморфен тип с шест степени на свобода (три за преместване на обекта в пространството и три за неговата ориентация) по осите *X, Y* и *Z* на декартовата координатна система. Кинематичната структура е идентична на повечето индустриални роботи, произвеждани по света и представлява пространствена отворена седемзвенна кинематична верига, изградена само от въртящи кинематични двоици (връзки между две съседни звена) и се задвижва от шест независимо управлявани двигателя. Въртящите връзки в кинематичната схема са обозначени с буква *A* и пореден номер от *1* до *6*, а звената, които изграждат кинематичната верига, са номерирани с цифри от *0* до *6*, като с *0* е означена стойката (неподвижното звено на седемзвенната кинематична верига).



Фиг. 58 Кинематична схема, внесена в корпуса на робот *KUKA KR 150*

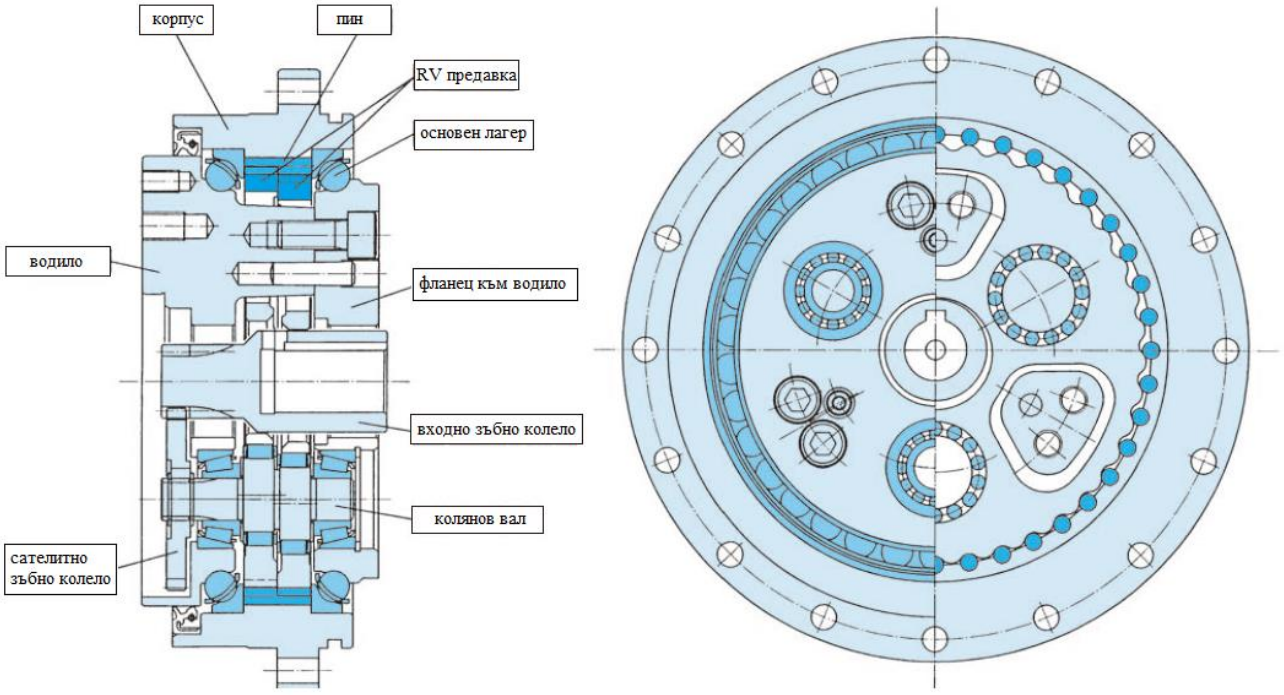
Двигателите с номера от *1* до *3* са куплирани директно към редуциращата предавка и също така директно предизвикват съответните ротации във връзките от *A1* до *A3*.

Двигателят М4 предизвиква завъртането на *звено 4* спрямо *звено 3*, като във *въртящата двоица А4* е разположена съответна редуцираща предавка, а връзката между нейния входящ вал и вала на *М4* се осъществява посредством карданен механизъм. Това движение е кинематично независимо също като предходните три, за разлика от последните две управляеми движения по *оси А5 и А6*, които са кинематично зависими от преместването на *ос 4*. Тази зависимост се поражда от факта, че корпусите (статорите) на *мотори М5 и М6* са захванати към *звено 3* и движението от тях към съответните *звена 5 и 6* се предава посредством карданни предавки, последвани от ремъчни предавки, минаващи през *звено 4*.

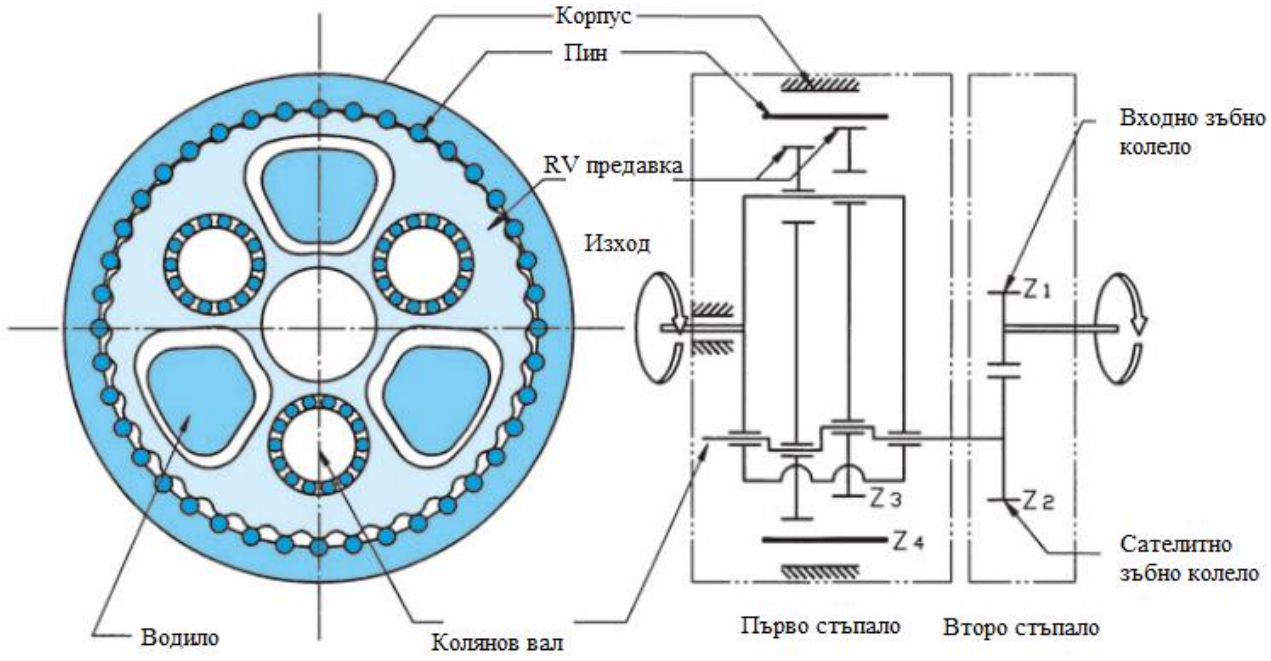
Редуциращата циклоидна предавка за задвижване на *звено 5* е разположена в самата въртяща двоица А5, като задвижването й е директно от изхода на съответната ремъчна предавка. Циклоидната предавка за задвижване на *звено 6* също е разположена в съответната *въртяща двоица А6*, но между нейния входящ вал и изходящия на съответната ремъчна предавка има допълнителна зъбна предавка с конусни зъбни колела, с цел да се предаде движението в перпендикулярно направление.

Тези кинематични зависимости в движенията на *оси 5 и 6* от движението на *ос 4* и в движението на *ос 6* от *ос 5*, биха могли да бъдат компенсирани, чрез взаимно свързано и синхронизирано движение между тях. Това би могло да се постигне с едно съвременно, интелигентно управление на *трите двигателя М4, М5 и М6*. Въпреки усложненото задвижване на тези три кинематично свързани движения и сравнително сложното реализиране на предаване на движение през едно или две подвижни звена, то е оправдано, заради следните предимства: изнасяне на двигателите и свързаните с тях захранващи и сигнални кабели далече от работния орган на универсалния робот; отпадат затрудненията по прекарване на кабели през *въртящите двоици А4, А5 и А6*; преразпределяне на масите, така че масовите центрове на *звена 4, 5 и 6* да се доближат максимално към *въртящата двоица А3*, с което се облекчават задвижванията на *оси 1, 2 и 3*.

Обща конструктивна схема и кинематична схема на използваните редуктори в модела *KR 150* на фирма *KUKA* са показани на *фиг. 59* и *фиг. 60* [74].



Фиг. 59 Обща конструкция на използваните редуктори в модела *KR 150*



Фиг. 60 Кинематична схема на използваните редуктори от модела *KR 150*

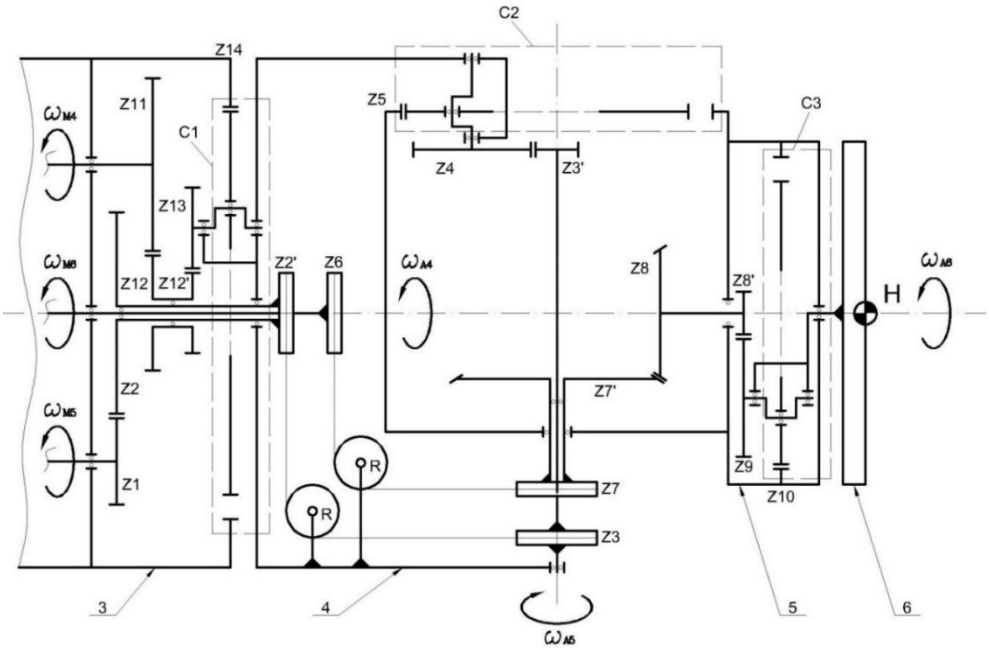
Използваните в предавателните механизми редуктори са на фирма *Nabtesco* от *тип RV*. За задвижване на *оси 1, 2 и 3* се използват редуктори от *модела RV-320E*, а за *оси 4, 5 и* 6 - редуктори от *модела RV-80E*. Общи параметри от производителя са показани в *табл. 2* [74].

Таблица 2 Технически характеристики на редукторите на фирма *Nabtesco* от *серия Е на прецизните предавки тип RV*, използвани в *KUKA KR 150*

Output speed (r/min)			5		10		15		20		25		30		40	
Model	Speed ratio		Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity	Output torque	Input capacity
	Shaft rotation	Case rotation	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW	Nm (kgf-m)	kW
RV-80E	57	56	1,088 (111)	0.76	885 (90.3)	1.24	784 (80.0)	1.64	719 (73.4)	2.01	672 (68.6)	2.35	637 (65.0)	2.67	584 (59.6)	3.26
	81	80														
	101	100														
	121	120														
	*1 (153)	*1 (152)														
RV-320E	81	80	4,361 (445)	3.04	3,538 (361)	4.94	3,136 (320)	6.57	2,881 (294)	8.05	2,695 (275)	9.41	2,548 (260)	10.7		
	101	100														
	118.5	117.5														
	129	128														
	141	140														
	171	170														
	185	184														

Редукторите използвани за *оси 1, 2 и* 3 са от стандартната серия на *Nabtesco RV-320E-185* с предавателно отношение *185*. Редуциращите предавки за *ос* 5 и *ос* 6 са от стандартен тип *RV-80E*, като за *ос 5* има предавателно отношение *101*, а за *ос 6* е съответно *81*. В предавката за *ос 4* се използва второто (циклоидното) стъпало, показано във *фиг. 30* на стандартната предавка от тип *RV-80E*, а първото стъпало (планетната зъбна предавка) е видоизменено, според конструктивните изисквания на фирма *KUKA*.

На *фиг. 61* е показана кинематичната схема на зъбните предавки, чрез които се реализира прехвърлянето на ротациите от *моторите M4, M5 и M6* към *съответните звена (4, 5 и 6)* и *оси (A4, A5 и A6)* на универсалния робот.



Фиг. 61 Кинематична схема на предавателните механизми и ротации на *KUKA KR 150*

Двигателят M4 през карданен механизъм предава въртеливо движение към *зъбно колело Z11*, което е зацепено със *зъбно колело. Z12*, образуващо *зъбен блок със Z12'*. *Зъбните колела Z12' и Z13* са зацепени едно към друго и образуват входното стъпало на една епициклична предавка, в която участва и *циклоидната предавка C1*, със *Z14* на брой пинове на циклоидния венец. Предавателното отношение на една циклоидна предавка е равно на броя на пиновете и това отношение може да бъде *от 20 до 200*. Общото предавателно отношение на предавката, свързваща *M4* и завъртането на *ос A4*, се пресмята по следната формула:

$$i_{\mathrm{M4\,A4}} = \frac{-Z_{12}}{Z_{11}.Z_{12'}}.(Z_{12'} + Z_{13}.Z_{14}),$$

от където може да се определи ъгловата скорост

$$\omega_{\mathrm{A4}} = -\omega_{M4}.\frac{Z_{11}.Z_{12'}}{(Z_{12'}+Z_{13}.Z_{14}).Z_{12}}.$$

Конкретно за избрания универсален робот *KR 150* това предавателно отношение е $i_{\mathrm{M4\,A4}} = -109$

Задвижването на *пета ос A5* се извършва, като ротацията от *двигател M5*, през карданен механизъм се предава на *зъбно колело Z1*, което е зацепено със *зъбно колело Z2*. От *Z2* през зъбно-ремъчната предавка, съставена от *зъбни колела Z2' и Z3*, ротацията се предава към *зъбната двойка Z3' и Z4* и свързаната с нея *циклоидна предавка C2* със *Z5* на брой пинове на венеца.

Общото предавателно отношение на предавката, свързваща *M5* и завъртането на *ос 5*, при положение, че не се движи *ос 4*, се пресмята по следната формула:

$$i_{\mathrm{M5\,A5}} = \frac{Z_2}{Z_1}.\frac{Z_3}{Z_{2'}}.\frac{Z_4}{Z_{3'}}.Z_{5.}$$

Конкретно за избрания универсален робот *KR 150* това предавателно отношение е $i_{\mathrm{M5\,A5}} = 100.$

Както беше споменато, завъртането на *ос 5* е зависимо не само от *двигателя M5*, но и от завъртането на *ос 4*. Тази зависимост е следната:

$$\omega_{\mathrm{A5}} = \frac{Z_{2'}}{Z_3}.\frac{Z_{3'}}{Z_4.Z_5}.\left(\omega_{M5}.\frac{Z_1}{Z_2} + \omega_{A4}\right).$$

Тъй като ω_{A4} е около *100 пъти* по-малка от ω_{M5} , то за неотговорни движения е възможно да се пренебрегне влиянието на завъртането на *ос 4* върху ротацията на *ос 5*.

Задвижването на *шестата ос A6* се извършва, като ротацията от *двигател M6*, през карданен механизъм се предава директно на зъбно-ремъчна предавка, съставена от *зъбни колела Z6 и Z7*. Чрез зъбно-ремъчната предавка движението се предава през *конусната зъбна*

двойка Z7′ и Z8 към входното стъпало, съставено от *Z8′* и *Z9* на епицикличната предавка и свързаната с нея циклоидна предавка *C3* с *Z10* на брой пинове на венеца.

Общото предавателно отношение на предавката, свързваща *M6* и *ос A6* при положение, че не се движат *оси 4 и 5*, се пресмята по следната формула:

$i_{\text{M6 A6}} = \frac{Z_7}{Z_6}.\frac{Z_8}{Z_{7'}}.\frac{Z_4}{Z_{8'}}.(Z_{8'} + Z_9.Z_{10}).$

Конкретно за избрания универсален робот *KR 150* това предавателно отношение е $i_{\text{M6 A6}} = 76.$

В действителност завъртането на *ос 6* е зависимо не само от *двигателя M6*, но и от завъртането на *осите 4 и 5*. Тази зависимост е следната:

$\omega_{\text{A6}} = \frac{Z_{7'}}{Z_8}.\frac{Z_{8'}}{(Z_{8'}+Z_9.Z_{10})}.\left((\omega_{M6} - \omega_{\text{A4}}).\frac{Z_6}{Z_7} - \omega_{A5}\right).$

Тъй като ω_{A4} и ω_{A5} са около *100 пъти* по-малки от ω_{M6} , то за неотговорни движения е възможно да се пренебрегне влиянието на завъртането на *оси 4 и 5* върху това на *ос 6*.

Другите три независими движения по *оси 1, 2 и 3* на универсалния робот са реализирани, посредством сервоуправляеми двигатели и директно куплирани към тях циклоидни предавки с предавателни отношения равни на *185*.

Ос A1 може да се завърта от *+185° до -185°, ос A2* може да се завърта от *+93° до -40°* и *ос A3* от *+58° до -210°*. *Осите A4 и A6* могат да извършват пълни завъртания на *360°* , а *ос A5* извършва ротация на *±125°*.

Към електромеханичната система на робота има добавена и една хидростатична система, служеща за статично и динамично разтоварване на задвижването на второто рамо на избрания *ИУР*.

За типоразмер *KR 150/2* отговарят следните размери: *A – 2866 мм, B – 3054 мм, C – 2410 мм, D – 1405 мм, E – 1005 мм, F – 1234 мм, G – 188 мм, X – 1000 мм.*

2.2. Динамични изследвания на ИУР

Бяха посочение оосновните предизвикателства пред *роботизираните системи* (*РС)* и *ИУР* в частност, които са: тяхното моделиране, параметрична идентификация, управление и оптимизация.

В текущата дейност беше представено изследване на динамичен модел за манипулационни *РС*. Като типичен техен представител беше разгледан избраният и изследван модел – универсален индустриален робот *KUKA KR 150* с шест степени на свобода. Основната функция на такива *РС* е да могат да преминават от една конфигурация в друга, затова от особена важност за тях е да могат да бъдат управлявани прецизно, по всяка една от осите, с помощта на децентрализирани контролери.

Целта на изследването е използвайки общите физически принципи, да се намерят структурите на пълните динамични модели, които са подходящи и за двете цели: точна идентификация на параметрите и оптимално проектиране на управлението.

2.2.1. Структура на динамичния модел

Структурата на динамичния модел е зададена в описанието на дейността по-долу.

Определени са набор от променливи *q,* които най-добре характеризират динамичните показатели на универсалния робот в търсеното задание за движение. Променливите са независими една от друга, като броят им е равен на действителния брой на степените на свобода. За да се даде възможност на *УР* да изпълни необходимите задания за движение, съответните задвижващи усилия *u* (управленията), бяха коректно определени.

Прилагайки формализма на Лагранж, динамичното поведение се описа, чрез следната система от диференциални уравнения:

(1) $M(q)\ddot{q}=F-v(q,\dot{q})-g(q),$

където *M(q) – инерционна матрица, v(q,q̇) - центробежни и Кориолисови сили, g(q) – гравитационни сили, F - вектор на задвижващите сили/моменти.*

В практиката се използва следният опростен модел за двигателите:

(2) $F_i = -m_i\ddot{q}_i - c_i\dot{q}_i + g_i u_i$, $i = 1...n$,

с коефициенти, определящи физическите характеристики на двигателите.

Според формализма на Лагранж и втория закон на Нютон при ротация се използва:

$$I\ddot{\theta} = T$$

Принципът на виртуалната работа е използван за съставяне на статични и динамични уравнения за механични системи. Принципът обхваща система от уравнения, равна като брой на степените на свобода на изследваната механична система, в случая антропоморфен шестосен *ИУР*, с основна цел да се опише със системен подход движенията на системата (робота) [33]. Прилагайки принципа на виртуалните работи се получава следната система от уравнения:

$$\delta W_{ineriaforces} = \delta W_{appliedforces},$$

$r = r(q,t)$, q – *генерализирани координати* - за ъглите в ставите.

$$\delta W_{ineriaforces} = \int_V \rho \ddot{r}^T \delta r\, dV = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q}\delta q\, dV = (\int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q}\, dV)\delta q = Q^T_{inertiaforce}\delta q$$

$$Q^T_{inertiaforce} = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q}\, dV = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}}\, dV =$$

$$\int_V \rho \frac{d}{dt}(\dot{r}^T \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}})\, dV - \int_V \rho^T \dot{r}^T \frac{d}{dt}(\frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}})dV =$$

$$\frac{d}{dt}(\int_V \rho \frac{\partial}{\partial \dot{q}}(\dot{r}^T \dot{r})\, dV - \int_V \rho^T \dot{r}^T (\frac{\partial \dot{r}}{\partial q})dV =$$

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}})^T - (\frac{\partial T}{\partial q})^T = Q^T_{activeforce},$$

$Q^T_{inertiaforce}, Q^T_{activeforce}$ - резултантни сили приложени в ставите

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}) - (\frac{\partial L}{\partial q}) = Q_{activeforce},$$

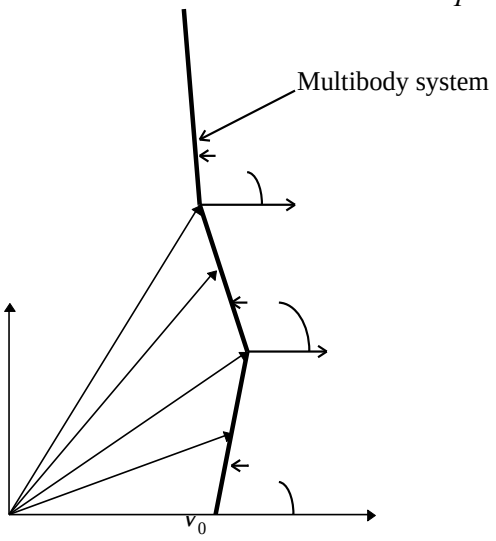
$L = T - U$,

$$A_i = \begin{bmatrix} \sin q_i & \cos q_i \\ -\cos q_i & \sin q_i \end{bmatrix},$$

$$\vec{r}_i = \vec{v}_{i-1} + A_i[0, r_i]^T,$$

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{i-1} + A_i[0, l_i]^T = \vec{v}_0 + \sum_{j=1}^{i} A_j[0, l_j]^T.$$

Пример за приложението на принципа на виртуалната работа за системата от взаимосвързаните второ и трето звено на *KUKA* е показан на *фиг. 62*.



Фиг. 62 Пример за приложението на принципа на виртуалната работа за системата от взаимосвързаните второ и трето звено на *KUKA*

За преместванията се използват уравенията:

$$\vec{v}_0 = [x_0, y_0]^T,$$

$$\vec{r}_1 = [x_0 + r_1\cos q_1,\ y_0 + r_1\sin q_1]^T,\quad \vec{v}_1 = [x_0 + l_1\cos q_1,\ y_0 + l_1\sin q_1]^T,$$

$$\vec{r}_2 = [x_0 + l_1\cos q_1 + r_2\cos q_2,\ y_0 + l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2]^T.$$

За скоростите на масовите уравнения се използват следните уравнения:

$$\dot{\vec{r}}_1 = [-r_1\dot{q}_1\sin q_1,\ r_1\dot{q}_1\cos q_1]^T,$$

$$\dot{\vec{r}}_2 = [-l_1\dot{q}_1\sin q_1 - r_2\dot{q}_2\sin q_2,\ l_1\dot{q}_1\cos q_1 + r_2\dot{q}_2\cos q_2]^T.$$

Прилагайки формализма на Лагранж се получава (*L=K–P)*:

$$\begin{aligned} L =\ & 0.5m_1\{(r_1\dot{q}_1\sin q_1)^2 + (r_1\dot{q}_1\cos q_1)^2\} + 0.5I_1(\dot{q}_1)^2 \\ & + 0.5m_2\{(l_1\dot{q}_1\sin q_1 + r_2\dot{q}_2\sin q_2)^2 + (l_1\dot{q}_1\cos q_1 + r_2\dot{q}_2\cos q_2)^2\} + 0.5I_2(\dot{q}_2)^2 \\ & - m_1 g r_1\sin q_1 - m_2 g(l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L =\ & 0.5m_1(r_1\dot{q}_1)^2 + 0.5I_1(\dot{q}_1)^2 \\ & + 0.5m_2\{(l_1\dot{q}_1)^2 + (r_2\dot{q}_2)^2\} + m_2 l_1\dot{q}_1 r_2\dot{q}_2\cos(q_2 - q_1) + 0.5I_2(\dot{q}_2)^2 \\ & - m_1 g r_1\sin q_1 - m_2 g(l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2). \end{aligned}$$

Работата на външните сили W е:

$$W = T_1 q_1 + T_2(q_2 - q_1).$$

С уравненията на Лагранж се получава:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial q_1}W = T_1 - T_2 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_1}L\right) - \frac{\partial}{\partial q_1}L =\ & \ddot{q}_1\{m_1(r_1)^2 + m_2(l_1)^2 + I_1\} + \ddot{q}_2 m_2 r_2 l_1\cos(q_2 - q_1) \\ & - m_2 r_2 l_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_1)\dot{q}_2\sin(q_2 - q_1) + m_1 g r_1\cos q_1 + m_2 g l_1\cos q_1 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2} W = T_2 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_2} L\right) - \frac{\partial}{\partial q_2} L = \ddot{q}_2 \{m_2 (r_2)^2 + I_2\} + \ddot{q}_1 m_2 r_2 l_1 \cos(q_2 - q_1)$$
$$- m_2 r_2 l_1 \dot{q}_1 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) \sin(q_2 - q_1) + m_2 g r_2 \cos q_2 .$$

2.2.2. Подход за идентификация на параметрите

В настоящото изследване е използван детерминистичен подход за идентификация на параметрите, който е разширение на подхода, разработен в [24, 26]. Процесът на идентифициране е по-прецизен и по-ефикасен, след оценка на параметрите стъпка по стъпка, в съответствие с реда на входно-изходните релации в изследвания *УР*: управляващ вход (напрежение или ток), задвижваща сила, ускорение, скорост и преместване. Така общото задание за идентификация се разделя на поредица от няколко по-прости идентификационни задачи за динамичните модели *(1)* и *(2)*. Съответните процедури използват параметрите, определени в предходните стъпки и само един управляващ вход може да се прилага във всеки идентификационен тест [56]. По този начин, номиналните модели се опростяват значително и грешките при идентификация могат да се намалят в максимална степен. Така предложеният подход позволява прецизно определяне на всички основни динамични параметри.

Особено важна роля в решаването на проблемите за оптимално проектиране на *УР* и тяхното управление играе предавателната матрица $A = M^{-1}$ [24]**.** Нейните елементи се определят от следните уравнения:

$$\begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \ddot{q}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} \ldots A_{1k} \ldots A_{1n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ A_{n1} \ldots A_{nk} \ldots A_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ . \\ u_k \\ . \\ 0 \end{pmatrix}$$

Предлаганият подход за системна идентификация на *УР* е свързан с подход за директен синтез на управление, чрез самообучение при движения от точка до точка, [65]. Комбинацията между тези два подхода създаде предпоставка за изграждане на методика за едновременно разглеждане на взаимосвързаните проблеми на динамичното моделиране, параметричната идентификация и оптималното управление.

2.3.Изследване на хардуерната система на избрания типопредставител на ИУР

Изследването на избрания типопредставител на *ИУР - KUKA KR 150* е пряко свързано с определяне на характеристиките на управляващата система на робота. Въз основа на тези изследвания са разработени впоследствие методики за комплексно изследване на хардуера и софтуера на робота, с цел създаване на критерии, чрез които да се проверят параметрите на избрания *УР* и дали те отговарят на изискванията за бъдещото му приложение.

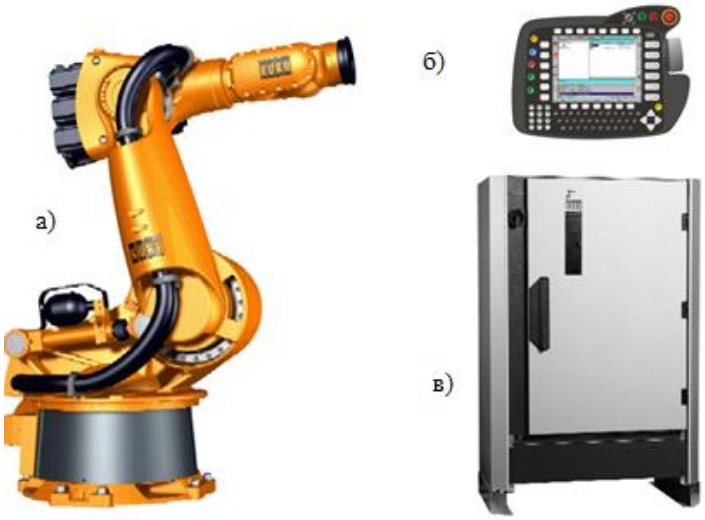
В дейностите от настоящата задача са изследвани особеностите, видът и типът на хардуерната система за управление и използваният софтуер на избрания типопредставител.

Изследвани са електрическите характеристики на двигателите, сензорите за обратна връзка и сервозадвижванията. Анализиран е математическият апарат, с който се решават правата и обратната задача на кинематиката при шестосна антропоморфна структура на робота. За целта са използвани методите на виртуалната симулация и разработените метрични и математически модели за подобен тип изследвания.

2.3.1. Изследване на хардуерната система

Изследвана е хардуерната система на избрания типопредставител на индустриални универсални роботи, което е описано детайлно по-надолу в текста.

Основните компоненти на хардуерната система са показани на *фиг. 63*.



Фиг. 63 Основни компоненти от изследваната хардуерна система на избрания типопредставител на *ИУР - KUKA KR 150*
а) серводвигатели, задвижващи основните звена на робота *(Servomotors)* б) панел за управление *(KUKA Control Panel* в) електрическо табло за управление *(Control Cabinet)*

Разгледани са детайлно всеки един от основните компоненти от *фиг. 63*.

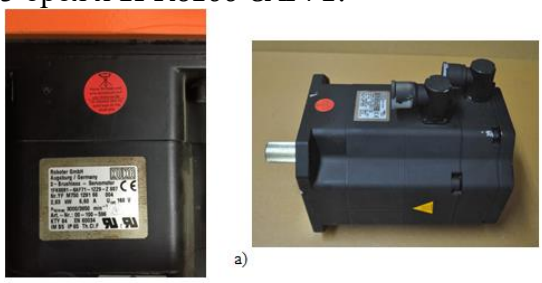
2.3.1.1. Изследване на серводвигателите, използвани в хардуерната конфигурация

В описанието е посочено, че в модела *KUKA KR 150* се използват от шест до осем сервозадвижвания, които са окомплектовани с безколекторни серводвигатели. Основните технически характеристики на серводвигателите са показани в *табл. 3*.

Таблица 3 Основни технически характеристики на серводвигателите, използвани в *KUKA KR 150*

Серия на ел. двигателите	**1FK6081- 6AF71**	**1FK6100 – 8AF91**
Тип на ел. двигателите	AC серводвигатели; Синхронни ел. двигатели с редкоземни магнити	
Номинална мощност	2,83 kW	3,77 kW
N nom/max	3000 / 3950 min -1	3000 / 4200 min -1
I nom	6,6 A	9,5 A
U ном	168 V	156 V
Момент при нулева скорост - Mo	8,0 Nm	18,0 Nm
Номинален момент - MN	6,8 Nm	12,0 Nm
Степен на защита съгласно EN 600034-5; IEC 600034-5	IP 65	
Тип на конструкцията съгласно EN 600034-7; IEC 600034-7	IM B5 (IM V1, IM V3)	
Охлаждане	Естествено (Без вентилатор)	
Датчик за скорост	Резолвер: двуполюсен / многополюсен	
Наличие на интегрирана (вградена) спирачка	Захранване : 24VDC ± 10%	
Работа при надморска височина съгласно IEC и EN 600034-1	≤ 1000 m от морското равнище – без редуциране на мощността 2000 m -редуциране на мощността с фактор 0,94 2500 m -редуциране на мощността с фактор 0,90	
Термична защита на ел. двигателя съгласно IEC и EN 60034-11	KTY 84 температурен сензор в статорната намотка	
Изолация на статорните намотки съгласно EN 600034-1; IEC 600034-1	Температурен клас F при покачване на температурата ΔT=100K при околна температура 40°C	
Ниво на звуковото налягане, max. съгласно EN 21680	70dB (A)	70dB (A)
Материал на магнитите	Редкоземни магнити	

На *фиг. 64.а* и *фиг. 64.б* са показани серводвигателите, използвани в изследвания *УР*: 3 броя х *1FK6081-6AF71* и 3 броя х *1FK6100-8AF71*.

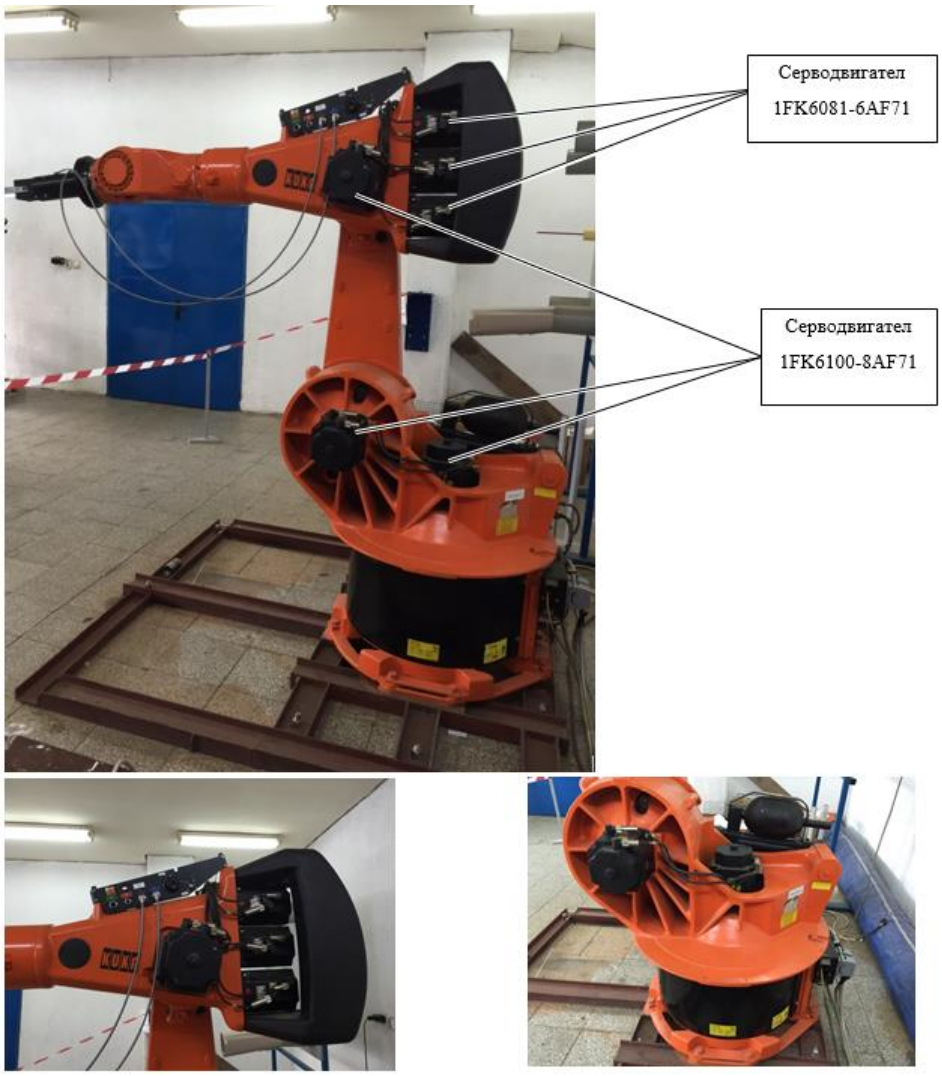


а)

б)

Фиг. 64 Серводвигатели, използвани в *KUKA KR 150*
а) серводвигател тип *1FK6081-6AF71* б) серводвигател тип *1FK6100-8AF71*

Разположението на двигателите в конструкцията на изследвания *УР* е показано на *фиг. 65*.



Фиг. 65 Разположение на двигателите в конструкцията на *KUKA KR 150*

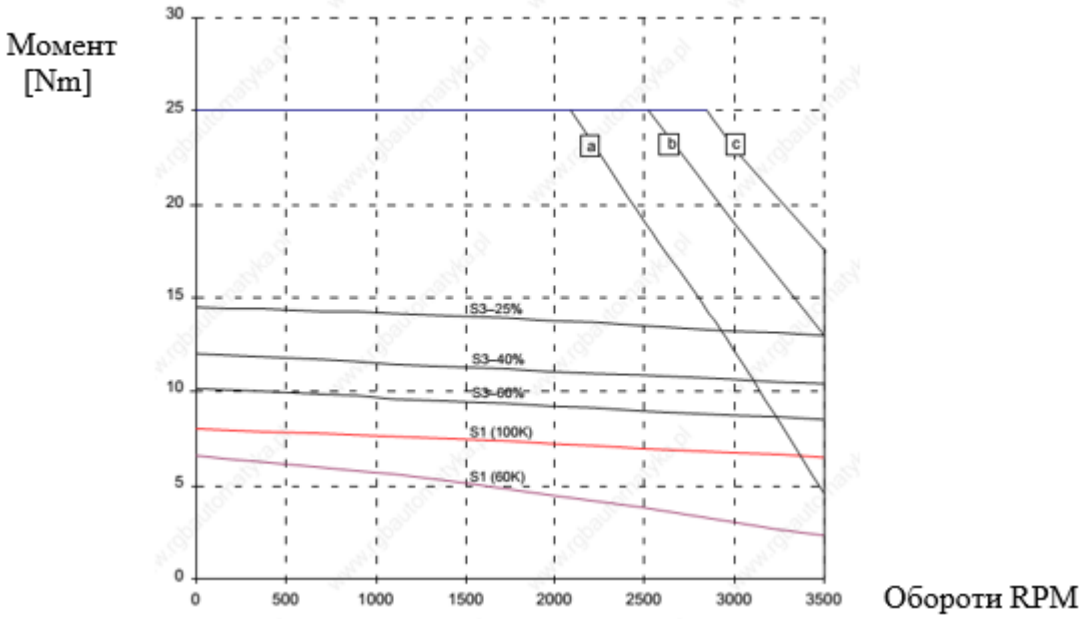
В *табл. 4* са показани характеристиките на двигателите от тип *1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71*.

Таблица 4 Технически характеристики на двигатели от тип *1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71*

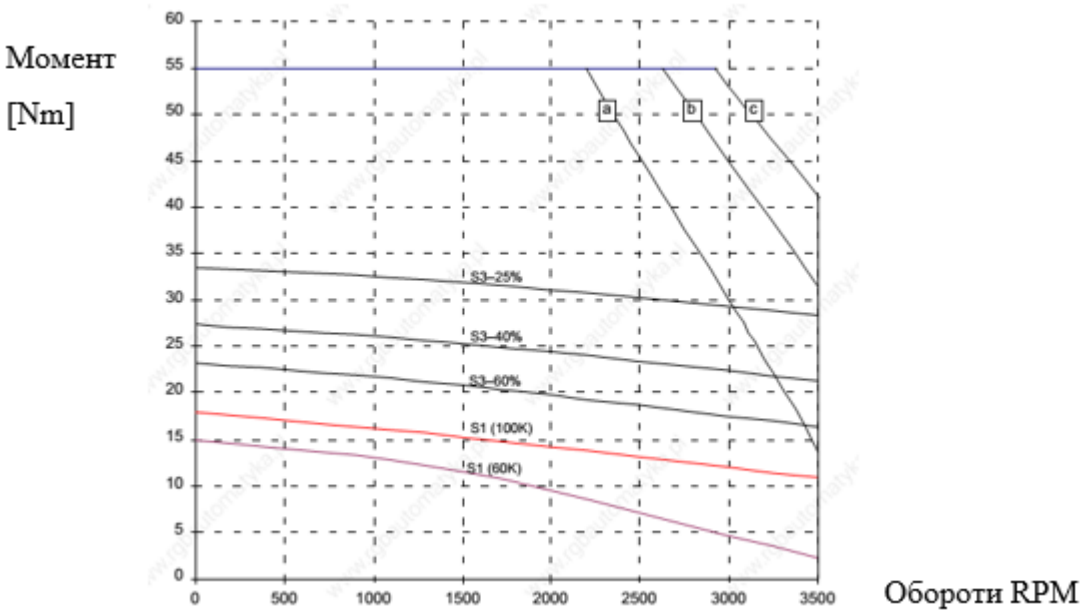
Технически параметри	**Означение**	**Димензия**	**1FK6080-6AF71 /1FK6081-6AF71**	**1FK6100-8AF71**
Номинална скорост	n_{nom}	RPM	3000	3000
Брой на полюси	2p		6	8
Продължителен момент	M_{nom}	Nm	6,8	12,0
Номинален ток	I_{nom}	A	5,2/6,6	8,4
Момент при спрял двигател (60K)	$M_{o(60K)}$	Nm	6,6/8,0	15
Момент при спрял двигател (100K)	$M_{o(100K)}$	Nm	8,0	18
Ток при спрял двигател (60K)	$I_{o(60K)}$	A	4,6	9,8
Ток при спрял двигател (100K)	$I_{o(100K)}$	A	5,8	12,2
Инерционен момент (със спирачка)	J_{mot}	10^{-4}kgm2	18,0	63,2
Инерционен момент (без спирачка)	J_{mot}	10^{-4}kgm2	15,0	55,3
Оптимална работна точка				
Оптимална скорост	n_{opt}	RPM	3000	3000
Оптимална мощност	P_{opt}	kW	2,14/2,83	3,77
Лимитирани данни				
Максимална допустима скорост (механична)	n_{max}	RPM	5600	4300
Максимален момент	M_{max}	Nm	25	55
Максимален ток	I_{max}	A	19	42
Физически константи				
Константа на момента	$к_T$	Nm/A	1,39	1,48
Константа на напрежението	$к_E$	V/1000 RPM	92	98
Съпротивление на намотката при 20°C	R_{ph}	Ohm	1,3	0,42
Индуктивност на въртящото поле	L_D	mH	10,0	3,5
Електрическа времеконстанта	T_{el}	ms	7,7	8,3
Механична времеконстанта	T_{mech}	ms	3,0	3,2
Топлинна времеконстанта	T_{th}	min	30	35
Твърдост на вала на усукване	c_t	Nm/rad	119000	176000
Тегло (със спирачка)	m	kg	13,7	22,5
Тегло (без спирачка)	m	kg	12,5	21,0

Кривите скорост (обороти)/момент на серводвигателите *1FK6080-6AF71/1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71* са показани съответно на *фиг. 66* и *фиг. 67*.

Спирачните моменти, които са използвани в изследвания *УР*, са описани в *табл. 5*.



Фиг. 66 Характеристика изразяваща зависимостта между момента и оборотите на двигателите *1FK6080-6AF71/1FK6081-6AF71*



Фиг. 67 Характеристика изразяваща зависимостта между момента и оборотите на двигателите *1FK6100-8AF71*

Таблица 5 Оптимални параметри за спирачни моменти на изследваните сервомотори

Тип на двигателя	Външен резистор R opt [Ω]	Средна стойност на спирачния момент Mbr rms [Nm]		Максимален спирачен момент Mbr rms [Nm]	RMS ток при спиране Ibr rms [A]	
		Без допълнителен спирачен резистор	С допълнителен спирачен резистор		Без допълнителен спирачен резистор	С допълнителен спирачен резистор
1FK6081-6AF71	3,4	7,1	10,4	12,9	16,7	15,1
1FK6100-8AF71	1,8	14,1	25,0	31,0	38,0	35,0

Основните компоненти, интегрирани в серводвигателя и част от цялата система за управление и регулиране на роботите *KUKA* от модел *KR 150* са: *електромагнитна спирачка, резолвер и датчик за температурна защита*.

Електромагнитна спирачка

В *табл. 6* са показани основните параметри на спирачките на изследваните серводвигатели.

Таблица 6 Основни параметри на спирачките на изследваните сервомотори

Тип на двигателя	**Външен резистор R opt [Ω]**	**Средна стойност на спирачния момент Mbr rms [Nm]**		**Максимален спирачен момент Mbr rms [Nm]**	**RMS ток при спиране Ibr rms [A]**	
		Без допълнителен спирачен резистор	**С допълнителен спирачен резистор**		**Без допълнителен спирачен резистор**	**С допълнителен спирачен резистор**
1FK6081-6AF71	3,4	7,1	10,4	12,9	16,7	15,1
1FK6100-8AF71	1,8	14,1	25,0	31,0	38,0	35,0

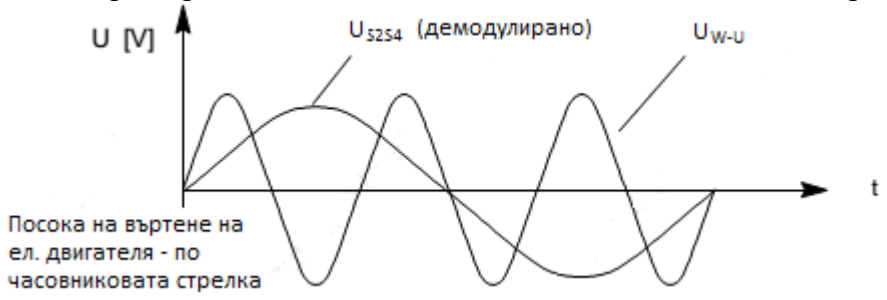
Резолвер

Техническите данни на използваните резолвери са показани в *табл. 7*.

Таблица 7 Технически параметри и данни за резолверите, използвани в изследваните сервоуправления на *KUKA KR 150*

Характеристика	**Стойност**
Механично ограничение на скоростта	15 000 RPM
Напрежение на възбуждането	от 5V (rms) до 13 V(rms)
Честота на възбуждането	от 4kHz до 10kHz
Консумация на ток	< 80mA (rms)
Ъглова точност (честотна лента) двуполюсна многополюсна	 < 14‘ < 14‘
Брой на полюсите Съотношение	2,4,6 или 8 0,5

На *фиг. 68* е показана зависимостта между напреженията U_{W-U} и демодулираното напрежение U_{S2S4} при въртене на двигателя в посока по часовниковата стрелка.



Фиг. 68 Зависимост между напреженията U_{W-U} и демодулираното напрежение U_{S2S4} при въртене на двигателя в посока по часовниковата стрелка

Използваният резолвер за двигателите *1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71* е показан на *фиг. 69.*

Фиг. 69 Снимка на резолвер, използван в двигателите от тип *1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71*

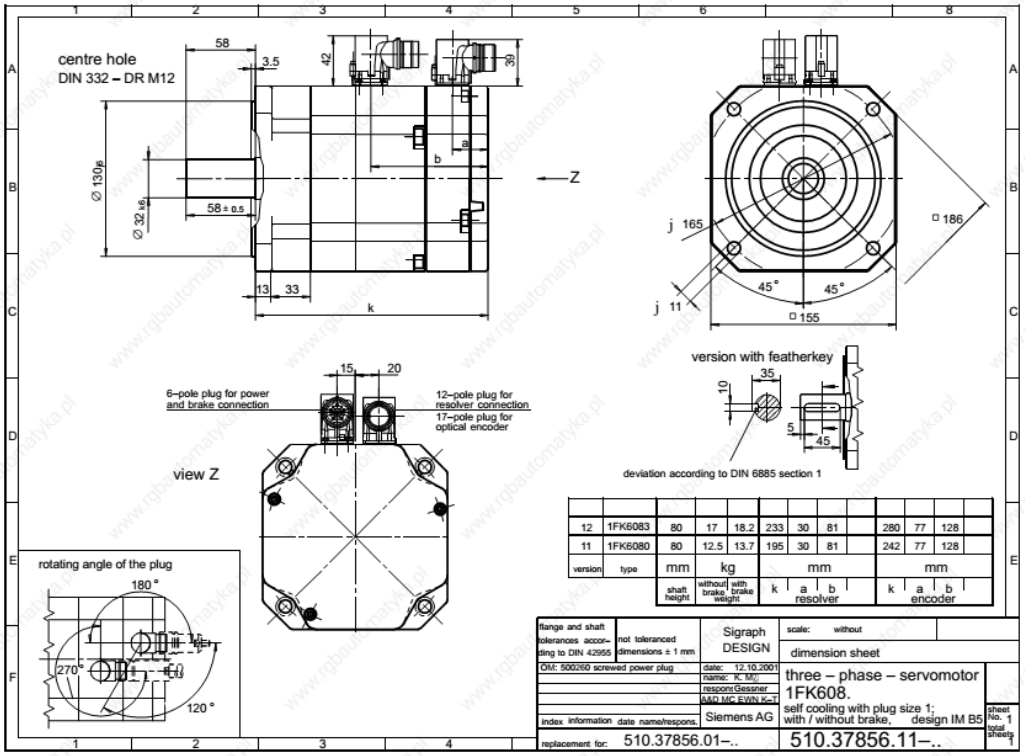
Датчик за температурна защита на серводвигателя

В табл. 8 са показани основните технически данни за използваните температурни датчици в изследваните двигатели на *KUKA KR 150*.

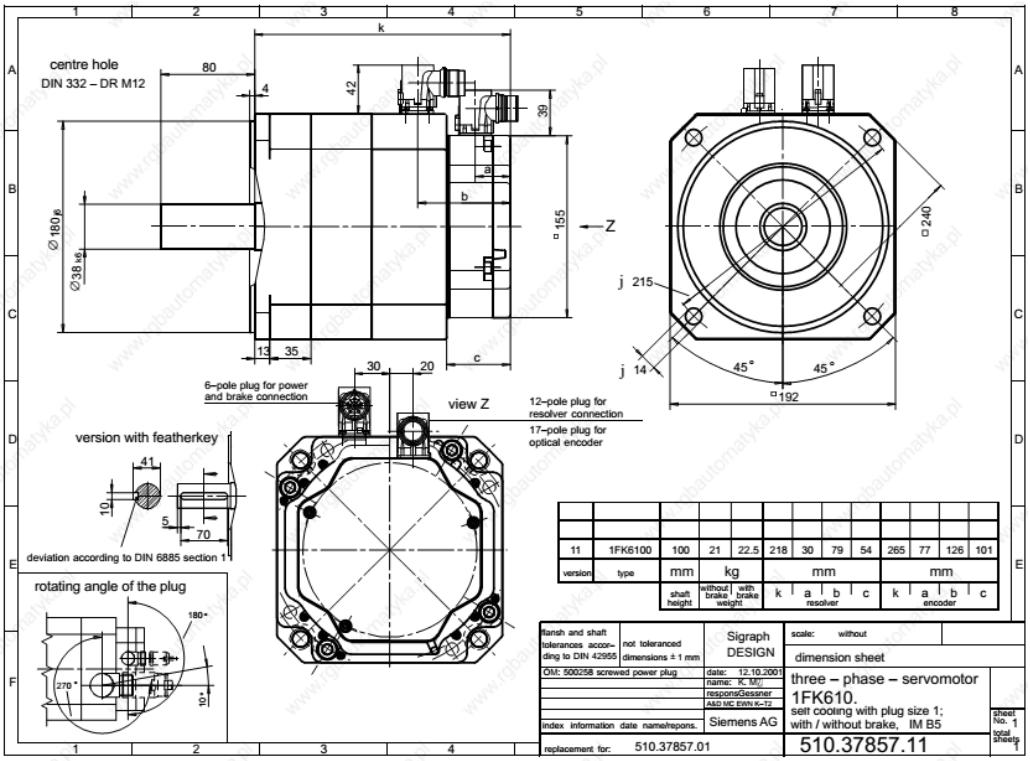
Таблица 8 Технически данни за термодатчиците, използвани в изследваните сервоуправления на *KUKA KR 150*

Тип на използвания температурен датчик	KTY 84 (PTC thermistor)
Съпротивление при 20°C	около 580 Ω
Съпротивление при 100°C	около 1000 Ω
Реакция при повишаване на температурата	Предварителна (предупредителна) аларма при 120°C Изключване при 155° ±5°C
Свързване	Чрез кабела на резолвера

На *фиг. 70* и *фиг. 71* са показани габаритните и присъединителните размери съответно на двигателите тип *1FK6081-6AF71* и *1FK6100-8AF71*.



Фиг. 70 Габаритни и присъединителни размери на серводвигател тип *1FK6081-6AF71*



Фиг. 71 Габаритни и присъединителни размери на серводвигател тип *1FK6100-8AF71*

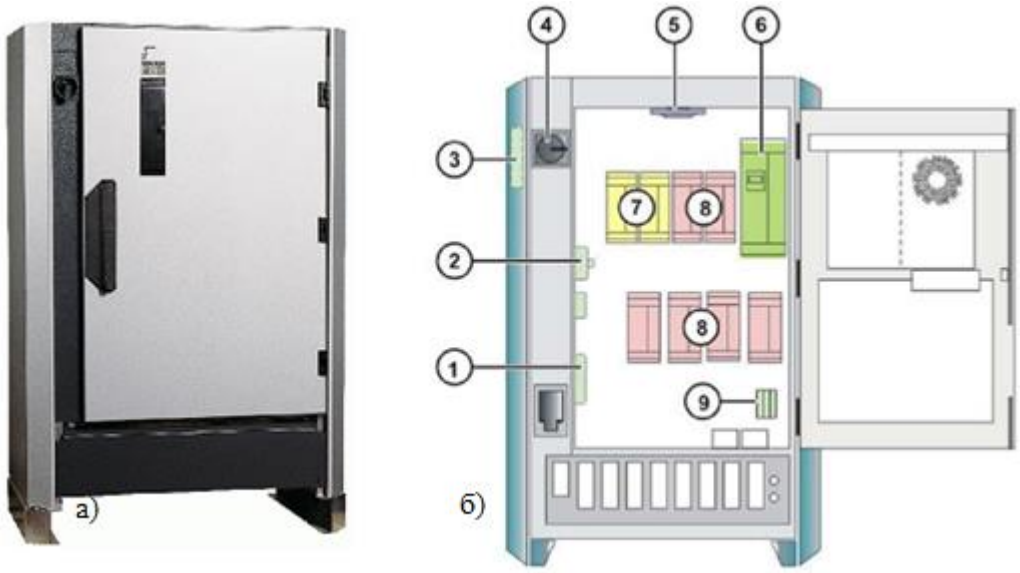
2.3.1.2. Изследване на електрическото табло, използвано в хардуерната конфигурация

В *табл. 9* са показани основните технически параметри на таблото за управление на изследвания в настоящия модел на *ИУР - KUKA KR 150*.

Таблица 9 Основни технически данни за електрическото табло за управление на *KUKA KR 150*

Тип на таблото	KR C2
Максимален брой оси за контрол	8
Параметри на ел. захранване **Захранващо напрежение** **Допустим толеранс** **Честота** **Инсталирана мощност под товар** **Предпазители** **Главен филтър – ток на утечка**	 3x400V до 3x415V 400V-10% до 415V+10% 49-61 Hz 7,3 kVA min 3x25A около 300mA
Използван микропроцесор	Celeron 433Mhz
Главна памет	64 MB
Степен на защита	IP 54
Условия на околната среда: **Без допълнителен охлаждащ модул** **С допълнителен охлаждащ модул**	 max 45°C max 55°C
Тегло	Около 185 кг

На *фиг. 72.а* е показана снимка с общия изглед на таблото, а на *фиг. 72.б* е представена модулната структура на управлението на изследвания робот *KUKA KR 150*.

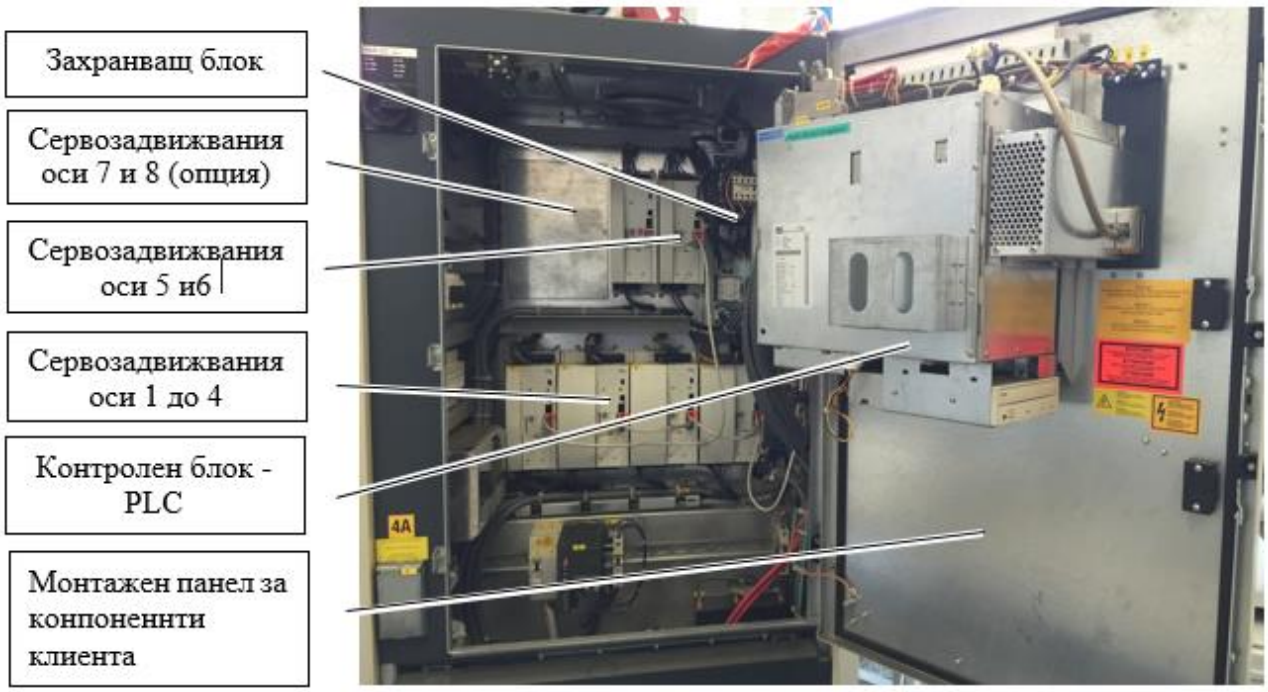


Фиг. 72 Табло за управление на изследвания модел *KUKA KR 150*
а) общ изглед на таблото б) модулна схема на таблото

Номерацията на фиг. 72.б е както следва:

1 - захранващ блок *KPS-27*
2 - блок предпазители
3 - главен филтър
4 - главен прекъсвач
5 - вентилатор за охлаждане на ел. таблото
6 - захранващ блок *KPS 600*
7 - сервозадвижвания *KSD* за 2 допълнителни сервооси
8 - сервозадвижвания *KSD* за 6 основни сервооси
9 - блок за защита (предпазители)

На *фиг. 73* е показана снимка на таблото - тип *KR C2*, за управление на шест сервооси с физическото разположение на основните компоненти на системата.



Фиг. 73 Физическо разположение на основните компоненти от таблото – тип *KR C2* на *KUKA KR 150*

Основните модули от таблото са показани на *фиг. 74* и разгледани детайлно по-долу.

Фиг. 74 Основни модули от табло – тип *KR C2* на *KUKA KR 150*

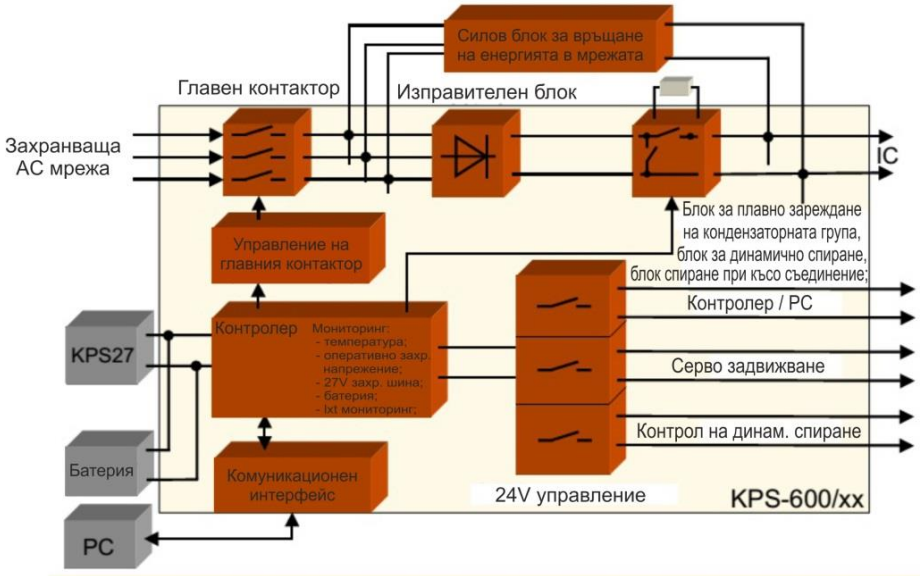
Захранващ модул

Изледваният захранващ блок съдържа следните компоненти: главен контактор, захранване с пускови вериги, баластни вериги (спирачни резистори), управление на спирачките – общо за шест оси и отделно за двете допълнителни оси, интерфейс за връзка с управляващия модул и със серво-инверторите, разпределение на захранване *24V DC*.

В захранващия модул влизат и следните сигнали:

- ✓ Аналогови – измерени променливи величини
  - температура на охладителите на сервоинверторите;
  - температура в таблото;
  - температура на баластните компоненти;
  - вътрешните за блока напрежения.
- ✓ Цифрови сигнали
  - периферия на робота;
  - състояние на биметалните контакти;
  - контрол на вентилаторите в таблото.

На *фиг. 75* е показана блоковата схема на захранващ модул *KPS 600*.



Фиг. 75 Захранващ модул *KPS 600* – блокова схема

Комуникацията между контролера *(PLC)* и захранващия модул се реализира съгласно приложената диаграма, показана на *фиг. 76*.

Фиг. 76 Комуникация между контролера и захранващия модул

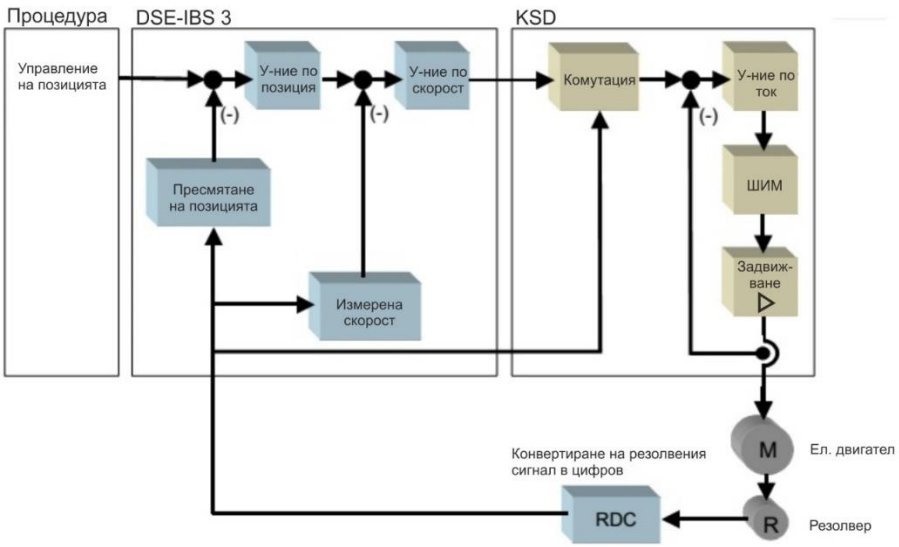
Захранващ модул KPS-27 – нисковолтово захранване

Модулът е показан на *фиг. 77*.

Фиг. 77 Захранващ модул *KPS 27*

Сервозадвижвания KSD

На *фиг. 78* е показана общата структурна схема на системата за управление на всяка една сервоос. Изследването показа, че регулирането се осъществява с двуконтурна схема на управление с подчинено регулиране. Първият (вътрешен) контур се реализира, чрез сервозадвижванията от серията *KSD*. Те реализират управление във функция от натоварването (тока) на двигателя, генерират *ШИМ* (широчинно импулсна модулация) и по този начин се явяват крайният модул, управляващ серводвигателите. Вторият (външен) контур – по скорост, се реализира от блока за управление (*PLC*), като обратната връзка по скорост се взема от резолвера и се преобразува от *RDC* конвертора.



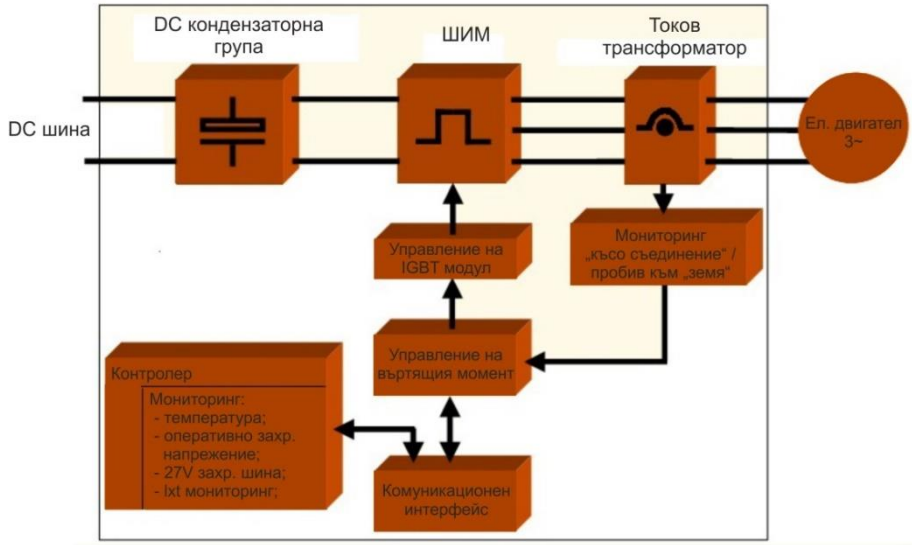
Фиг. 78 Обща структурна схема на системата за управление за всяка една сервоос от *ИУР KUKA KR 150*

Изследваните сервозадвижванията бяха общо пет типопредставителя, конструктивно оформени в два корпуса. Те са разработени с цел да покриват гамата сервомотори, използвани при управлението на роботите *KUKA*.

На *фиг. 79* е показан общ изглед отвън на сервозадвижванията.

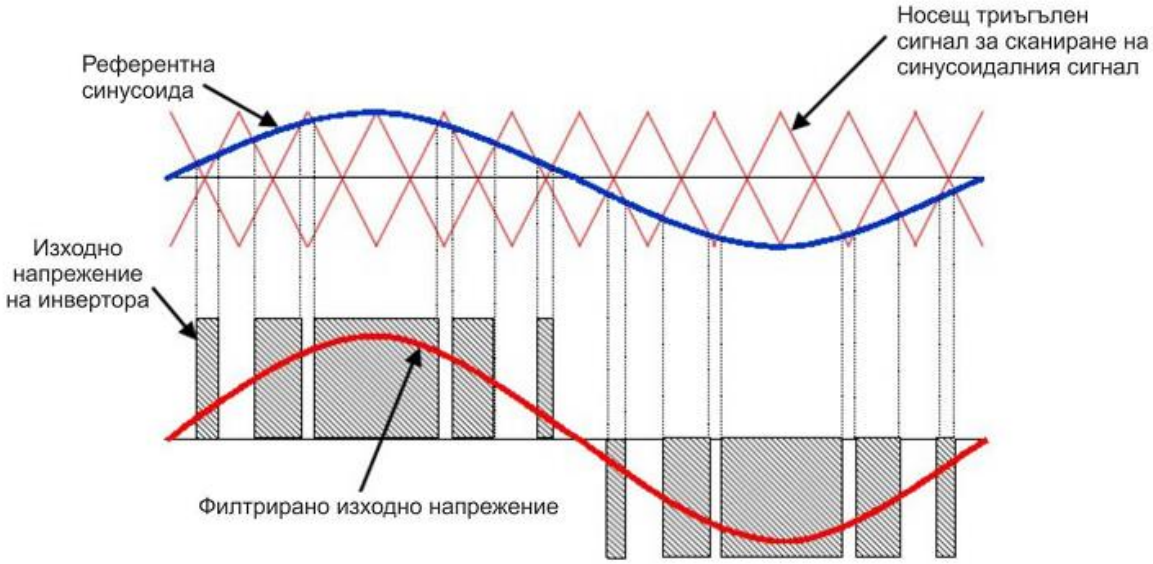
Фиг. 79 Общ изглед на сервозадвижванията използвани в *ИУР KUKA KR 150*

Блоковата схема на сервозадвижването е показана на *фиг. 80*, където се виждат основните функционални блокове.



Фиг. 80 Блокова схема с функционалните блокове на сервозадвижванията за *ИУР KUKA KR 150*

Изследването показа, че сервозадвижването генерира *ШИМ*, чрез който се управлява двигателят. Широчинно импулсната модулация дава възможност за по-малки загуби на мощност при управление на силовите преобразуватели. Мощността се контролира импулсно чрез коефициента на запълване, а не чрез промяна на амплитудата. Принципът на преобразуване и управление е показан на фиг. 81.



Фиг. 81 Принцип на преобразуване и управление с *ШИМ*

Функциите на сервозадвижванията могат да се обобщят както следва: управление по ток или момент, мониторинг на всички функции, мониторинг на хардуера на сервозадвижването, честоти - *4kHz/8kHz PWM*. В *табл. 10* са показани основните технически данни за сервозадвижванията на *KUKA KR 150*.

Таблица 10 Основни технически данни за сервозадвижванията на *KUKA KR 150*

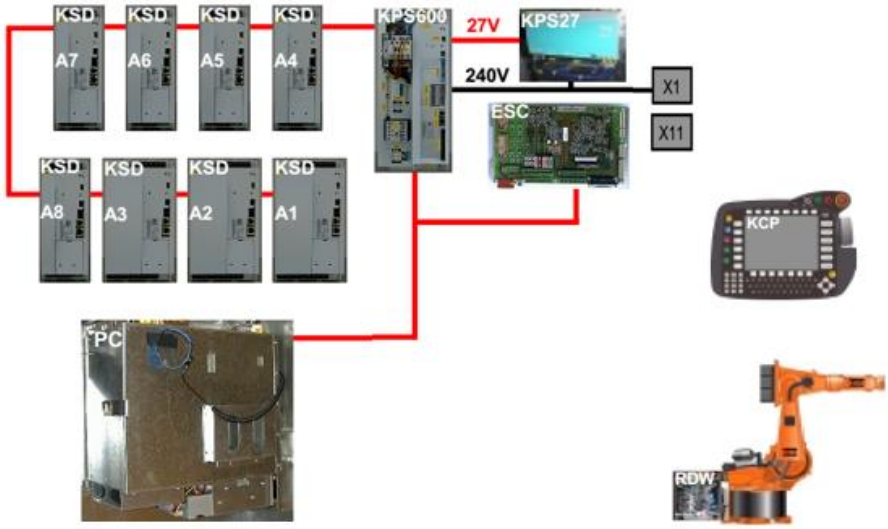
Сервозадвижване	KSD 1- 08	KSD 1- 16	KSD 1- 32	KSD 1- 48	KSD 1- 64
Напрежение на DC линка [V_{DC}]	0 – 770 V				
Номинален ток [A]	4 A	8 A	16 A	17 A	20 A
Максимален изходен ток [A]	8A	16A	32A	48A	64A
Размери	88 x 240 x 180			132 x 240 x 180	

Комуникацията между контролера *(PLC)* и сервозадвижването се реализира съгласно приложената диаграма, показана на *фиг. 82*.

Фиг. 82 Комуникация между контролера и сервозадвижването

Блок управление (PLC)

В направеното изследване за блока за управление се установи, че той реализира всички функции за регулиране на сервосистемите по скорост и по позиция. На *фиг. 83* са показани връзките между отделните блокове.

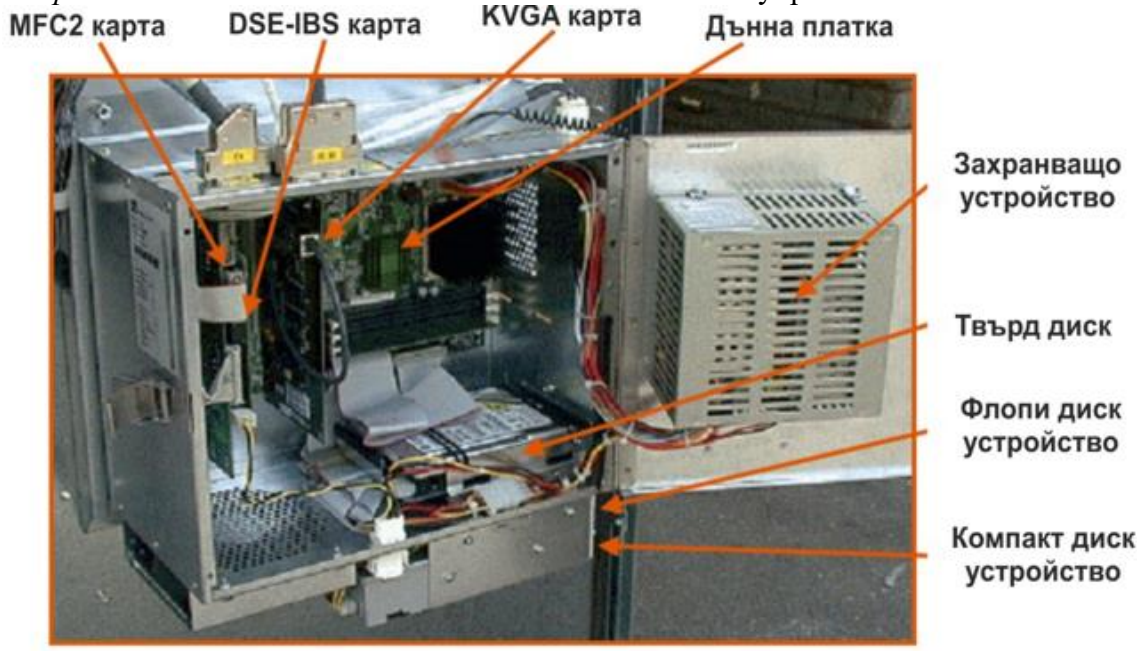


Фиг. 83 Блок за управление на *ИУР KUKA KR 150*

По отношение на функционалността се установи, че блокът за управление изпълнява всички функции на контролера на робота:

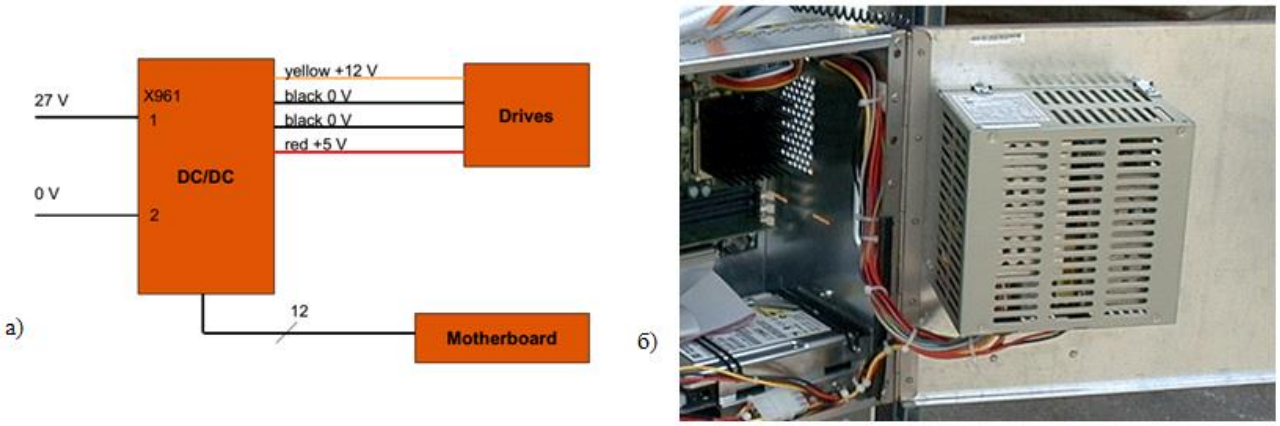
- *Windows* съвместим интерфейс с визуален дисплей и вход
- Създаване на програма, корекция, архивиране и поддръжка
- Последователен контрол
- Планиране на пътя/траекторията
- Управление на схемата на сервозадвижванията
- Следене/наблюдение
- Части от *ESC* схема за безопасност
- Комуникация с външна периферия (други контролери, хост-компютри, *PC*, мрежи)

На *фиг. 84* са показани всички компоненти от блока за управление.



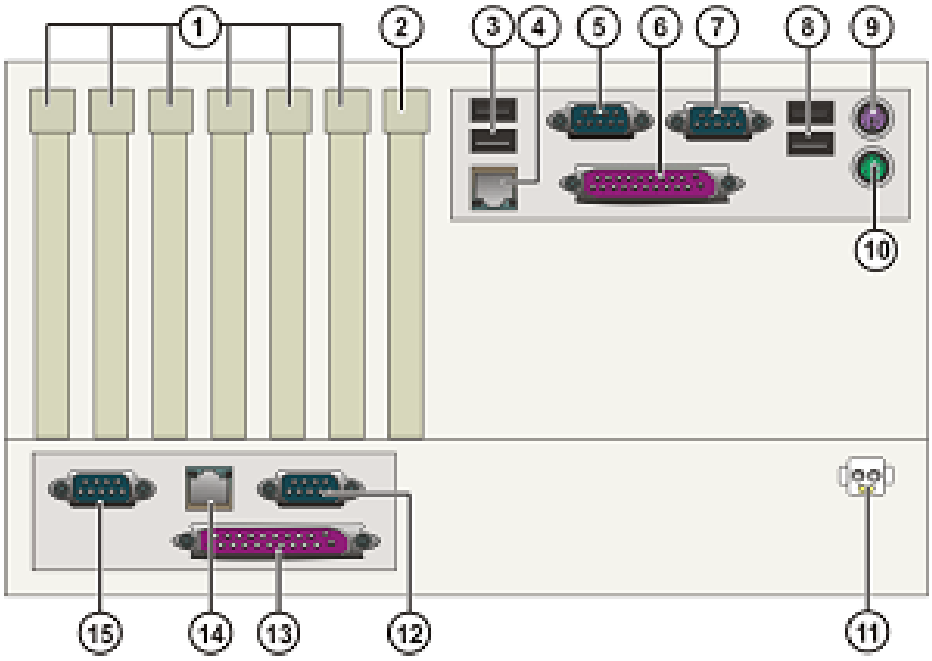
Фиг. 84 Компоненти на блока за управление

Блокова схема на захранването на блока за управление и общият му изглед са показани на *фиг. 85*



Фиг. 85 Захранване на блока за управление на *KUKA KR 150*
а) блокова схема на захранването б) общ изглед на захранването

На *фиг. 86* е показан входно-изходният интерфейс на управляващия блок.



Фиг. 86 Входно-изходен интерфейс на управляващ блок за *KUKA KR 150*

Номерацията по *фиг. 86* със съответните значения е както следва:

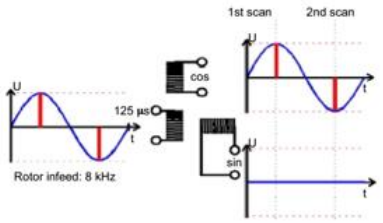
- Поз.1 - *PCI* слотове 1-6
- Поз.2 - *AGP – PRO* слот
- Поз.3 – *USB* (2x)
- Поз.4 – *X804 Ethernet*
- Поз.5 – *COM 1* сериен интерфейс
- Поз.6 - *LPT1* паралелен интерфейс
- Поз.7 – *COM 2* сериен интерфейс
- Поз.8 – *USB* (2x)
- Поз.9 – Връзка с клавиатура
- Поз.10 - Връзка с мишка
- Поз.11 – *X961* – захранване *24V DC*

Резолверна система

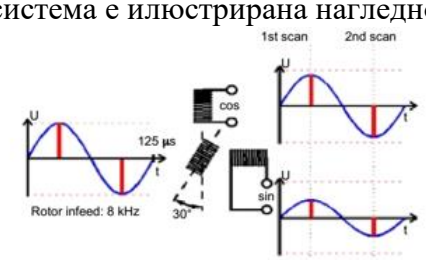
Установена е резолверната система за преобразуване на сигналите от резолверите на сервозадвижванията на робота, която се състои от конвертор (*RDC*) със следното описание:

- Генериране на всички необходими захранващи напрежения до *27V*
- Захранване на всички резолвери – до осем оси
- Изолирани захранвания за температурни сензори (*KYT 84*), вградени в серводвигателите (до осем броя)
- *R/D* преобразуване – до осем оси (с резолюция 12 бита)
- *A/D* преобразуване - до осем температурни сензора (с резолюция 12 бита)
- Оценка на два *EMT* канала
- Мониторинг на веригите на резолверите (*open circuit monitoring*)
- Температурен контрол на серводвигателите
- Комуникация с управляващия блок, чрез *RS 422* серийна комуникация
- Съхраняване на следните данни:
- Работни часове (*$ROBRUNTIME*)
- Абсолютна позиция в инкременти
- Позиция на всеки резолвер в инкременти
- Настройваеми параметри (офсет, симетрия и др.).

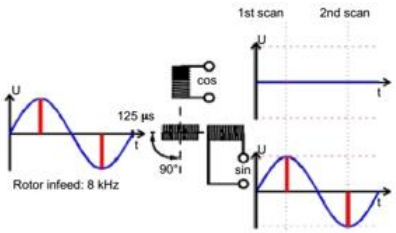
Работата на резолверната система е илюстрирана нагледно на *фиг. 87*.



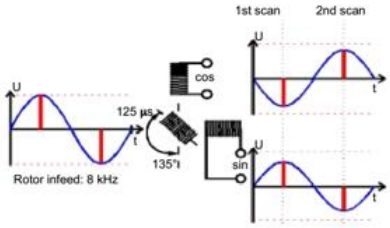
Работа на резолверна система: 1



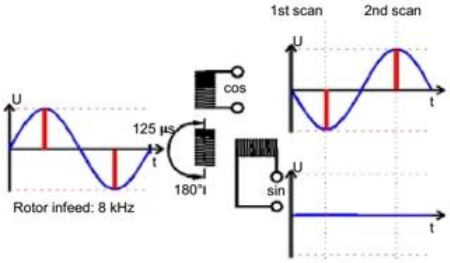
Работа на резолверна система: 2



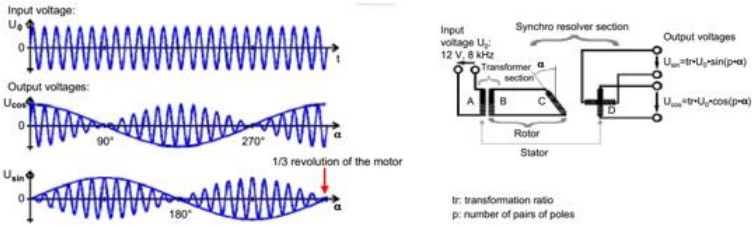
Работа на резолверна система: 3



Работа на резолверна система: 4



Работа на резолверна система: 5



Работа на резолверна система: 6

Фиг. 87 Графично представяне на работата на резолверната система на *ИУР KUKA KR 150*

2.3.1.3. Изследване на контролния панел

На *фиг. 88* е показано изследваното табло за управление на *KUKA KR 150* робот, комплект с панел за управление.

Фиг. 88 Табло за управление с панел за ръчно управление на *KUKA KR 150*

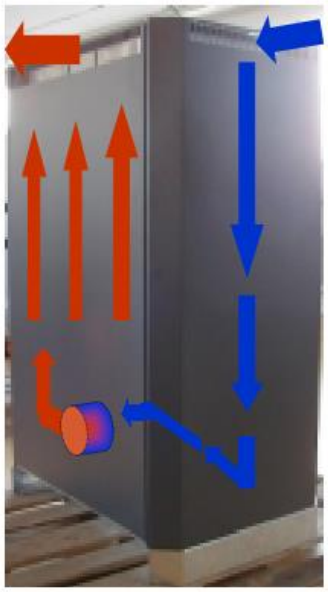
Фиг. 89 Панел за ръчно управление на *KUKA KR 150*

Компонентите на контролния панел са показани на *фиг. 89*, където:

1. Ключ за избор на режима
2. Избор на режима на сервозадвижванията - *ON*
3. Избор на режима на сервозадвижванията – *OFF/SSB GUI*
4. Бутон за авариен стоп
5. *6D* мишка
6. Статус клавиши за дясна ръка
7. *„Enter“* клавиш
8. Клавиш *„стрелка“*
9. Клавиатура
10. Цифрова клавиатура
11. *Soft* клавиши
12. Клавиш *„Start“/„назад“*
13. Старт бутон
14. *STOP* бутон
15. Клавиш за избор на прозореца
16. *ESC* клавиш
17. Статус клавиши за лява ръка
18. Меню клавиши

2.3.1.4. Вентилационна система на таблото за управление от хардуерната конфигурация

Изследвана е вентилационната система на таблото за управление на избрания типопредставител на *ИУР*. На *фиг. 90* е показан принципът на охлаждане на таблото с два вентилатора. От извършеното изследване стана ясно, че целта на двата вентилатора е да осигурят циркулация на въздуха със свеж (хладен въздух) в таблото и да отведат затопления въздух навън. На фигурата със сините стрелки е показано движението на въздуха осигурявано от единият вентилатор, който работи в режим на нагнетяване на хладен въздух в шкафа за управление, а с червен цвят е движението на въздуха, реализирано от втория вентилатор – за отвеждане на топлия въздух от таблото. Стигна се до заключението, че за гарантиране на ефективното охлаждане е важно спазването на посоката на въздушния поток, което се гарантира само при правилно свързване (сфазиране) на вентилаторите и въртенето им в правилната посока, което трябва да се провери в процеса на инсталация и пуск на съоръжението.



Фиг. 90 Схема на циркулацията на въздуха в таблото за управление на *KUKA KR 150*

2.4. Изследване на софтуера

Към увода на извършеното изследване беше споменато, че при анализа на всеки индустриален универсален робот от особено значение е неговата кинематична схема. Кинематичната схема и съответният анализ са съществени за по-нататъшното планиране на управлението на движенията на робота. За реализирането на ефективно управление е необходимо да се мине през всички етапи на кинематичния синтез и анализ, които са много комплексни при съвременните *ИУР*, поради многото степени на свобода на механизма. При ранните версии на роботите управлението се ограничава до индивидуален контрол на отделните стави, докато при съвременните *УР* е необходимо реализирането на така наречения *„task level control“*, който осигурява синхронното движение на всички стави на робота. Тези уводни въведения към проблема са взети под внимание и развити по-нататък в изследването на софтуерното управление на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*.

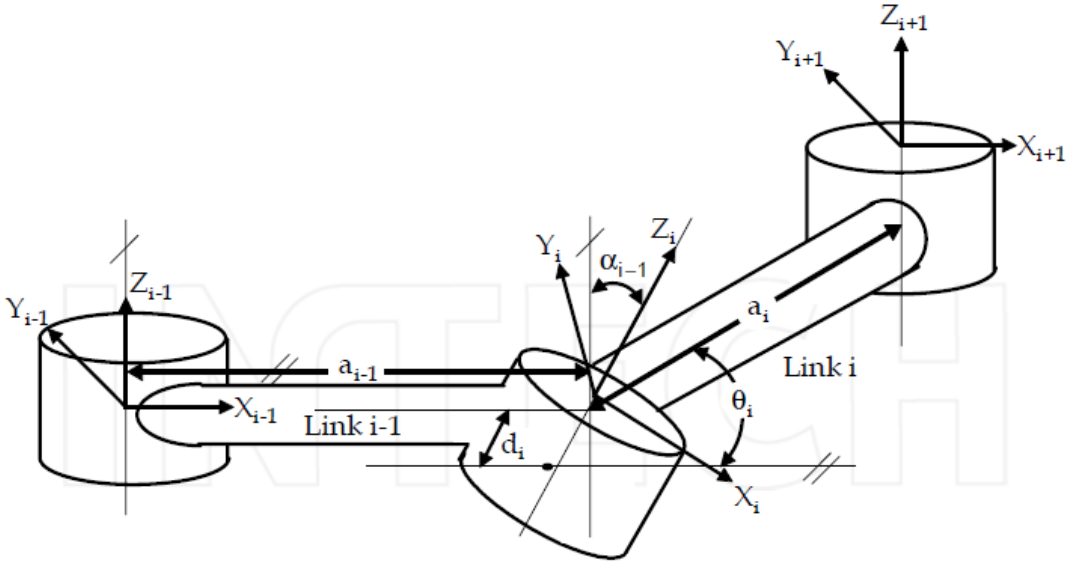
2.4.1. Математически модел за решаване на права и обратна задача в кинематиката за антропоморфни шестосни *ИУР*

За целите на извършеното изследване е установено, че при изграждането на метричните и математическите модели, необходими за проектиране на работните движения на *ИУР,* е необходимо да се решат следните задачи:

- определяне на релативното положение на различните звена на робота и обектите в пространството, спрямо базовата координатна система на *ИУР*;
- предаване на информацията за състоянието и ориентацията на обектите, намиращи се в работната зона на *ИУР*.

Поставените задачи са решени успешно, а описанието на извършеното изследване е показано както следва:

Всеки робот може да бъде представен кинематично, посредством концепцията на *Денавит-Хартенберг* [57, 73]. Съгласно концепцията са използвани четири базови параметъра, описващи връзките между отделните звена на роботите показани на *фиг. 91* [68],



Фиг. 91 Примерна схема на релативното положение на две съседни звена на *УР*, представено с параметрите на *Денавит-Хартенберг*

където:

α_{i-1} – ъгълът на завъртане между осите z_{i-1} и z_i на ставите (звената) *i-1* и *i* около ос x_{i-1} (отместването на ос z_i спрямо ос z_{i-1}), измерен при пренасянето на оста z_{i-1} по ос x_{i-1}, така че мислено да се пресече с ос z_i;

θi - ъгълът на завъртане между осите x_{i-1} и x_i на ставите (звената) *i-1* и *i* около ос z_{i-1} (отместването на ос x_i спрямо ос x_{i-1}), измерен при пренасянето на оста x_{i-1} по ос z_{i-1}, така че мислено да се пресече с ос x_i;

a_{i-1} – дължината на връзката (звеното) *i-1* или разстоянието по общата нормала между осите z_{i-1} и z_i;

di – отместването на ставата (звеното) *i* от ставата (звеното) *i-1*, определено от разстоянието между осите x_{i-1} и x_i, измерено по оста z_{i-1} (от началото на координатната система $X_{i-1}0_{i-1}Y_{i-1}$ по ос z_{i-1} до общата нормала на осите z_{i-1} и z_i).

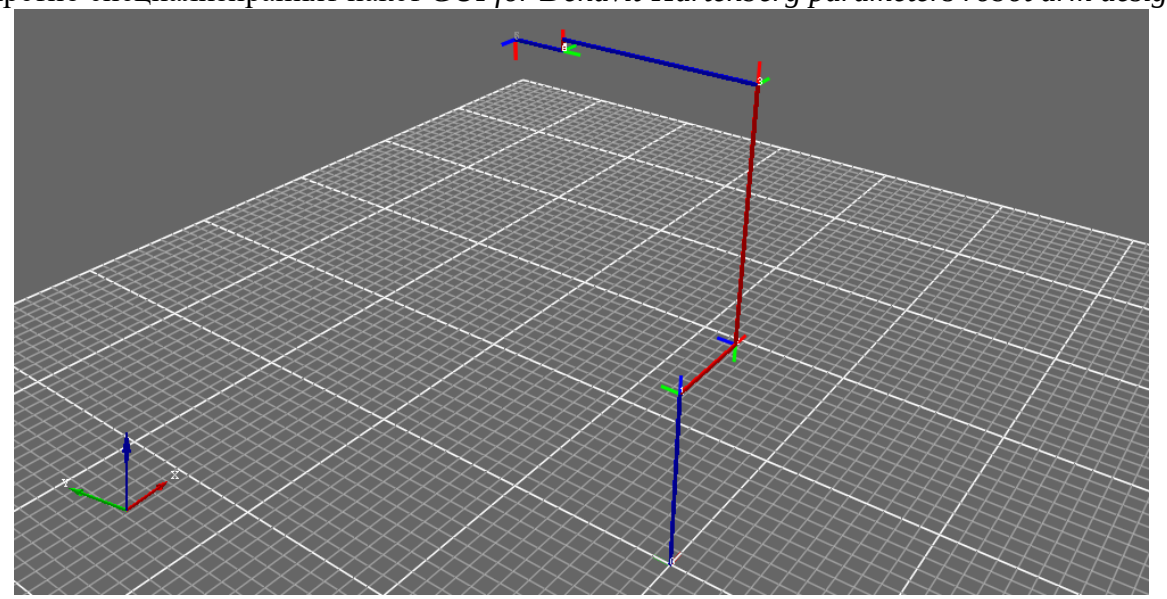
Два от параметрите описват самата връзка, а другите два описват положението ѝ спрямо съседната връзка в кинематичната верига.

Четирите параметъра (*D-H параметри*) за изследвания тук типопредставител на робот *KUKA KR 150*, са показани в *табл. 11*.

Таблица 11 *D-H параметри* на *KUKA KR 150*

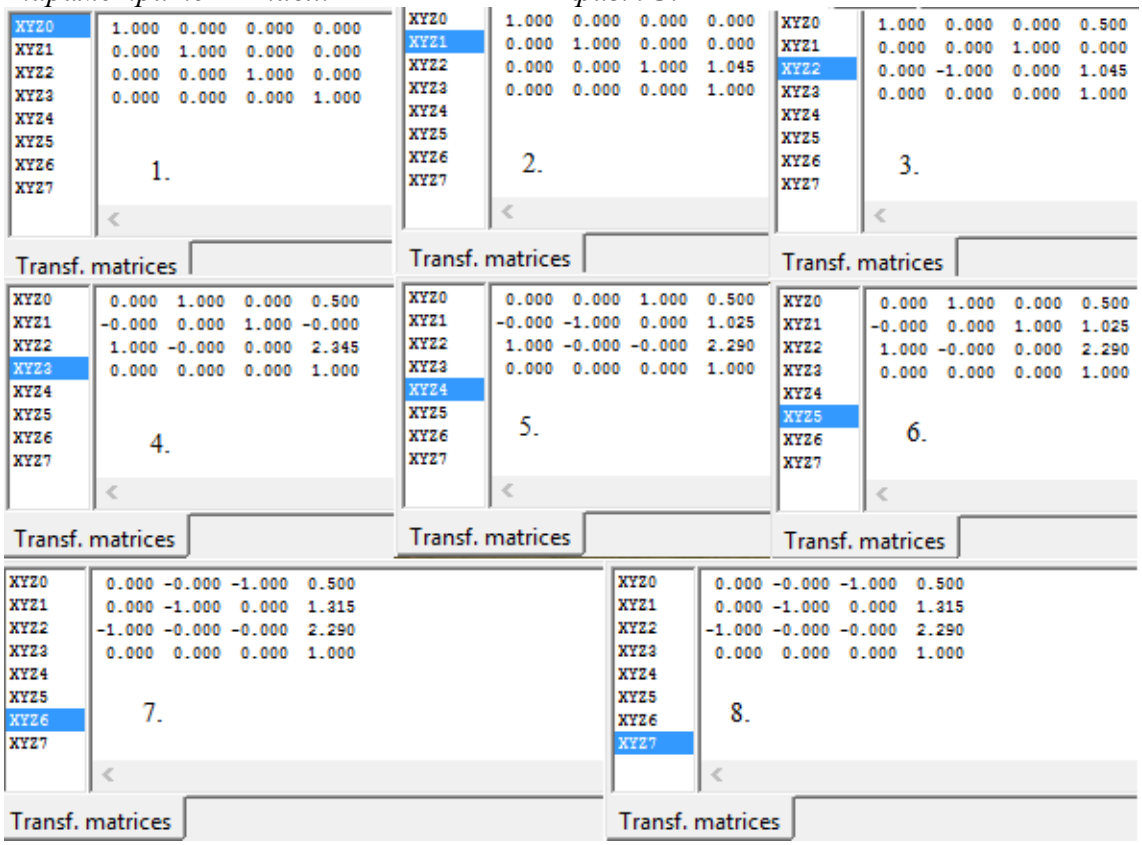
Става	***θi, °***	***αi, °***	***ai, мм***	***di, мм***
база	0	0	0	0
1	$\theta_1 = 0$	$\alpha_1 = 0$	$a_1 = 0$	$d_1 = 1045$
2	$\theta_2 = 0$	$\alpha_2 = -90$	$a_2 = 500$	$d_2 = 0$
3	$\theta_3 = -90$	$\alpha_3 = 0$	$a_3 = 1300$	$d_3 = 0$
4	$\theta_4 = 0$	$\alpha_4 = -90$	$a_4 = -55$	$d_4 = 1025$
5	$\theta_5 = 0$	$\alpha_5 = 90$	$a_5 = 0$	$d_5 = 0$
6	$\theta_6 = 180$	$\alpha_6 = -90$	$a_6 = 0$	$d_6 = 290$

За проектиране на работните движения е изготвен параметричен модел на изследвания робот *KUKA KR 150* (*фиг. 92*), използвайки *D-H параметрите* от *табл. 11* за описване на формата и разположението на отделните звена и връзки. За изграждането на модела са използвани софтуерните инструменти и библиотеки *Mobile Robot Programming Toolkit* и по-конкретно специализираният пакет *GUI for Denavit-Hartenberg parameters robot arm design*.



Фиг. 92 Параметричен модел с *D-H параметри* на кинематичната схема на изследвания робот *KUKA KR 150*

Математическото описание на разположението на звената и връзките на избрания типопредставител *KUKA KR 150*, базирано на използването на трансформационните матрици с *D-H параметрите* от *табл. 11* е показано на *фиг. 93*.



Фиг. 93 Трансформационни матрици, описващи разположението на звената в *KUKA KR 150*

Пълно описание на математическия модел на избрания типопредставител *KUKA KR 150* беше постигнато в извършеното изследване с решаването на т. нар. права и обратна задача в кинематиката. Резултатите от него са представени в текста, който следва.

Права задача в кинематиката за изследвания робот

Правата кинематична задача разглежда изчисляването на позицията и ориентацията на крайното звено (инструмента) в зависимост от зададените ъгли на ставите на робота.

Съставят се набор от уравнения, използвайки *D-H параметрите*. Тези параметри описват четири операции – две ротации и две транслации, които са достатъчни за пресмятането на трансформационната матрица за релативното положение на ставата K_{i-1} към K_i в рамките на кинематичната верига на индустриалния робот.

$$^{i-1}_{i}T = Rot(z,\theta_i)Trans(0,0,d_i)Trans(a_i,0,0)Rot(x,\alpha_i) = \begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Следователно, може да се обобщи, че за поредица от *N кинематични връзки*, цялостната трансформация между първото звено K_0 и последното K_N ще бъде матрично умножение на всички трансформационни матрици с *D-H параметрите* на всяка става:

$$^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T \dots {}^{N-1}_{N}T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{l} & \vec{m} & \vec{n} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \vec{p} \\ \vec{0}^T & 1 \end{bmatrix},$$

където R - е *3x3* матрица (ротационна матрица), представяща ротацията, а с $\vec{p}$ е обозначена *3x1* матрица (вектор), представяща транслацията (релативното отместване).

По този начин за антропоморфен робот с шест степени на свобода от типа на *KUKA KR 15*0, цялостната трансформация ще бъде:

$$^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T\,{}^{5}_{6}T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Трансформацията описва позицията и ориентацията на последното звено (инструмента, крайният ефектор) спрямо основата на индустриалния робот.

Ако роботът има допълнителен инструмент или базовата координатна система не съвпада с базовата на робота, се извършват допълнителни умножения на трансформационата матрица $^{0}_{6}T$ с трансформационната матрица на инструмента и/или с тази на основата на робота.

Трансформационните матрици на робота с шест степени на свобода от типа на изследвания *KUKA KR 150* са следните:

$$^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & -sin\theta_1 & a_1 cos\theta_1 \\ sin\theta_1 & 0 & cos\theta_i & a_1 sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 & 0 & a_2 cos\theta_2 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 & 0 & a_2 sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} cos\theta_3 & 0 & -sin\theta_3 & a_3 cos\theta_3 \\ sin\theta_3 & 0 & cos\theta_3 & a_3 sin\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} cos\theta_4 & 0 & sin\theta_4 & 0 \\ sin\theta_4 & 0 & -cos\theta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} cos\theta_5 & 0 & -sin\theta_5 & 0 \\ sin\theta_5 & 0 & cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{5}_{6}T = \begin{bmatrix} cos\theta_6 & -sin\theta_6 & 0 & 0 \\ sin\theta_6 & cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Пресмятайки цялостната трансформационна матрица се получава:

$l_x = s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) + c_1\big(-s_{23}s_5c_6 + c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6)\big)$

$l_y = -c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) + s_1\big(-s_{23}s_5c_6 + c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6)\big)$

$l_z = -c_6(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5) + s_{23}s_5s_6$

$m_x = c_6(s_1c_4 - c_1c_{23}s_4) - s_6\big(s_1s_4c_5 + c_1(c_{23}c_4c_5 - s_{23}s_5)\big)$

$m_y = c_1(-c_4c_6 + c_5s_4s_6) - s_1\big(-s_{23}s_5s_6 + c_{23}(s_4c_6 + c_4c_5s_6)\big)$

$m_z = s_{23}s_4c_6 + s_6(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5)$

$n_x = -s_1s_4s_5 - c_1(s_{23}c_5 + c_{23}c_4s_5)$

$n_y = -s_1s_{23}c_5 + s_5(-s_1c_{23}c_4 + c_1s_4)$

$n_z = -c_{23}c_5 + c_4s_{23}s_5$

$p_x = -d_6s_1s_4s_5 + c_1\big(a_1 + a_2c_2 - s_{23}(d_4 + d_6c_5) + c_{23}(a_3 - d_6c_4s_5)\big)$

$p_y = d_6c_1s_4s_5 + s_1\big(a_1 + a_2c_2 - s_{23}(d_4 + d_6c_5) + c_{23}(a_3 - d_6c_4s_5)\big)$

$p_z = d_1 - c_{23}(d_4 + d_6c_5) - a_2s_2 + s_{23}(-a_3 + d_6c_4s_5)$

където $s_i = sin\theta_i$, $c_i = cos\theta_i$, $s_{23} = sin(\theta_2 + \theta_3)$, $c_{23} = cos(\theta_2 + \theta_3)$

За преобразуването на ротационната матрица към *ойлерови ъгли* (*RPY ъгли*) се използват следните зависимости:

$$R_{RPY}(\gamma, \beta, \alpha) = R_z(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(\gamma) =$$

$$= \begin{bmatrix} cos\alpha cos\beta & cos\alpha sin\beta sin\gamma - sin\alpha cos\gamma & cos\alpha sin\beta cos\gamma + sin\alpha sin\gamma \\ sin\alpha cos\beta & sin\alpha sin\beta sin\gamma + cos\alpha cos\gamma & sin\alpha sin\beta cos\gamma - cos\alpha ain\gamma \\ -sin\beta & cos\beta sin\gamma & cos\beta cos\gamma \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}.$$

От ротационната матрица се извеждат следните уравнения за *ойлеровите ъгли*:

$$\beta = Atan2\Big(-r_{31}, \sqrt{{r_{11}}^2 + {r_{21}}^2}\Big),\ \alpha = Atan2(r_{21}, r_{11}),\ \gamma = Atan2(r_{32}, r_{33})$$

Обратна задача в кинематиката за изследвания робот

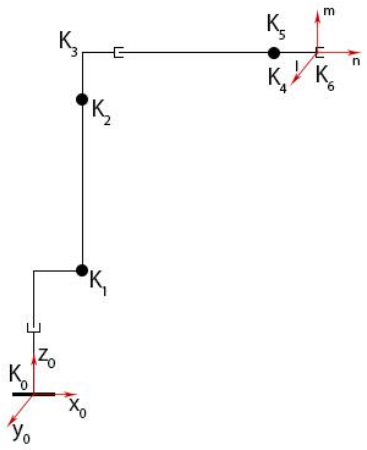
Обратната задача в кинематиката разглежда обратния процес на правата задача - изчисляването на зададените ъгли на ставите на робота, в зависимост от позицията и ориентацията на крайното звено (инструмента).

В случай, че роботът има допълнителен инструмент или основната координатна система не съвпада с базовата на робота, се извършват изчисления в две стъпки – първо се намира трансформационната матрица, показваща релативната връзка между основната координатна система и базовата на робота, а впоследствие се извършват изчисленията необходими за решаването на обратната задача.

За разлика от правата задача, в обратната решението е съпътствано с намирането на много възможни варианти. Обикновено решението не е чисто аналитично, чрез последователност от уравнения и зависимости, а е необходимо да се приложи геометричен подход. За роботите от типа *KUKA KR 150* е използван именно такъв подход, поради липса на възможност да се определят ъглите на ставите по друг начин [69].

Всички *D-H параметри* на изследвания робот, които са използвани в изчисленията, са показани в *табл. 11*. На *фиг. 94* е показан опростен кинематичен модел на *KUKA KR-15*0, с неговите звена и кинематични двоици [80].

В геометричния метод за решаването на обратната задача за робот *KUKA KR 150* - ъглите на трансформация на отделните стави се пресмятат в следната последователност: θ_1, θ_3, θ_2, θ_5, θ_4, θ_6.



Фиг. 94 Опростен кинематичен модел на *KUKA KR 150*

От проекцията на K_4 върху равнината X_0-Y_0 на основната координатна система K_0 се изчислява ъгълът θ_1. За целта първо се определя разположението на K_4. Кинематичната схема на изследвания робот е разработена с три въртящи двоици, които не променят позицията, а само ориентацията на съседните звена – K_1, K_4 и K_6 (*A1*, *A4* и *A6* на *фиг. 48*). От това следва, че ъгловото положение на K_6 ориентира крайния ефектор, без да оказва влияние върху позицията му. Използвайки векторната репрезентация за геометричното разположение на звената K_4 и K_6, се получава:

$\vec{p}_{46} = d_6 \cdot \vec{n}$.

Векторът $\vec{n}$ насочен към *ос z* на K_6, замества ротационната матрица в третата колона на трансформационната матрица ${}^0_6T$:

$$\vec{p}_{04} = \vec{p} - \vec{p}_{46} = \vec{p} - d_6 \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} p_{04_x} \\ p_{04_y} \\ p_{04_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 n_x \\ p_y - d_6 n_y \\ p_z - d_6 n_z \end{bmatrix}.$$

Използвайки тази зависимост се изчислява θ_1 с формулата:

$\theta_1 = Atan2\left(p_{04_y}, p_{04_x}\right) + \pi n,$

където $n = -1, 0, 1$.

Използвайки същият модел се изчислява векторът $\vec{p}_{14}$. Позицията на вектора $\vec{p}_{01}$ се взима от транслационната част на трансформационната матрица ${}^0_1T$:

$$\vec{p}_{14} = \vec{p}_{04} - \vec{p}_{01} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 n_x \\ p_y - d_6 n_y \\ p_z - d_6 n_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 \cos\theta_1 \\ a_1 \sin\theta_1 \\ d_1 \end{bmatrix}$$

Сумата от ъглите на триъгълника $K_2K_3K_4$ е равна на *180°*, следователно:

$a)\ \gamma = 180° - \omega - (180° - \varphi) = \varphi - \omega,$

$b)\ \gamma = \varphi + \omega.$

Изчислява се ъгълът φ от косинусовата теорема:

$\varphi = Acos(\frac{{a_2}^2 + {l_4}^2 - |\vec{p}_{14}|^2}{2a_2 l_4})$.

Изчислява се ъгълът ω по следната зависимост:

$\omega = Atan2(a_3, d_4)$.

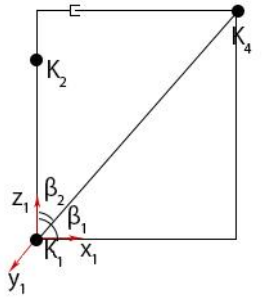
Според стойността на γ се получават две възможни решения за θ_3:

1) $\theta_3 = n(180° - (\varphi - \omega))$,

2) $\theta_3 = n(180° - (\varphi + \omega))$,

където $n = -1, 1$.

За определянето на ъгъла θ_2 се използват ъглите β_1 и β_2, които се получават от вектора $\vec{p}_{14}$ (*фиг. 95*) [80].



Фиг. 95 Изчисляване на θ_2

Изчисляването на θ_2 се извършва чрез трансформация на $\vec{p}_{14}$ от K_0 до K_1, използвайки инверсията на ротационната матрица ${}^0_1\boldsymbol{R}$, част от трансформационната матрица ${}^0_1T$.

$\vec{p}^{(1)}_{14} = ({}^0_1\boldsymbol{R})^{-1} \cdot \vec{p}_{14}$.

Ротационната матрица ${}^0_1\boldsymbol{R}$ е ортогонална, следователно:

$({}^0_1\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_1\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \rightarrow ({}^0_1\boldsymbol{R})^{-1} = ({}^0_1\boldsymbol{R})^T$.

За β_1 и β_2 имаме:

$\beta_1 = Atan2(\vec{p}^{(1)}_{14\ y}, \vec{p}^{(1)}_{14\ x})$,

$\beta_2 = Acos(\frac{{a_2}^2 + |\vec{p}_{14}|^2 - {l_4}^2}{2a_2|\vec{p}_{14}|})$.

След извършените изчисления се получават две възможности за θ_2:

1) $\theta_2 = n(\beta_1 + \beta_2)$,

2) $\theta_2 = n(\beta_1 - \beta_2)$,

където $n = -1, 1$.

Определянето на θ_5 се извършва, чрез скаларното произведение на ненулевите вктори $\vec{n}$ и $\vec{z}_3$.

$\vec{z}_3 \cdot \vec{n} = |\vec{z}_3| \cdot |\vec{n}| \cdot \cos\theta_5$,

$\theta_5 = Acos(\vec{z}_3 \cdot \vec{n})$.

Ориентацията на вектора $\vec{z}_3$ се взима от ротационната матрица, част от трансформационната матрица ${}^0_4T$, която се изчислява от ъглите θ_1, θ_2 и θ_3. Векторът $\vec{z}_3$ се получава от третата колона на матрицата ${}^0_4\boldsymbol{R}$.

За ъгъла θ_5 се получават следните възможни решения:

1) $\theta_5 = z_{3_x}n_x + z_{3_y}n_y + z_{3_z}n_z$,

2) $\theta_5 = -(z_{3_x}n_x + z_{3_y}n_y + z_{3_z}n_z)$.

За пълната ротация се изчислява:

${}^0_6\boldsymbol{R} = {}^0_3\boldsymbol{R} \cdot {}^3_6\boldsymbol{R} \rightarrow {}^3_6\boldsymbol{R} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^{-1} \cdot {}^0_6\boldsymbol{R}$.

Матрицата $\boldsymbol{R}$ е ортогонална, съответно:

$({}^0_3\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_3\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \rightarrow ({}^0_3\boldsymbol{R})^{-1} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^T$.

От изведените зависимости се получава:

$${}^3_6\boldsymbol{R} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_6\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -s_4c_6 - c_4c_5s_6 & -c_4s_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & c_4c_6 - s_4c_5s_6 & -s_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

където $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$.

За ротационната матрица ${}^3_6\boldsymbol{R}$ се изчисляват следните уравнения:

$\begin{cases} -s_4s_5 = r_{23} \\ -c_4s_5 = r_{13} \end{cases}$,

откъдето се получава:

$\tan\theta_4 = \frac{r_{23}}{r_{13}}$

Стойността на θ_4 се изчислява от:

$\theta_4 = Atan2(r_{23}, r_{13}) + \pi n,$

където $n = -2, -1, 0, 1, 2.$

Идентично като θ_4 се намира решението за θ_6:

$\tan\theta_6 = \frac{-r_{32}}{r_{31}}$

За ъгъл θ_6 се получава:

$\theta_6 = Atan2(-r_{32}, r_{31}) + \pi n$

където $n = -2, -1, 0, 1, 2.$

2.4.2. Операционна система, *HMI* потребителски интерфейс и екрани, базови функции и възможности на оперативния софтуер на робот *KUKA KR 150*

В дейността е разгледан и анализиран разработеният и имплементиран софтуер за управление на произвежданите от *KUKA* серии роботи, разпространяван под името *KSS (Kuka System Software)* [90]. В следващите редове е дадено описанието на извършеното изследване.

За разглеждания робот *KUKA KR 150* – обект на изследване, софтуерното осигуряване се осъществява от два основни компонента: *KSS* – за изпълнение на основните функции и оперативни възможности на робота и *Windows XP embedded 2.x* със *Service Pack 2*, осигуряващ потребителски ориентиран интерфейс за комуникация с потребителя на системата.

Операционна система

Софтуерното осигуряване на роботите *KUKA* – *KSS* отговаря за всички основни процеси и функционалности, свързани с управлението на роботите, които са:

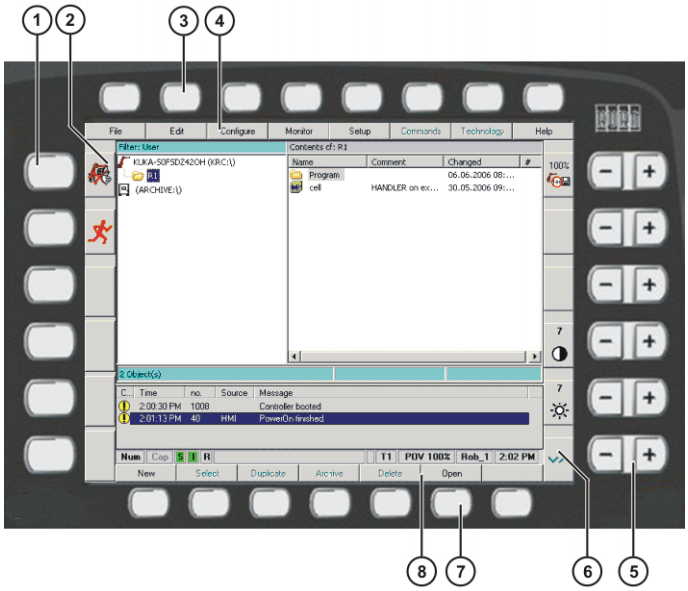
- *едновременно управление на двигателите на отделните звена на робота при изграждането на траектория на движение по зададени координати на точките за крайния ефектор*;
- *управление на входовете и изходите на контролерите от хардуерната система на робота*;
- *управление на файловата система, оперативната и неоперативна памет на робота, за изпълнение на заложените програмни функционалности*;
- *осигуряване на надежден и достъпен за потребителя HMI (Human-machine interface).*

HMI – потребителски интерфейс

Потребителският интерфейс – *HMI (фиг. 96)*, осигурява бърз и лесен достъп до следните функционалности на софтуера на робота:

- *потребителско ниво на управление* – осигурява достъп до функционалностите на софтуерното осигуряване, достъпни за ниво *„user“*, или за ниво *„expert“*.
- *подпрограма за редактиране на съществуващи програми* – дава възможност да се редактират запаметени програми със зададени траектории на движение или да се оптимизират определени функционалности на системния софтуер;
- *специализирана програмна среда (софтуерен инструмент за разработка на програми и подпрограми) за добавяне на нови софтуерни инструменти и функционалности* – използва се т.нар. *KRL (Kuka Robot Language)*, разработен от компанията *KUKA*;
- *екрани за достъп до различна системна информация* – това могат да бъдат екрани: за възникнали грешки, за проследяване работата на програмите в *„дебъгинг“* режим, за информация за работните параметри и режими на работа, за избор на координатни системи и крайни точки, необходими за програмиране на траекторията на движение на крайния ефектор, за визуализация на движенията на звената на робота и др.;

- *различни софтуерни и програмни помощни средства* – такива могат да бъдат различните конфигурационни файлове и екрани, достъп до *"online"* съпорт, осигурен от производителя или дистрибутора на управлявания робот и др.



Фиг. 96 *HMI* екран за управление на робот *KUKA KR 150*

където:

1 – Лявоориентирани функционални бутони – бутони за управление на робота и настройки на работни параметри.

2 – Икони на лявоориентираните функционални бутони.

3 – Бутони за достъп до потребителски менюта – достъпват се различни менюта за работа с определен пакет от софтуерни инструменти.

4 – Икони на бутоните за достъп до потребителски менюта.

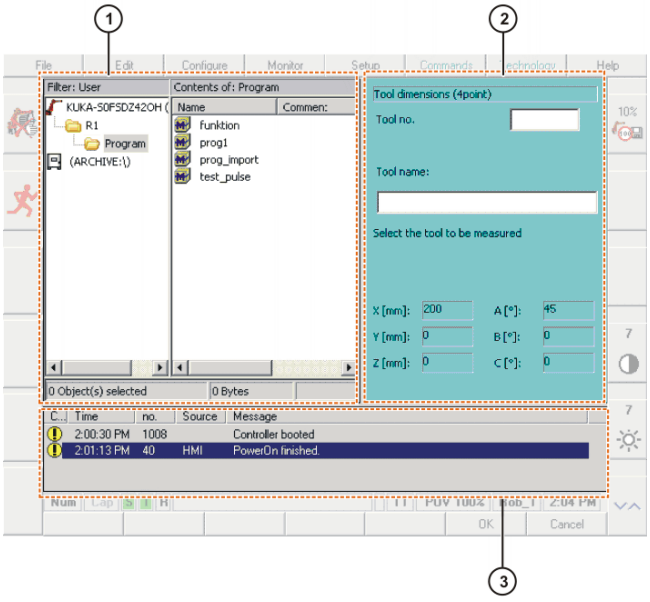
5 – Дясноориентирани функционални бутони.

6 – Икони на дясноориентираните функционални бутони.

7. – Бутони за динамична смяна на потребителски екрани.

8 – Икони на бутоните за динамична смяна на потребителски екрани.

Екраните от *HMI* на *KUKA KR 150* основно се разделят на три функционално-ориентирани прозореца, показани на *фиг. 97*.



Фиг. 97 Основни екрани, част от *HMI* на *KUKA KR 150*

където:

1 – Главен (основен) екран – навигира потребителя през файловата система на софтуерното осигуряване.

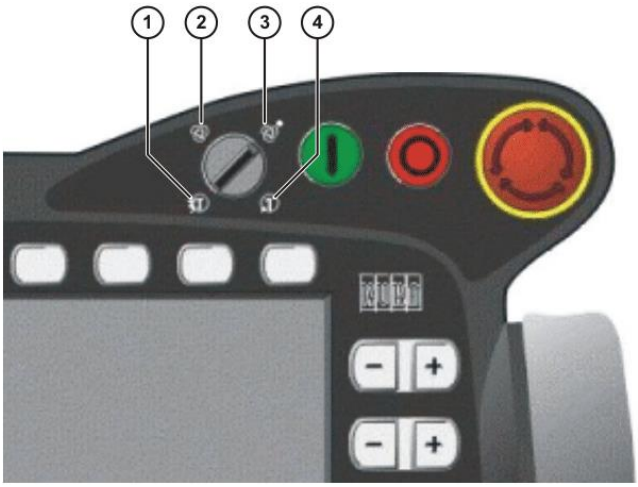
2 – Функционален екран – осигурява достъп до определени функционални параметри или последователност от функции. Може да бъде отворен само един функционален екран по едно и също време.

3 – Екран за системни съобщения – визуализира информация, свързана с: възникнали грешки, диалогови и системни съобщения.

Основни системни настройки на операционната система KSS

За начално стартиране на системата е необходимо да се въведат серия от конфигурационни параметри и настройки, които включват:

- *стартови настройки на системата* – въвеждат се режими за стартиране и рестарт на системата.;
- *избор на език на системния софтуер*;
- *селектиране и промяна на нивото на потребителя* – четири са групите потребители със съответните права, които могат да бъдат селектирани: *operator* (група потребители по подразбиране, с основни права за достъп в системата), *user* (група потребители с права на оператори и с възможност за редактиране на определени системни файлове), *expert* (група потребители с разширени права, със знания и умения за достъп до файлове, предназначени за програмисти и с възможност за смяна на потребителския интерфейс), *administrator* (група потребители с пълни права за достъп до системните файлове);
- *избор на режим на работа* – за роботите *KUKA KR 150* има четири режима на работа, които са: ръчен с ограничение за скоростта (режим *T1*, *фиг. 98 - 1*), ръчен с висока скорост (*T2, фиг. 98 - 2*), автоматичен (*AUT, фиг. 98 - 3*), автоматичен с външен достъп (*AUT EXT, фиг. 98 - 4*). Селектират се от панела за ръчно управление (*фиг. 98*).

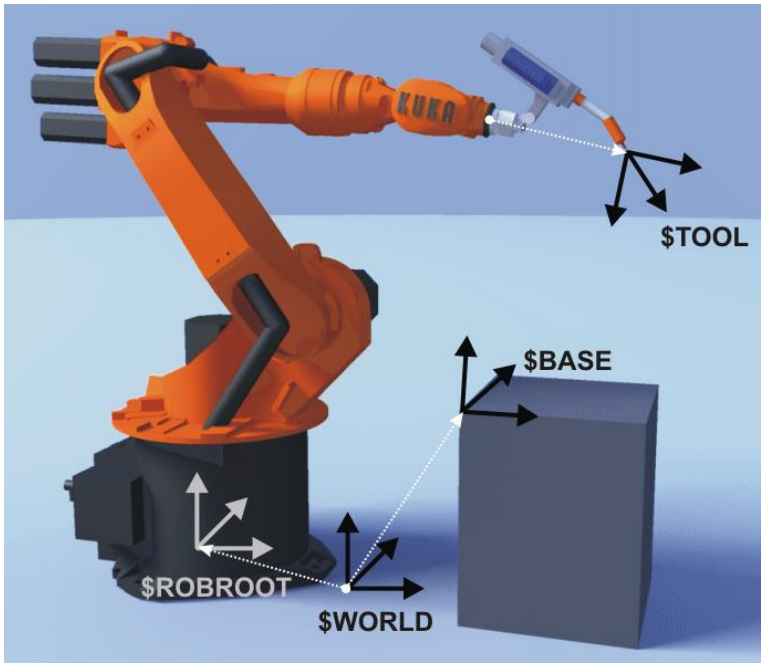


Фиг. 98 Избор на режими на работа от панела за ръчно управление на *KUKA KR 150*

Базови настройки и конфигурация на операционната система KSS, необходими за съставяне на управляващи програми на робота

- *избор на координатни системи* – избира се между три възможности на декартова координатна система за програмиране на траектории на движение (*фиг. 99*) - основна координатна система (инерционна), базова (помощна) координатна система и координатна система на инструмента. Основната координатна система е тази, която роботът приема по подразбиране при първоначално стартиране и обикновено е присвоена към основата на робота. Базовата координатна система е присвоена към

работния детайл и е свързана с основната на робота. По подразбиране те съвпадат при начално пускане на *УР*, а настройките за *„offset“* се задават от оператора на системата по-късно. Координатната система на инструмента е присвоена към неговия връх. По подразбиране тя е настроена към центъра на фланеца на крайното звено на робота и по-късно се дефинира от потребителя;



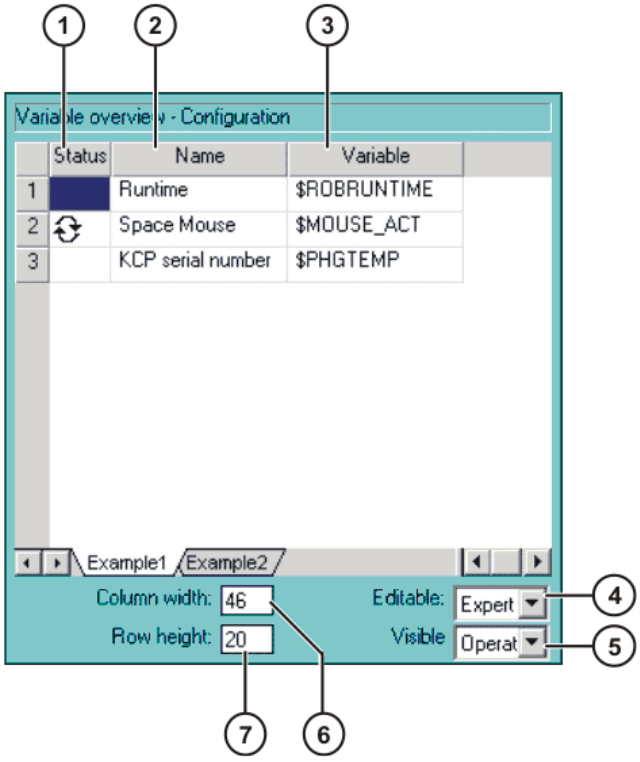
Фиг. 99 Видове координатни системи за роботи *KUKA*

- *настройване на режим „JOG“* – настройва се координатна система, по която се извършват движенията в този режим. Изборът на координатните системи за този режим са: за движение (положително или отрицателно) по декартова координатна система или по избрана ос.;
- *визуализация на работни параметри за диагностика и контрол* – настройват се помощни екрани с функции за мониторинг на работни параметри като: текуща позиция на инструмента или звената на робота в избраната координатна система, визуализация на цифрови и аналогови входове и изходи; визуализация и редактиране на системни променливи, използвани в програмите на робота, визуализация на информация за настройване на избраните координатни системи за инструмента, детайла и основата на робота, показване на информация за състоянието на робота и хардуерните елементи, отговорни за управлението на серводвигателите и др.;
- *нулиране на осите на робота* – извършва се винаги при начално пускане на робота. Също се налага да се извърши след минаване през сервизно обслужване и диагностика, смяна на двигател или редуктор, при подмяна на контролер в таблото за управление и др.;
- *калибриране на работния инструмент (крайния ефектор)* – присвоява се координатната система на инструмента към избрана точка от работния инструмент.;

Основни конфигурационни и работни параметри на операционната система KSS

- *конфигуриране на I/O драйвър* – конфигурирането се извършва в менюто ***Configure*** > ***I/O Driver*** > ***Reconfigure I/O Driver***;

- *промяна на името на работния инструмент (крайния ефектор)* – от меню ***Configure > Tool definition > Tool type*** се избира бутон ***Name***, въвежда се новото име и се потвърждава с ***OK***;
- *конфигуриране на системни променливи* – променливите, използвани в системния софтуер се визуализират и редактират. Могат да се групират във функционални групи. Опцията е достъпна за потребители на системата с ниво на достъп *"expert"*. Извършва се от менюто ***Monitor*** > ***Variable*** > ***Overview*** > ***Configure.*** Конфигурационният прозорец е показан на *фиг. 100*,



Фиг. 100 Конфигурационен прозорец с променливите, използвани в системния софтуер на *KUKA KR 150*

където:

1 – Статус на състоянието – показва дали системата автоматично ще направи ъпдейт, при промяна на стойността на променливата.

2 – Описание на функцията за която се използва променливата.

3 – Име на променливата.

4 – Ниво на потребител с права за редактиране на променливите от избраната група.

5 – Ниво на потребител с права за разглеждане на променливите от избраната група.

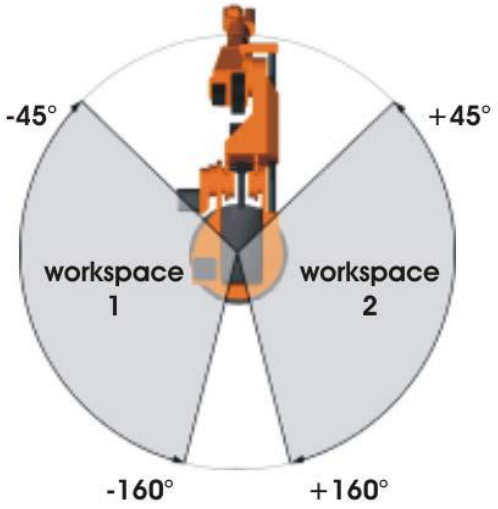
6 – Дължина на селектираната колона от таблицата.

7 – Дължина на селектирания ред от таблицата.

- *редуциране на времето за което системата се изключва* – времето за изключване на системата се настройва от менюто ***Configure > On/Off Options > Disable PowerOff Delay***;
- *промяна на парола* - влиза се последователно в ***Configure*** > ***User group,*** оттам в ***Log On*** и ***Change Pwd***;
- *настройки за работа със симулационни входове и изходи* – входовете и изходите могат да бъдат симулирани от софтуера на изследвания робот.;
- *конфигуриране на работно пространство* – чрез тази функционалност се задава защитено пространство, в което *ИУР* може да извършва своите работни движения,

без опасност от колизия с други обекти. Опционално се задават два типа работни пространства за робота – такива, в които той може да навлиза и такива, в които не трябва да навлиза.

Допълнителна възможност в софтуерното осигуряване на изследвания *УР* е и въвеждането на ограничения само за определени оси (фиг. 101), според спецификата на извършваните работни движения и кинематичните ограничения на робота.



Фиг. 101 Пример за въвеждане на ограничения за движенията на робота по определени оси

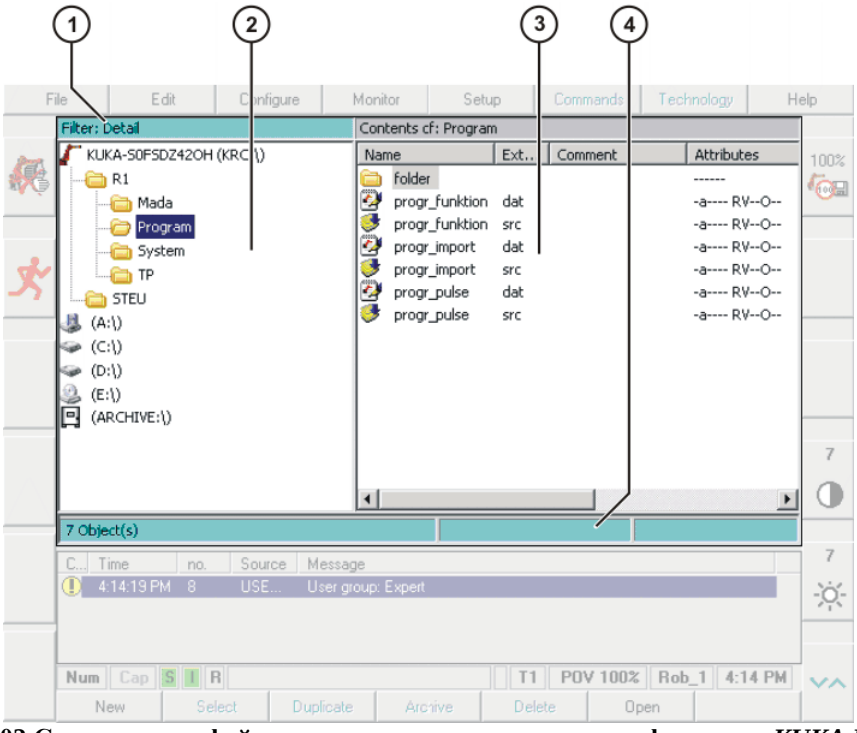
- *оптимизиране на цикловo време* – функция за определяне на максимално допустимите ускорения при движението на звената на робота. Промяната им е възможно да се извърши само от потребители с ниво *„expert“*;
- *задаване на лимити при дефиниране на точки от траекторията на движение на крайния ефектор* – ако функцията е активирана, оператори с ниво на достъп *“operator”* и *“user”* няма да могат да нанасят корекция на съществуващи точки от траекторията на движение на робота, ако излизат извън зададените в програмата лимити.
- *изключване на серводвигателя при прегряване на мотор-редукторната група* – във файла ***R1\Mada\$machine.dat*** се въвеждат стойности на променливите, контролиращи температурното нарастване в сервомоторите: ***$WARMUP_RED_VEL*** (включване/изключване на функцията за предпазване от прегряване с *true* или *false*), ***$WARMUP_TIME*** (максимално време за следене на нарастващия ток в намотките на двигателя, предизвикващ прегряването) и ***$COOLDOWN_TIME*** (време в което, роботът трябва да бъде изключен след установено прегряване);
- *управление на движението на робота, при колизия по някоя от задвижваните оси* – при колизия с обект в работната зона, управлението на робота ускорява задвижваната ос, за да се преодолее препятствието. За да се редуцира рискът от повреди е необходимо да се контролира ускорението на движещата се ос, чрез управление на съответния серводвигател. Функцията за управление на ускоренията в случай на колизия, позволява при излизането извън определен предварително зададен диапазон от стойности, управлението да задейства авариен стоп или да повика предварително въведена програма с последователност от действия, предвидени за подобни ситуации;
- *задаване на метод за извършване на движение назад* – в софтуерното осигуряване на избрания робот има два варианта за програмиране на движение назад, използвайки методите *„TRACE“* и *„SCAN“*. Методът *„TRACE“* записва

движението, извършвано при ход напред на звената на робота. При движение назад, записаните ходове се изпълняват в обратна последователност. Предимството на този метод е опростеният начин за записване на сложни движения и сравнително лесното им пресъздаване в обратен ход, без излишно усложняване на управлението. Основен недостатък е, че за да се извърши дадено движение назад, първо трябва да се извърши същото движение напред, което да бъде записано и пресъздадено в обратна последователност. В метода *„SCAN“* движенията се интерпретират от алгоритъма на програмата, отговаряща за движенията назад. Предимството му е, че могат да се извършват движения назад без да бъдат записвани предварително. Методът позволява да се използва паралелно с *„TRACE“* метода, което предоставя възможност за различни комбинации от програмирани ходове напред и назад. Основен недостатък на метода *„SCAN“* е, че не могат да се интерпретират по-сложни последователности от движения, свързани едно с друго.

- *конфигуриране на настройки за логин и автентикация в софтуера* – настройките се въвеждат във файла ***C:\KRC\HMI\Config\Authentication.config.***
- *конфигуриране на настройки за управление на ускоренията по задвижваните оси на робота* – с тази функция могат да бъдат задавани стойности на ускоренията, с които да се преодоляват препятствия по пътя на зададената траектория на движение.

Работа с файловия мениджър на софтуерното осигуряване

- *навигация на файловия мениджър* – структурата и разделението на екраните във файловия мениджър са показани на *фиг. 102*,



Фиг. 102 Структура на файловия мениджър, използван в софтуера на *KUKA KR 150*

където:

1 – Хедър – показва селектираните филтри за показване на директории и файлове.
2 – Екран с дървото на директориите.
3 – Екран с файлов списък.
4 – Лента на състоянието.

- *селектиране и показване на програми* – при селектиране и отваряне на програми, файловият мениджър се измества от редактираща програмна среда (програма-редактор) на софтуерното осигуряване. Една програма не може едновременно да бъде селектирана и отворена.
- *структура на програмата* – в *табл. 12* е показана обща структура на всяка една програма в софтуерното осифгуряване на изследвания робот.

Таблица 12 Обща структура на програмите в софтуера на *KUKA KR 150*

```
1 DEF my_program()
2 INI
3
4 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT
...
8 LIN point_5 CONT Vel= 2 m/s CPDAT1 Tool[3] Base[4]
...
14 PTP point_1 CONT Vel= 100 % PDAT1 Tool[3] Base[4]
...
20 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT
21
22 END
```

Описание на структурата по редовете, зададени в *табл. 12*:

1 – *DEF* редът е индикатор за името на програмата или съответно функцията (*с DEFFCT*).

2 – С *INI* се инициализират вътрешните променливи и параметри на програмата.

4 – Задаване на *HOME* позиция – програмно начало за изпълнение на командите.

8 – Задаване на движение по права линия с командата *LIN*.

14 – Задаване на движение от точка до точка с *PTP*.

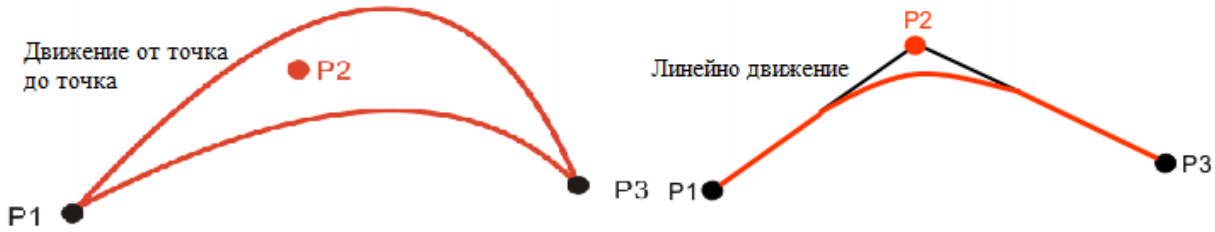
20 - Връщане до *HOME* позиция с движение от точка до точка *PTP*.

22 – Край на изпълнение на програмата с *END*.

- *Стартиране, редактиране и записване на програми* – всички програми могат да бъдат редактирани, стартирани и записвани с програмата-редактор на софтуерното осигуряване на изследвания робот *KUKA KR 150*.

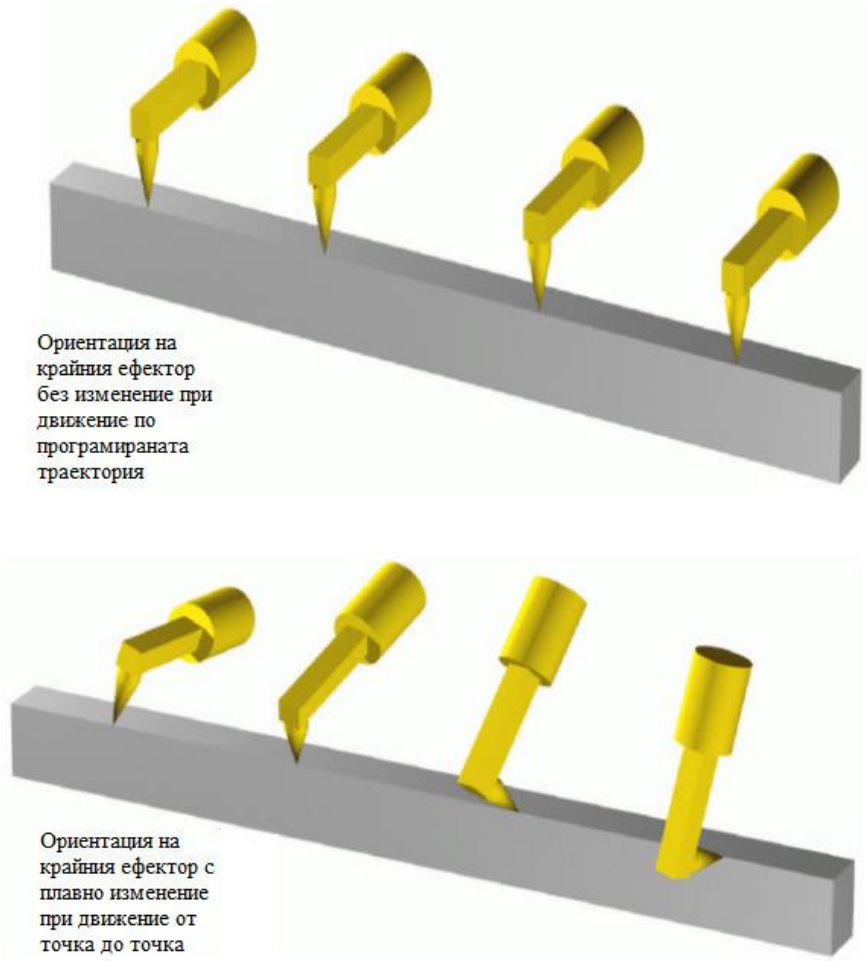
<u>*Съставяне на управляващи програми за изследвания робот*</u>

- *видове работни движения и позиционирания, които се дефинират в програмите на софтуерното осигуряване* – работните движения, извършвани от робота са следните:
  - *линейно движение* – движение по права линия *LIN*;
  - *кръгово движение* – движение по кръгова траектория *CIRC*;
  - *движение от точка до точка PTP* – в алгоритъма на програмата за изпълнение на този вид движение е заложено да се изпълни най-бързият път (който не е задължително да бъде най-краткият).
  - *движение по SPLINE траектория* – движение извършвано по сложна траектория, включваща изчисляването на по-сложни интерполационни алгоритми като хеликоидални, трохоидални и други комплексни интерполации.
  - *приблизително позициониране на точка от траекторията на движение* – движението се извършва не точно до зададените координати на точката, а около нея, в зависимост от зададения път на движение (*фиг. 103*).



Фиг. 103 Приблизително позициониране на избрана точка при движение от точка до точка и линейно движение

- *ориентация на инструмента при движение по програмираната траектория* – ориентацията е в зависимост от вида на избраното работно движение и може плавно да се променя в зависимост от моментната позиция на крайния ефектор (началото или края на програмираната траектория). Пример за такъв плавен преход е показан на *фиг. 104.*

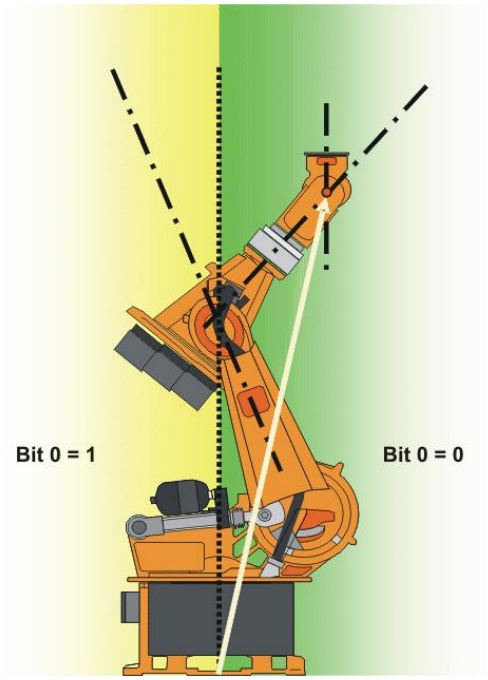


Фиг. 104 Ориентация на крайния ефектор в зависимост от позицията му при движение по програмираната траектория

- *еднозначно определяне на позицията на звената на робота при движение от точка до точка* – за едни и същи координати на зададената точка от програмираната траектория на движение, ставите на робота могат да заемат различно ъглово положение една спрямо друга. За да бъде определено еднозначно от софтуера кинематичното разположение на звената на робота - за всяка точка от програмираната траектория, се използват два параметъра: ***Status*** и ***Turn***. Параметърът ***Status*** записва в пет бита (*0 ÷4*) информацията за релативното положение на ставите на робота и така дефинира еднозначно разположението им в пространството. В *бит 0* се записва с *0* или *1* информацията за *X*-координатата на пресечната точка на оси *A4*, *A5* и *A6*. Стойност *1* на бита означава, че

пресечната точка е в зоната зад оста на симетрия на базовото звено на робота и по отрицателната полуос на *X* в основната координатна система, както е показано на *фиг. 105*. Стойност *0* на бита показва, че пресечната точка е на положителната полуос на *X* в основната координатна система. По подобен начин се записва информацията за ос *A3* в *бит 1,* за ос *A5* в *бит 2, бит 3* не се използва, а в *бит 4* се записва информация за начина по който са зададени координатите на зададената точка от траекторията на движение.

С параметъра ***Turn*** е възможно да се придвижат осите с ъгли по-големи от *+180°* или по-малки от *-180°*.



Фиг. 105 Еднозначно определяне на кинематичното разположение на ставите на изследвания робот

- *програмиране в ниво на потребител „user“* – потребителите на софтуерната система с ниво на достъп *„user“* имат права за:
  - задаване на имена на точки от траекторията на движение, на определени видове движения и др.;
  - програмиране на линейни и кръгови движения, и на движения от точка до точка;
  - програмиране на *„spline“* движения;
  - редактиране на параметри, свързани с програмираните движения;
  - редактиране на координатите на точките от зададената траектория на движение;
  - използване на логически команди за дигиталните и аналоговите входове и изходи.
- *програмиране в ниво на потребител „expert“* – потребителите на софтуерната система с ниво на достъп *„expert*“ имат права за:
  - достъп до всички системни и потребителски константи и променливи;
  - преглед на синтаксиса на програмния език *KRL*;
  - редактиране и използване на системните променливи в програмите на робота;
  - достъп с права за редакция до всички системни и конфигурационни файлове, отнасящи се до съставянето на управляващи програми;
  - програмиране на *„spline“* движения;
  - права да се редактират функциите на софтуера, отнасящи се до специални движения и контрол над определени характеристики - ускорение на осите, скорости на движения, задаване на специални точки по кривата на движение и др.

- достъп до и използване на всички аналогови и цифрови входове и изходи;
- използване на логически команди за дигиталните и аналоговите входове и изходи.
- редактиране на параметри, свързани с програмираните движения;
- редактиране на координатите на точките от зададената траектория на движение;
- съставяне на допълнителни подпрограми и функции;

3. Създаване на методики за изследване на *ИУР*

Основната цел, поставена за изпълнение е разработването на методики за иновативно модернизиране и ново специфично приложение на избрания типопредставител на *ИУР* в нови области - например леярската индустрия, дъговото заваряване и др.. Методиките са разработени и тествани успешно върху избрания робот. В следващите редове са представени трите разработени методики на избрания типопредставител на *ИУР* както седва:

- за механичните компоненти,
- за хардуерното оборудване,
- за софтуерното управление.

3.1. Създаване на методика за изследване на механичните компоненти

При разработването на методиката са взети под внимание следните основни съображения: моментно състояние на изследвания *УР*, обект на реинженеринг; възможността за оптимално използване на съществуващите в робота елементи, възли и сглобени единици; възможността за ефективна и икономически целесъобразна подмяна на износените и/или повредени части; съобразяване с областта на приложение, в която ще оперира робота. На база тези съображения е изградена методика за изследване на механичните компоненти на избрания типопредставител на *ИУР*, представена по-долу в текста.

I. Визуална инспекция на механичните компоненти и структурната цялост на избрания типопредставител на *ИУР*

В първия етап от методиката избраният типопредставител на *ИУР* се инспектира за външни дефекти и нарушени основни функционални характеристики, което се налага заради работата на робота при определени технологични условия от досегашната му експлоатация.

Проверката протича в следните стъпки:

1. *Основно почистване от натрупани върху него прах и други замърсители до пълна и ясна видимост на корпусните и основните детайли на ИУР (фиг. 106.а)*.
2. *Визуална инспекция за цялостност и здравина на корпусните детайли (фиг. 106.б)* - отливки или съставни заварени конструкции. При наличие на пукнатини или отчупени парчета на възлови места, нарушаващи целостта на робота или здравината на съответния детайл, робота се бракува за резервни части.
3. *Визуална проверка на всички двигатели за удари и наранявания по корпусите, фланците и куплунгите им (фиг. 106.г). Проверява се типът на двигателите (фиг. 106.в).*
4. *Визуална проверка на хидро-пневматичния механизъм за уравновесяване (фиг. 106.д) и отчитане на налягането на маслото при сгънато положение на механизма (фиг. 106.е)*.
5. *Отделяне на всички функционално здрави части, детайли и сглобени единици за резервни части и консумативи, при установяване на непригодност на робота за реинженеринг.*

Фиг. 106 Стъпки при извършване на визуална инспекция на механичната конструкция на избрания робот *KUKA KR-150*

II. Проверка на детайли, сглобени възли и компоненти за функционална и техническа изправност

1. *Демонтиране на всички мотори.*
2. *Механична ръчна проверка на двигателите* – проверяват се за хлабини или задържания при въртене на ротора на ръка.
3. *Механична проверка с подаване на номинално захранващо напрежение* - при задвижването на двигателите с номинални и максимални обороти се наблюдава за твърде силни вибрации или нехарактерни шумове.
4. *Механична проверка на отделните компоненти от двигателя* - проверяват се шлицевите съединения (фиг. 107) между шлицевия вал на двигателя и втулката, към която се присъединява. Шлицевите съединения трябва да бъдат без счупени или силно износени шлици и при реверсивно усукващо натоварване на ръка да отсъстват големи хлабини. Двата детайла свързани с такова съединение, трябва да могат плавно, без голямо усилие да се движат аксиално един спрямо друг. За целта съединенията се преглеждат визуално и се раздвижват на ръка за установяване на функционалната им годност.

Фиг. 107 Шлицеви съединения на изследваните сервомотори, част от карданените механизми на робота – шлицев вал и втулката към която се присъединява.

5. *Тестване на двигателите на стационарен стенд за тяхната електромеханична пригодност* – в случай на съмнения или забележки за неизправност, се извършва подмяна с проверен предварително двигател от същия тип, от предвидените за резервни части двигатели.

6. *Проверка на дефектирал двигател (ако има такъв)* - проверяват се възможностите за отстраняване на дефекта или използването на двигателя като източник за резервни части на други двигатели.

7. *Проверка на отделни компоненти от конструкцията на робота за механични повреди* – проверяват се лагерите, ремъците и зъбните колела от предавателните механизми за наличие на механични дефекти и видими отклонения и хлабини при въртене на отделните оси на изследвания робот.

III. Изследване на хлабините в редуциращите предавки и лагерните възли във всяка една от осите на робота

1. *Проверка на редуциращи предавки и лагерни възли* - след проверка за изправност на моторите и техните спирачки, както и на кардановите механизми куплирани към тях, се преминава към глобално изследване на цялата конструкция за хлабини в редуциращите предавки и лагерните възли на всяка една от шестте оси. Хлабините в предавките по посока на въртене не бива да надвишават допустимите стойности от *±1°*, предвид бъдещото им приложение в леярската индустрия и за други цели. Допустимите стойности са определени на база на дългогодишния опит на специалистите от фирмата-позувате *„Спесима*“ *ООД* в областта на специализираните системи за автоматизация на производството, в частност - решения за автоматизация на леярски технологични процеси. Проверката на лагерните възли (въртящите двоици), трябва да показва липса на хлабини във всяко едно от подвижните звена на кинематичната система.

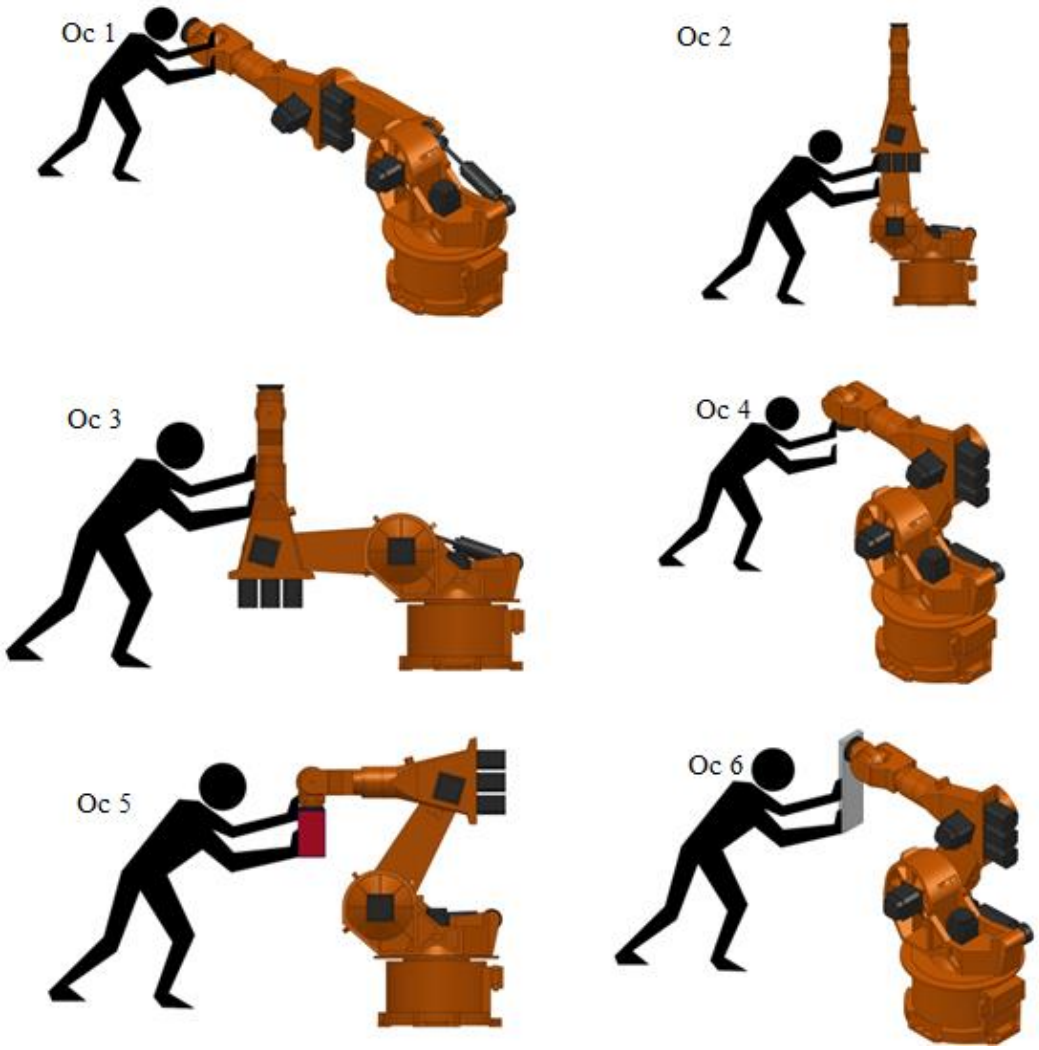
2. *Метод за изследване и измерване на хлабините в предавките* - измерването на хлабините в предавките се извършва, като се започне от *ос 1* и постепенно се стигне до *ос 6*, с монтирани двигатели и задействани спирачки, при което в идеалния случай (безхлабинни предавки) не би трябвало да има възможност звена от механизма, да се преместват едно спрямо друго. Принципът за измерване, който може да се приложи за всички оси е следният: едно от двете звена свързани със съответната ос на ротация се поставя така, че ако към него се приложи хоризонтална сила, то тя да предизвика максимален момент в тази ос по посока на движението й. При тази постановка се поставят два уреда за измерване на наклон с точност *±0,2°*, единият на едното звено, а другият на другото и се следят техните показания.

С хоризонтално натискане на ръка в едната, а после и в другата посока се обират хлабините в предавките, в двете посоки. Отчитайки показанията на двата уреда, разликата в преместванията показва съответната хлабина в предавките. На *фиг. 108* са показани постановките за шестте оси.

При установяване на завишени стойности на хлабините в някои от осите, е необходимо да се подменят съответните редуциращи предавки и/или лагери. Инспекцията на предавките към *оси 5 и 6* е свързана и с проверка на състоянието на зъбно-ремъчните предавки.

В повечето случаи ремъците се подменят с нови, защото са сравнително бързо износващи се елементи. При смяната им е необходимо да бъдат старателно и точно натегнати, посредством предвидените за това бъчвообразни ролки, които са на ексцентрични оси.

3. *Измерване на точността на позициониране на целия робот* - върху измерването на точността, влияние ще окаже не само състоянието на механичната конструкция, но и точността и прецизността на самото управление на универсалния робот. Предложен е следният метод за измерване: към фланеца на *ИУР*, предвиден за закрепване на крайния ефектор, се поставя специален прецизно изработен детайл с две сферични точки, които са достатъчно точно изработени и позиционирани една спрямо друга и спрямо координатната система на *ИУР*. С така монтирания измервателен детайл роботът се премества до определено зададена позиция в работното му пространство. В тази позиция върху корава стойка се поставят шест индикаторни часовници, с точност на отчитане *(0,01мм)*, като три от тях ще отчитат преместването на едната сферична точка *(A)*, в трите взаимноперпендикулярни направления на глобалната координатна система на *УР*. А другите три по същият начин ще следят другата сферична точка *(B)* на измервателния детайл.



Фиг. 108 Постановка за измерване на хлабините по шестте оси на робота

След нивелиране на *УР*, софтуерно му се задава да се премести в определена точка с координати в неговата координатна система и да ориентира измервателния детайл, успореден на една от осите от координатната система. Поставя се стойката с индикаторните часовници, които се нивелират, така че да измерват взаимното разположение на *двете сферични точки А и В*.

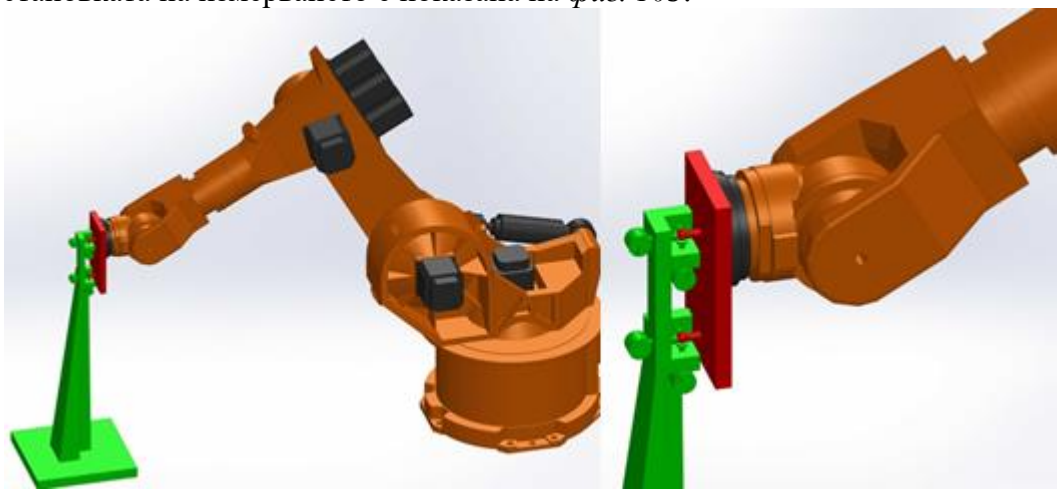
При така сформираната постановка се правят редица измервания за точност:

а) *отчитане на грешките при относителни премествания по трите оси и съответните ротации около тези оси* – постига се, като се зададат някакви премествания и се отчете грешката при реалното им изпълнение от робота;

б) *измерване на повтаряемостта на позиционирането* – задава се на робота преместване по една или по шестте оси на координатната система, след което се задава връщане обратно в първоначална позиция, в която се отчита грешката при реалното изпълнение на изследвания типопредставител;

в) *измервания върху множество точки от работното пространство на робота* – извършват се множество измервания върху различни точки от работната зона на робота по стъпки *а*) и *б),* след което резултатите се обработват статистически и се сформира глобална картина, за неточностите при позициониране и ориентиране на изследвания *ИУР*.

Постановката на измерването е показана на *фиг. 109*.



Фиг. 109 Постановка за измерване на точността на позициониране на целия робот

IV. Оценка на извършеното изследване и подготовка за реинженеринг на изследвания типопредставител на *ИУР*

1. *Оценка на пригодността на отделни детайли и възли от механичната конструкция на робота за планираното му бъдещо приложение* – всички годни детайли и възли се запазват и преизползват при планирания реинженеринг на робота.

2. *Оценка на установени повредени детайли и възли* –в случай, че е възможно да се преизползват след извършване на ремонт, повредените детайли се ремонтират и включват при извършване на реинженеринг върху изследвания робот. Негодните части се демонтират, а където е възможно (сглобени възли) се разглобяват и използват съставните им елементи за резервни части.

3. *Планиране на количества на бързоизносващи се консумативи и материали, които ще бъдат често подменяни при бъдеща експлоатация на робота.*

Извод от извършеното изследване на типопредставителя на ИУР - в случай, че съществуват отклонения в точността по-големи от допустимите за съответния технологичен процес, в който изследваният робот ще намери приложение след реинженеринга, следва да се установи в по-задълбочено изследване откъде се получават тези несъответствия, между

зададени и измерени стойности. Това биха могли да бъдат грешки от управлението и/или натрупване на такива от механичната система на робота.

3.2. Създаване на методика за изследване на хардуера за управление на робота и използваните сензори

След извършеното изследване на хардуера на избрания типопредставител на *ИУР,* се пристъпи към разработване на методика за проверка за функционалност на хардуерната конфигурация и за съответствие на техническите параметри, заложени в нея.

Към методиката са предявени следните изисквания:

- максимално отразяване на технологичния цикъл на изследвания робот;
- еднозначност на измерваните параметри;
- достоверност на проверката;
- максимален обхват на проверяваните параметри;
- осигуряване на стандартни базови условия за провеждане на измерванията и проверките.

На база тези изисквания е изградена методика за изследване на хардуерната конфигурация на избрания типопредставител на *ИУР*. Заложените контролни параметри и стойности са базирани на дългогодишния опит на фирма *„Електроинвент“ ООД* в изследването, разработването и производството на изделия в областта на електротехниката и силовата електроника. Разработената методика е показана в следващите редове.

I. Визуална инспекция на основни хардуерни компоненти на изследвания *ИУР*

На този етап се оглежда таблото за управление на робота за видими външни дефекти и повреди.

Проверката протича в следните стъпки:

1. *Основно почистване на таблото и хардуерните елементи в него от натрупани прах и други замърсители до пълна и ясна видимост.*
2. *Визуална инспекция за цялостност и здравина на хардуерните елементи в таблото*.
3. *Визуална проверка за видими дефекти във функционалността на елементите и връзките между тях.*
4. *Почистване и визуална проверка за изправността на сензорите, част от актуаторната система за контрол и сервоуправление на движенията на робота*.

II. Проверка за къси съединения на основни захранващи модули

1. *Проверка на главното захранване на таблото и управляващата система за отсъствие на къси съединения* – протича в няколко стъпки, като се спазват следните условия: изключено захранване на таблото за управление и изключен главен прекъсвач. Последователността на извършване на проверката е следната:
   - 1.1. Проверка на трите захранващи фази: за наличие на къси съединения - между фазите, между фазите и нулевия проводник (*N*), между фазите и корпуса (замасяването *PE*).
   - 1.2. Проверка за късо съединение между нулевия проводник (*N*) и корпус (*PE*).

За приемлив резултат за отсъствие на къси съединения се приема измерено съпротивление ≥ 1 мΩ.

Примерна таблица за нанасяне на резултатите от извършените измервания е показаната по-долу *табл. 13*.

Таблица 13 Измервания за отсъствие на къси съединения.

Измерване за наличие на къси съединения между:	R > 1 MΩ	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
Фаза L1 - Фаза L2		
Фаза L1 - Фаза L3		
Фаза L2 - Фаза L3		
--		
Фаза L1 - N		
--		
Фаза L1 - PE		
--		
N – PE		

В колона две се маркира със знак √ (да) или X (не) за съответствието на резултата от изпитанието със заложеното изискване.

Проверката се извършва със специализиран измервателен уред – мегаомметър или цифров тестер за измерване на изолационно съпротивление.

2. *Проверка на входните клеми на захранващия блок за 24V DC на управляващата система за отсъствие на къси съединения.*

2.1. Проверка на входния фазов проводник *(L)* на токоизправителя: за наличие на къси съединения - между него и нулевия проводник *(N)*, между него и корпуса (*замасяването PE*) и между него и вторичното изправено напрежение *24V DC* – към клема *-24V DC* и към клема *+24V DC*.

2.2. Проверка на клемата на нулевия проводник *(N)* на токоизправителя: за наличие на къси съединения - между него и корпуса на таблото за управление *(PE)* и между него и вторичното изправено напрежение *24V DC* – към клема *-24V DC* и към клема *+24V DC*.

Примерна таблица за нанасяне на резултатите от извършените измервания за отсъствие на къси съединения в захранващия блок на управляващата система е показаната по-долу *табл. 14*.

Таблица 14 Измервания за отсъствие на къси съединения в захранващия блок на управляващата система

Измерване за наличие на къси съединения между:	R > 1 MΩ	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
Клема L - N		
Клема L - PE		
Клема L - Клема -24VDC		
Клема L - Клема +24VDC		
Клема N - PE		
Клема N - Клема -24VDC		
Клема N - Клема +24VDC		

В колона две се маркира със знак √ (да) или X (не) за съответствието на резултата от изпитанието със заложеното изискване.

Проверката се извършва със специализиран измервателен уред – мегаомметър или цифров тестер за измерване на изолационно съпротивление.

3. *Проверка на изходните клеми на захранващия блок (±24V DC) на управляващата система за отсъствие на къси съединения* - необходимо условие за извършване на измерването е предпазителите за съответното *+24V DC* напрежение между захранващия блок и самите клеми да са изключени.

3.1. Проверка на клема *-24V DC*: за наличие на къси съединения - между клемата и нулевия проводник *(N)*, между клемата и корпуса (*замасяването PE*) и между клемата и вторичното изправено напрежение *+24V DC* – към клема *+24V DC* на управляващия блок *(PLC)* и към клема *+24V DC*, захранваща всички датчици и аварийни вериги.

3.2. Проверка на клема *+24V DC* на управляващия блок *(PLC)*: за наличие на къси съединения - между клемата и нулевия проводник *(N)*, между клемата и корпуса (*замасяването PE*) и между клемата и вторичното изправено напрежение *+24V DC* – към клема *+24V DC*, захранваща всички датчици и аварийни вериги.

3.3. Проверка на клема *+24V DC*: за наличие на къси съединения - между клемата и нулевия проводник *(N)*, между клемата и корпуса (*замасяването PE*) и между клемата и вторичното изправено напрежение *+24V DC*.

За нанасяне на резултатите от изпитанията се използват таблици - аналогични на описаните вече по-горе *табл. 13* и *табл. 14*.

III. Проверка за съответствие на захранващото напрежение на таблото за управление

1. *Проверка на входното захранващо трифазно напрежение* - измерването се извършва при свързан захранващ кабел към входните клеми на таблото за управление на робота. Всички предпазители трябва да са в изключено (безопасно) положение. Последователността на измерените стойности е показана в *табл. 15*.

Таблица 15 Измерване на входно захранващо трифазно напрежение

Измерване на входното захранващо напрежение между:		**Стандартна стойност [VAC]**	**Измерена стойност [VAC]**	**Допустим толеранс на измереното напрежение**
Фаза L1	Фаза L2	**400**		+10% -15%
Фаза L1	Фаза L3	**400**		+10% -15%
Фаза L2	Фаза L3	**400**		+10% -15%
Фаза L1	N	**400**		+10% -15%
Фаза L2	N	**400**		+10% -15%
Фаза L3	N	**400**		+10% -15%

Проверката се извършва с измервателен уред – прецизен мултицет, с повече от три разряда. В случай, че някоя от измерените стойности е извън допустимия толеранс, се извършва проверка на свързването към захранващата мрежа. При установяване на стойност извън допустимия толеранс, измерванията се прекъсват. След откриване и отстраняване на проблема се прави ново измерване.

2. *Проверка на изправеното напрежение 24V DC на изхода на захранващия блок* – протича в няколко стъпки.

2.1. Проверка на празен ход – извършва се при определени условия: да бъде изключена веригата на изправеното напрежение от захранващия блок (всички предпазители на *24V DC* веригата са изключени) и измерването да бъде върху клемите на захранващия блок. Диапазонът на измереното напрежение трябва да бъде в границите *24V DC ± 0.5%* (от *23.9V* до *24.1V*). В случай, че измереното напрежение е извън границите на допустимия толеранс, е необходимо да се извърши настройка - когато захранващият блок има тази функционалност, напрежението да е в рамките на допустимия толеранс.

2.2. Проверка при включени вериги на захранванията на управляващия блок *(PLC)* и сензорите - извършва се при определени условия: да бъде изключена веригата на изправеното напрежение от захранващия блок

(всички предпазители на *24V DC* веригата са изключени). Диапазонът на измереното напрежение трябва да бъде в границите *24V DC ± 0.5%* (от *23.9V* до *24.1V*). В случай, че измереното напрежение е извън границите на допустимия толеранс, е необходимо да се извърши настройка - когато захранващият блок има тази функционалност, напрежението да е в рамките на допустимия толеранс.

2.3. Проверка на клемите за вентилаторите на таблото за управление – извършва се, чрез измерване на напрежението (*24V DC*) в клемите на захранването на вентилаторите в таблото за управление.

2.4. Проверка на захранването на сервозадвижванията – измерването се извършва при включено захранване на таблото за управление. Проверяват се входните клеми на всеки един от инверторите на сервозадвижванията на робота. За всеки инвертор захранващите напрежения и техният толеранс е необходимо да съответстват на номиналните данни, регламентирани в съответното ръководство за монтаж и пуск на изделието. Данните от измерванията се попълват в примерна таблица, като показаната *табл. 16*.

Таблица 16 Измерване на захранванията на инверторите за сервозадвижванията на изследвания робот

Измерване на входното захранващо напрежение между:	**Напрежение [V]**	**Забележка (в случай, че има отклонение)**
Инвертор 1/ Клема L - N		
Инвертор 2/ Клема L - N		
Инвертор n / Клема L - N		

IV. Проверка на свързването и функционалността на серводвигателите на робота

Преди да се пуснат сервозадвижванията и хардуерната конфигурация за управлението им, е необходимо да се провери правилното свързване на серводвигателите, да се определят техните посоки на движение и да се сфазира обратната връзка по скорост на всеки мотор. Проверката се извършва в следната последователност:

1. *Декуплиране на всички серводвигатели от механиката, с цел предотвратяване на механични повреди по робота*.

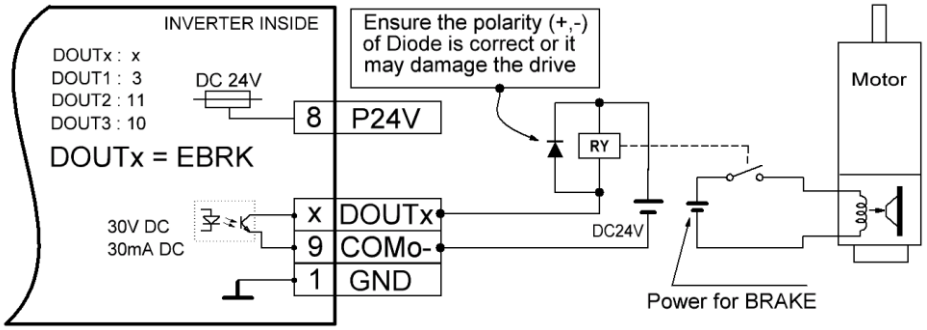
2. *Свързване на всеки серводвигател със съответния инвертор* – свързват се *DC* спирачките, силовите кабели на серводвигателите и информационният кабел за обратна връзка по скорост (позиция) - резолвер или пулскодер.

3. *Проверка на електромагнитните спирачки* - изходният сигнал *„Electromagnetic Brake“* в хардуерната конфигурация е предназначен за управление на куплираната към вала на серводвигателя електромагнитна спирачка. Активирането на сигнала освобождава спирачката. Необходимо условие за освобождаване на спирачката е едновременно да се активират: изходна функция *„READY“* и входна функция *„RUN“*, както и да се въведе параметър F.10 (*Brake OFF*).

Други случаи в които спирачката се задейства са:

- при аварийно състояние;
- при отпадане на входна функция *„RUN“* и при зададен начин на спиране по инерция - *d.05 = 0 (StopMode);*
- при отпадане на входна функция *„RUN“* и активна изходна функция *„READY“* с управляемо спиране *d.05 = 1 (StopMode)* - спирачката се задейства, когато скоростта на вала на двигателя достигне прага зададен от параметър *F.11 (Brake ON).*

Управлението на електромагнитната спирачка се осъществява чрез цифров изход на инвертора, показан на *фиг. 110*.



Фиг. 110 Цифров изход на инвертора за управление на серводвигателите

Проверката за сработването на електромагнитните спирачки на всички серводвигатели се прави, чрез последователно активиране на съответния изход на инверторите и ръчна проверка за свободно движение на вала на моторите.

Проверката за работоспособността на електромагнитните спирачки се извършва при следните обстоятелства:

- при неактивирана входна функция *„RUN“* и блокиран вал на сервомотора;
- стартиране на комуникационната програма;
- при активиране на функции *„RUN“* и *„JOG“*. Двигателят се върти контролирано, а токът на серводвигателя (по време на работа на празен ход) е минимален < *200mA*.

Данните от проверката се попълват в примерна таблица, като показаната *табл. 17*.

Таблица 17 Данни за проверката за сработването на електромагнитната спирачка

Проверка за сработването на електромагнитна спирачка за сервоос:	**Сработване Да/не**	**Забележка (в случай, че има отклонение)**
Сервоос АХ 1		
Сервоос АХ 2		
Сервоос АХ 3		
……..		
Сервоос АХ n		

4. *Проверка посоката на въртене на серводвигателите* – проверяват се за т.н. сфазиране. За целта се преминава през следните стъпки:

4.1. Въвеждат се номиналните данни на серводвигателя в сервопреобразувателя – това са данните за ток, напрежение, брой полюси и тип на обратната връзка: резолвер или пулскодер.

4.2. Избира се режимът на настройване – ръчен или автоматичен. За ръчна настройка се селектира параметъра *„тип на мотора = 1“*. Активира се функцията *„RUN“*, серводвигателят се намагнитва и остава в положение, съответстващо на *„Position offset = 0“*. Деактивира се функцията *„RUN“* и се задава параметър *„тип на мотора = 0“*. Прочита се стойността на *„Position Feedback“* и се присвоява с обратен знак на *„Position offset“*. За автоматична настройка се избира команда *„Autotunning Rotor position“*. Двигателят извършва няколко оборота и записва стойността на *„Position offset“*.

4.3.След приключване на процедурата по настройка на параметъра *„Position offset“* (дефазирането на двигателя и резолвера) се активират функциите *„RUN“*, *„JOG+“* или *„JOG-“* за тестово въртене на двигателя.

За положителна посока на въртене на двигателя се възприема движението обратно на часовниковата стрелка, погледнато откъм вала на мотора. За отрицателна посока на въртене на двигателя се възприема движението по часовниковата стрелка, погледнато откъм вала на мотора.

Ако двигателят се върти нормално със скорост зададена от параметъра *„JOGSpeed“*, но обратно на правилото за въртене, е нужно:

- да се деактивират функциите *„RUN“* и *„JOG“*, за да се прекрати движението;
- да разменят две от фазите (*U,V,W*) на двигателя;
- да се извърши отначало процедурата за настройване на *„Position offset“*.

Ако двигателят се върти с максимална скорост неконтролируемо или изключи по сработена защита - това е знак за *ПОВ* (положителна обратна връзка) по скорост. В този случай е необходимо:

- да се промени нулевият бит на параметър *„GenCMDWrd*“ за смяна на посоката на *ОВ*.
- да разменят две от фазите (*U,V,W*) на двигателя;
- да се извърши отначало процедурата за настройване на *„Position offset“*.

Данните от проверката се попълват в примерна таблица, като показаната табл. 18.

Таблица 18. Проверка на посоката на въртене на серводвигателите, свързани със сервоуправленията

Проверка на посоката на въртене на серводвигателите за сервоос:	**Положителна посока на въртене да / не**	**Забележка (в случай, че има отклонение)**
Сервоос АХ 1		
Сервоос АХ 2		
Сервоос АХ 3		
……..		
Сервоос АХ n		

Посоката на въртене на серводвигателите (положителна/отрицателна) за всяка ос на робота е маркирана върху механиката на съответната ос на робота. Посоките са условни и може да не съответстват с правилото за проверка на посоката на въртене на сервоосите. Необходимо е да се съобразят посоките на въртене на сервозадвижванията и сервоосите в комплект, свързани с механиката на робота с условно приетите посоки на въртене за всяка ос на изследвания *УР* (положителна/отрицателна).

3.3. Разработване на методика за изследване на софтуера

Изследването на софтуера на избрания типопредставител на *ИУР KUKA KR 150* е основно свързано с определянето на характеристиките и функционалността на системата за управление. На тази база е разработена методика за изпитание на софтуера на изследвания *УР*, базирана на проверка на функционалностите, които управлението на робота предоставя. Разработената и тестваната успешно методика е представена по-долу.

I. Обща инспекция за функционалността на софтуерното и системното осигуряване

1. *Начална проверка за функционалността и необходимостта от преинсталация на софтуера* - при закупуване роботът идва с инсталиран и конфигуриран софтуер и преинсталация се налага само в случаите на нарушени системни функции и/или повреда в

хардуерното и софтуерното осигуряване – например при повреда или замяна на основни хардуерни компоненти като твърдия диск, или други елементи, пряко свързани със системната информация за софтуера на робота. При необходимост от инсталация на софтуера на изследвания робот *KUKA KR 150* е необходимо да функционират всички компоненти от хардуерната конфигурация на робота или да бъдат заменени със съответните аналози. Инсталацията се извършва чрез *CD/DVD ROM* устройство или се адаптира през BIOS на системния софтуер - функция за прочитане и зареждане на операционната система от *USB Flashdrive* устройство.

2. *Проверка на функционалността на HMI интерфейса*;

3. *Проверка на началните конфигурационни параметри и настройки за стартиране на софтуера на изследвания робот* – това са настройките и параметрите, необходими на системата за управление да стартира успешно и да зареди програмното и системното осигуряване на софтуера на робот *KUKA KR 150*. Проверката преминава през няколко стъпки:

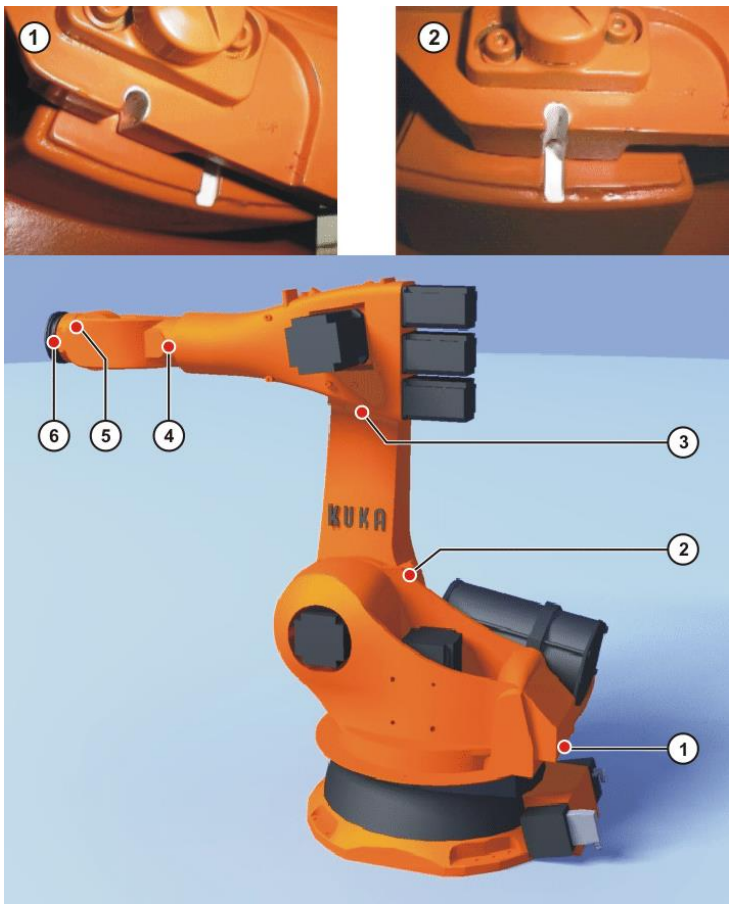
- проверка за коректно въведени машинни данни, настройки и конфигурационни параметри (*machine data*) – проверката се извършва в меню ***Setup*** > ***Robot data***. При отворен прозорец ***Robot data*** се избира ***Machine data***;
- първоначално прехвърляне на машинни данни, настройки и конфигурационни параметри от твърдия диск до *RDC* устройство – прехвърлянето се извършва в меню ***Setup*** > ***Robot data***. Избира се ***Hard Disc*** и се потвърждава с ***OK***;
- да се извърши отначало процедурата за настройване на „Position offset“.

4. *Извеждане на робота в нулева позиция* (*home position, mastering, юстиране*) - за да бъде възможно и разпознаваемо от софтуера движението на всяко звено на робота в целия работен диапазон на определена става, е необходимо преди стартиране - роботът да бъде поставен в изходна (*home*) позиция. За целта се синхронизират софтуерната и механичната нула на робота за всяка една от осите (*фиг. 111*) [50]. Такава синхронизация между механиката и софтуерното осигуряване на изследвания робот е необходима всеки път, когато:

- роботът се пуска за пръв път в експлоатация;
- е проведена сервизна поддръжка и ремонт, при която роботът губи данните за своята нулева позиция (при смяна на сервомотор или друга част от задвижващата или актуаторната система);
- роботът е задвижен, без участието на контролерите от сервосистемата за управление;
- роботът е имал колизия с външни елементи или при рязко спиране след движения със скорости над *250 мм/с*;

Има два начина за въвеждане на робота в нулева позиция или т.нар. *„mastering“*:

- с електронно измервателно устройство (*фиг. 112.а*) – осите на робота се задвижват и синхронизират автоматично от контролерите на управляващата система. Извършва се нулиране на осите с и без товар. Възможно е да се запазят няколко позиции, в зависимост от товара, с който изследваният робот трябва да се задвижи;
- с електро-механичен датчик (*фиг. 112.б*) – роботът се раздвижва в ръчно управление от оператора на машината. Извършва се винаги с товар и не е възможно да се запазят няколко позиции с различно натоварване на робота;

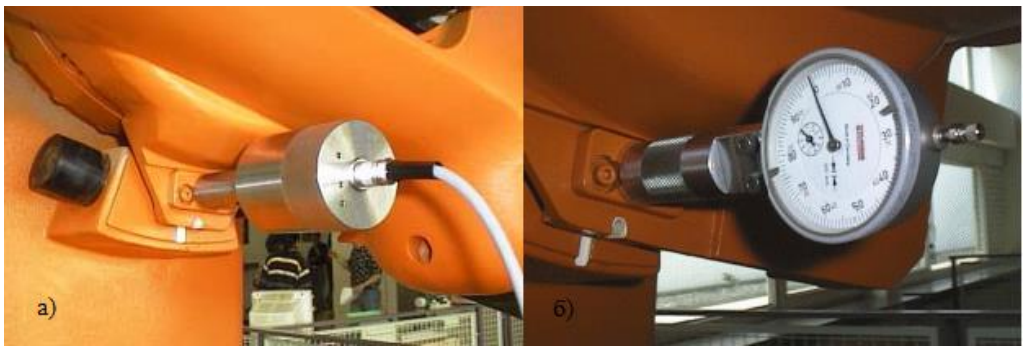


Фиг. 111 Механични нули за всяка ос за синхронизиране със софтуерната нула на програмното осигуряване, преди първоначално пускане на робота

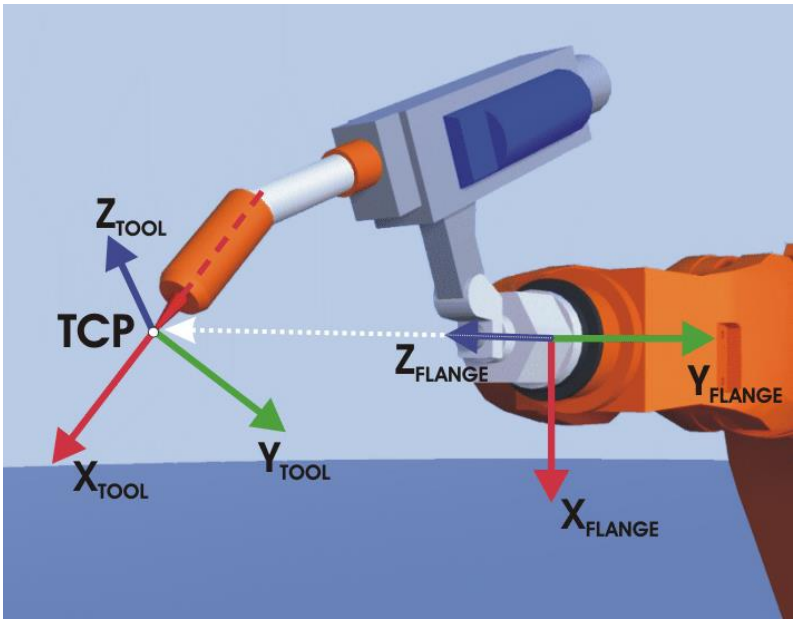
Нулирането на осите е необходимо всеки път, когато даден *ИУР* – обект на реинженеринг, е пускан за пръв път след закупуването му. След нулирането на осите на изследвания робот, информацията трябва да бъде съхранена и използвана като изходна позиция за следващо стартиране и задвижване. За съхраняване на данните за нулирането се влиза в ***Setup > Master > Save current data***.

5. *Инспекция на функционалността „калибриране на работния инструмент“* – при калибрирането началото на координатната система на инструмента се присвоява към определена точка от него – връх на инструмента (*TCP – Tool Center Point*) (*фиг. 113*). Обикновено тази точка съвпада с пресечната точка на оста на симетрия на инструмента (крайния ефектор) и най-външната му работна повърхнина. В случай, че софтуерното осигуряване поддържа тази функция, предимствата за управлението на робота ще бъдат следните:

- работният инструмент (крайният ефектор) ще може да се движи по права линия, по оста си на симетрия (*ос Z*);
- инструментът ще може да извършва ротация около началото на координатната му система, без да се изменят координатите на самия връх на инструмента.



Фиг. 112 Нулиране на осите на изследвания робот *KUKA KR 150*
а) с електронно измервателно устройство б) с електро-механичен датчик



Фиг. 113 Определяне на началото на координатната система на работния инструмент (крайния ефектор) за робот *KUKA KR 150*

След извършване на всички стъпки по началната проверка за функционалността на софтуерното и системното осигуряване, може да се пристъпи към изследване на програмното осигуряване и да се анализира доколко съответства на възможностите, които по документация то предлага при съставяне на управляващи програми за контрол на движенията на робота.

Проверка на основни функции за съставяне на нови управляващи програми със съответни режими на работа

1. *Проверка на софтуерната система за възможностите ѝ за автентикация* – извършва се пробно логване към системата с различните права на потребители: *„operator“*, *„user“*, *„expert“* и *„administrator“*. Проверяват се правата и достъпа на всеки от логваните потребители.
2. *Проверка на функционалността на файловия мениджър за достъпване до директории и файлове* – селектират се програми, редактират се и се пускат за пробно изпълнение. Проверката се извършва с правата за достъп на всяка една от групите потребители;
3. *Проверка на основни конфигурационни параметри и функции на софтуерното осигуряване*– това са параметри и функции, отнасящи се до конфигурирането и настройването на: *I/O* драйвери, входове и изходи, системни променливи и константи, дефиниране на работни пространства, оптимизация на циклови времена, ускорения по

задвижваните оси и други функционалности, изброени в *Ф3.3ад.2Д2* като – „Базови настройки и конфигурация на операционната система *KSS*, необходими за съставяне на управляващи програми на робота“;

4. Проверка на програмираните движения на робота – съставят се няколко прости управляващи програми, с цел да се провери съответствието между въведените стойности в програмата и реалното движение на звената на робота. Тестват се движенията по права линия, по кръгова траектория, от точка до точка и траекторното движение по зададена *SPLINE* линия. Проверката се извършва при автентикация на всички потребители в системата. Оглежда се за видими отклонения от зададения път на движение на крайния ефектор. На този етап може да се извършат прости контролни измервания за съответствие на програмирана и реална траектория на движение, която описва върхът на монтирания към шеста ос на робота инструмент, чрез предварително поставени репери.

При наличието на отклонения от зададените траектории на движение или неизправности в софтуерното осигуряване, които са видими – тогава се смята, че управлението трябва да се замени частично или напълно с нов софтуер и съответно с функционални възможности, покриващи изискванията за бъдещата експлоатация на робота.

За съставяне на по-прецизна оценка на отклонението между програмното и реалното движение на звената на робота, е необходимо да се направи изследване и анализ на математическия модел, имплементиран в софтуерното осигуряване на изследвания *ИУР*, а получените резултати да се проверят експериментално. Изследването е необходимо като основен качествен показател за годността на системното софтуерно осигуряване в условията на планираното бъдещо приложение на робота. В повечето случаи новата област на приложение на робота обуславя частична или пълна замяна на използвания софтуер, поради спецификата на бъдещите работни и експлоатационни условия.

3.4. Изследване и анализ на математическия модел, имплементиран в софтуера, чрез експериментална проверка на правата и обратната задача на кинематиката

1. *Оценка на математическия модел за решаване на правата задача на кинематиката за изследвания робот* - правата кинематична задача има само едно възможно решение след матричните преобразувания, защото всеки набор от ъглите на отделните звена отговаря на една единствена позиция в *картезианската координатна система*. Това предоставя възможност за сравнение на аналитичните решения, получени посредством математическите изчисления и реалният експеримент извършен с робота, чрез намирането на стандартното отклонение на резултатите.

След извършване на изчисленията се получава набор от стойности (*x, y, z* за транслацията в *mm* и *a, b, c* за ориентацията в *градуси*). Получените стойности са използвани в следната формула за изчисляване на стандартното отклонение:

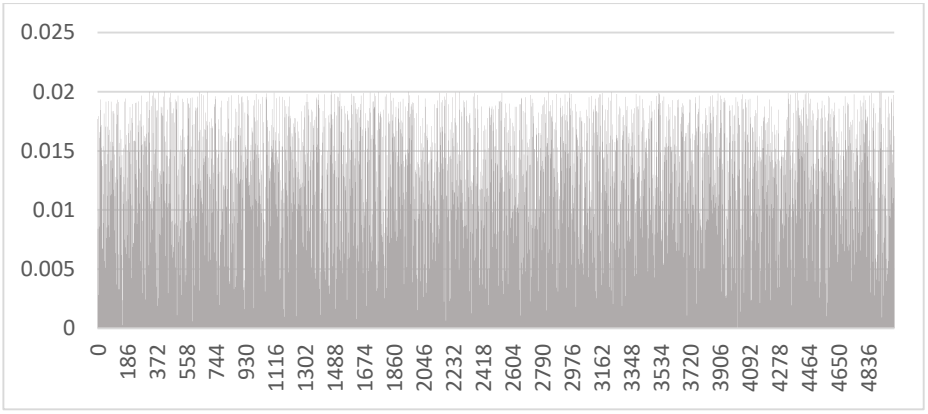
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(f_{ai} - f_{ri})^2},$$

където стандартното отклонение за едно измерване с набор от стойности (*x, y, z, a, b, c*), е получено като разлика между аналитично получените стойности *(f_a)* и измерените експериментално стойности *(f_r)*.

За целите на изследването са извършени серия от експериментални проверки на решението на правата кинематична задача, за различни позиции на робота (*фиг. 114*). Изведен е усреднен резултат за стандартното отклонение:

$$\sigma_N = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \approx 0.02.$$

Вижда се, че за транслационните части се наблюдава отклонение от порядъка на *0.02 mm* между изчислените и експериментално получените стойности. За ориентацията отклонението е приблизително *0.02°*.



Фиг. 114 Експериментални резултати от проверката на решението на правата задача в кинематиката за изследвания робот *KUKA KR 150*

2. *Оценка на математическия модел за решаване на обратната задача на кинематиката за изследвания робот*

Основният проблем при решаването на обратната задача в кинематиката е да се избере оптималното решение за траекторията на движение на робота, необходима за достигане на крайния ефектор до координатите на зададената точка. Движението може да бъде извършено с различни по сложност и дължина траектории, което води до многовариантност и комплексност при определяне на ъглите на трансформация на различните звена от изследвания робот *KUKA KR 150*.

За оптимално решение при избор на траектория на движение се счита това, с най-малка промяна на ъглите на трансформация на отделните звена на робота. Оценката на математическия модел за решаването на обратната задача, имплементиран в софтуерното осигуряване на избрания *УР*, е необходимо да се базира на проверката за избор на оптимално решение. Ако $\theta_i^{(0)}$ е минималната трансформация на ъглите на звената на робота за текущото му положение, то отклонението δ_i на всяко звено, може да се изчисли за всяко възможно решение и да се избере това с минималното отклонение.

$\delta_i = \sum_{n=1}^{6} \omega_n \left| \theta_{n,i}^{(0)} - \theta_{n,i} \right|,$

където $\omega_n = 6 - n$ е коефициент на тежест на звеното, което означава, че трансформацията на първата връзка, има по-голяма тежест от трансформацията на останалите.

Изчислената стойност по дадената зависимост се сравнява, с реалното движение на робота при едни и същи координати на крайната точка. За приемливо се счита отклонение от оптималната стойност *до 2°* за ъглите на трансформация на отделните звена на *KUKA KR 150*. Допустимите стойности са определени на база на дългогодишния опит на специалистите от фирмата-потребител *„Спесима“ ООД* в областта на специализираните системи за автоматизация на производството, в частност - решения за автоматизация на леярски технологични процеси.

3.5. Създаване на концепция за цялостен реинженеринг на избрания типопредставител на ИУР

В дейността е създадена концепция за цялостен реинженеринг на робота. В тази концепция е установено, че заложените за изпълнение цели са изпълнени. На база получените резултати е изградена стабилна основа за икономически изгоден, екологично чист и енергийно ефективен индустриален реинженеринг на индустриални универсални роботи и насочването им от „вторичния“ пазар на роботи към области с друго индустриално приложение. В резултат от изпълнението на поставените цели са направени някои съществени аналитични инженерни разработки, засягащи развитието на идейната концепция, заложена в изследването и в частност бъдещата му комерсиализация:

- извършено е детайлно проучване и инженерно изследване на механичната, хардуерната и софтуерната система на избрания типопредставител на *ИУР* – робот *KUKA KR 150*;
- изследван е динамичният модел на избрания робот;
- представен е математическият апарат за решаване на правата и обратната задача на кинематиката за изследвания представител на *ИУР;*
- създадени са методики за изследване на механиката, хардуера и софтуера на *KUKA KR 150.*

Отчетено е, че реализацията успешно предоставя възможности за развитието в няколко основни направления за цялостен реинженеринг на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR 150*, което доведе до следните резултати:

1. Разработката успешно отговори на очакванията на участниците в нея: потребител – *фирма Спесима ООД* и подизпълнител – *Електроинвент ООД*, за диверсификация на продуктите, увеличаване на производствената номенклатура и конкурентоспособност в страната и чужбина.
2. Индустриалното проучване, методиките за изследване и инженерният анализ върху конструкцията, хардуера и софтуера на изследвания типопредставител *KUKA KR 150,* успешно ще послужат като основа за иновативно модернизиране и ново специфично приложение на шестосни „антропоморфни“ индустриални универсални роботи, с насоченост в областта на леярската, химическата, опаковачната, транспортна и др. индустрии.
3. Комерсиализация на резултата - резултатите от него, могат да се използват в България и региона, където приложението на универсални роботи е затруднено, поради високата цена и липсата на инвестиции. Това създава необходимата предпоставка при по-малки разходи, индустриалните предприятия да повишат значително своята производителност, а оттам и своята конкурентоспособност.
4. Интегриране на интелигентни вградени компоненти и системи, облачни и паралелни изчисления, виртуални симулации, математически модели за решаване на правата и обратната задача на кинематиката в реално време, многокритериална оптимизация и ново поколение интерфейс, спомагащ за интелигентно и дистанционно управление.
5. Създаване на предпоставки за изграждане и патентоване на нови продукти и технологични решения.
6. Създадените методики и идейната основа за осъществяване на реинженеринг на роботи от типа на избрания типопредставител, са подходящи за внедряване в малки и средни фирми, които имат подходящо оборудване и подготвен персонал.
7. В процеса на разработката са използвани съвременни мехатронни подходи за функционално-структурен анализ на модулите и системата като цяло, компютърно моделиране и други съвременни методики, което ще доведе до генериране на „ноу-хау” за участващите фирми.

В заключение, реализацията на *РУР* ще открие нова ниша за малкия и средния бизнес в България, където цената на труда и степента на автоматизация на промишленото производство са ниски, но съществува иновационен човешки потенциал, експертиза и традиции за решаване на въпроси от подобен характер.

3.6. Изработка на хардуерната система

До момента са изследвани електрическите характеристики на двигателите, сензорите за обратна връзка и сервозадвижванията. Разгледан и изследван е математическият апарат, с който се решават правата и обратната задача на кинематиката при шестосната антропоморфна структура на робота. От извършения анализ на оригиналното хардуерно осигуряване на робот *KUKA KR-150* бяха направени следните изводи и заключения:

- целесъобразно е да се изгради нова хардуерна система за управление, с която роботът да бъде ефективно пренасочен към новото си индустриално приложение;
- комуникацията, интерфейсът и елементите от хардуерната конфигурация трябва да бъдат съобразени с изискванията (скорост и обем на информацията, с която ще комуникират контролерите, сензорите за обратна връзка и сервозадвижванията, предпазване на данните от паразитни електромагнитни смущения и др.), които са поставени пред избрания типопредставител за работните условия, в които той ще бъде използван - опериране в зоната на автоматизиран леярски комплекс като екстрактор за готовите отливки;
- необходимо е да бъдат подбрани подходящи сервоуправления и контролери, които да отговарят на изискванията за скорост на обработка на информацията при контрола на сервозадвижванията и при решаването на правата и обратната задача в кинематиката за управлението на шестте оси на робота.

В резултат на направения анализ и заключенията от него в настоящия и последен трети етап, са извършени най-важните дейности по обратния синтез и изграждане на разработения нов хардуер и съответния софтуер. Разгледани са два варианта на управлението, базирани на различни сервозадвижвания, контролери, софтуерно осигуряване и интерфейс.

Изработена е хардуерна конфигурация, базирана на модули на фирма *„Електроинвент“ ЕООД* – партньор по договора. По подобие на оригиналните модули на робота, конфигурацията е съставена от три основни и напълно нови модули за планираното индустриално предназначение на *УР*: *сервозадвижвания*, *електрическо табло за управление* и *панел за ръчно управление* (*фиг. 120*).

Фиг. 120 Основни модули от разработваната хардуерна система на избрания типопредставител на *ИУР* - *KUKA KR 150:* а) серводвигатели, задвижващи шестте оси на робота *(Servomotors),* б) електрическо табло за управление, комплект със сервозадвижвания *(Control Cabinet set with Servodrives),* в) операторски панел за управление *(Control Panel)*

3.6.1. Изработване на сервозадвижвания за шестте оси на робота

Хардуерната система на избрания типопредставител на робот *KUKA KR-150*, обхвана следните основни компоненти:

- сервопреобразувател;
- промишлен контролер;
- комутационна апаратура;
- електрическо табло за управление, в което са монтирани описаните по-горе компоненти;
- операторски и ръчен пулт за управление;
- свързващи кабели.

За изпълнението на поставените цели за реализиране на техническите параметри, на които трябваше да отговарят сервозадвижванията на реинженерирания робот *KUKA KR-150*, във фирма *„Електроинвент“ ЕООД* са разработени, изработени и изпитани в лабораторни и реални условия сервопреобразуватели за управление на серводвигатели, използвани за задвижване на осите на избрания типопредставител на *ИУР* - функционално действащият лабораторен модел *KUKA KR-150*.

Сервопреобразувателите са предназначени за управление на *АС* безчеткови серводвигатели, задвижващи осите на робота. Преобразувателите са окомплектовани с безчеткови синхронни електрически двигатели, с постоянни магнити *1FK6081- 6AF71 (2,83кW)* и *1FK6100 – 8AF91 (3,77kW)*, използвани в роботите от типа на избрания за реинженеринг робот - *KUKA KR-150 KUKA KR-150*. Основните технически характеристики на серводвигателите, които определят и основните изисквания към сервопреобразувателите са показани в *табл. 20.*

Таблица 20 Основни технически характеристики на серводвигателите, използвани в *KUKA KR 150*

Серия на ел. двигателите	1FK6081- 6AF71	1FK6100 – 8AF91
Тип на ел. двигателите	АС серводвигатели; Синхронни ел. двигатели с редкоземни магнити	
Номинална мощност	2,83 kW	3,77 kW
N nom/max	3000 / 3950 min -1	3000 / 4200 min -1
I nom	6,6 A	9,5 A
U ном	168 V	156 V
Момент при нулева скорост - Mo	8,0 Nm	18,0 Nm
Номинален момент - MN	6,8 Nm	12,0 Nm
Охлаждане	Естествено (Без вентилатор)	
Датчик за скорост	Резолвер: двуполюсен / многополюсен	
Наличие на интегрирана (вградена) спирачка	Захранване : 24VDC ± 10%	
Термична защита на ел. двигателя съгласно IEC и EN 60034-11	KTY 84 температурен сензор в статорната намотка	
Материал на магнитите	Редкоземни магнити	

По-долу в текста е описано как са оформени конструктивно изработените сервопреобразуватели.

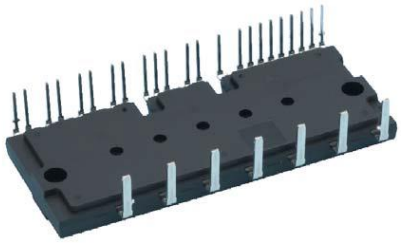
Сервопреобразувателите са реализирани от следните модули:

- силов блок;
- блок за управление;
- модул за резолверна система;
- блок за охлаждане;
- механична конструкция.

1. Силов блок

Силовият блок, показан на *фиг. 122*, е съставен от:

- охладител- гарантира разсейване на отделената топлина от силовите компоненти (изправителя и *IGBT* модула) и тяхната нормална работа;
- входен изправител - трифазният входен изправител преобразува променливото входно напрежение в постоянно *(DC),* което захранва кондензаторната банка;
- *IGBT* модул, монтиран върху охладителя (*фиг. 121*) - в зависимост от двигателя, за който е предназначен сервопреобразувателят, използваните *IGBT* модули са съответно за *25A* или *35A*, производство на фирма *„Mitsubishi Electric“*, водещ производител на този вид модули. Избраните модели са съответно тип *PS22A76* (за сервопреобразувателя, с номинален ток *8A*) и *PSS22A-78E* (за сервопреобразувателя с номинален ток *10A*).



Фиг. 121 *IGBT* модул, монтиран върху охладителя на силовия блок на сервопреобразувателя, избран за регулиране и управление на сервомоторите на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

- платка на силовия блок – в нея са монтирани силовите входно-изходни клеми, входният изправител и *IGBT* модула. Силовият блок е адаптиран с кондензаторната батерия, драйверите за управление на *IGBT* модула, токовите трансформатори за контрол на фазите на управлявания серводвигател, *„Реле и Pre charge“* резисторите, съгласуващата електроника и др.;

Фиг. 122 Силов блок на сервопреобразувателя, избран за регулиране и управление на сервомоторите на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

- кондензаторна батерия – изглажда изправеното напрежение и поема пиковите натоварвания, в режимите на ускоряване и спиране на серводвигателя;
- токови сензори – контролират изходния ток на две от фазите на серводвигателя;
- драйвери за управление на *IGBT* модула – галванично разделят силовата част от контролната електроника. Гарантират надеждна работа на силовия блок. Драйверите са ключов елемент за силовия блок и за цялата управлявана система.
- съгласуваща електроника – осъществява връзката между силовата и управляващата част.

2. Блок за управление

Блокът за управление (*Control Board*) на сервопреобразувателя, показан на *фиг. 123,* изпълнява:

- всички функции, свързани с контрола на серводвигателя;
- моделира *ШИМ* за управление на драйверите;
- реализира функциите за комуникация през *RS* входовете;
- управлява и контролира всички електронни защити;
- показва на монтиран върху платката седем сегментен индикатор състоянието на преобразувателя (вид на грешката, функционално съобщение или статус).

Фиг. 123 Блок за управление на сервопреобразувателя, избран за регулиране и управление на сервомоторите на реинженирания робот *KUKA KR-150*

В блока за управление са разположени следните превключватели и конектори за реализиране на входно - изходния интерфейс:

- превключватели за избор на типа на серийна комуникация *RS232 <->RS485*;
- *CN1,CN2,CN3 сериен комуникационен интерфейс RS485/RS232* – използва се за свързване на сервозадвижването към *PC*, контролер (*PLC*) или дистанционен пулт за управление;
- *CN4 входно-изходен интерфейс* - използва се за свързване на външни управляващи входно-изходни сигнали;
- *CN5 интерфейс за обратна връзка по позиция/скорост* - използва се за свързване на резолвера на серводвигателя.

3. Модул за резолверна система

Модулът беше монтиран върху платката, в която е разположен и блокът за управление. Основната задача, която модулът трябва да изпълни е да приеме сигнал от резолвера и да го преобразува в поредица от импулси, необходими както за реализиране от сервопреобразувателя на функцията за обратна връзка по скорост, така и за реализиране на функцията за позициониране от *PC* или *PLC.*

4. Блок за охлаждане

Блокът за охлаждане на сервопреобразувателя осигурява необходимата работна температура, така че силовата част - трифазния изправител и *IGBT* модулите, монтирани върху охладителя, да работят в температурен диапазон съгласно тяхната техническа спецификация. Монтираният вентилатор и предвидените отвори в корпуса на сервопреобразувателя осигуряват *„комин“*, така че да може оптимално да се отвежда отделената топлина, следствие от комутационните загуби на силовите елементи.

На *фиг. 124* са показани три изгледа на блока за охлаждане, от които се вижда как е реализирана системата за охлаждане при сервопреобразувателите, използвани за реинженеринг на избрания типопредставител на *ИУР*.

Фиг. 124 Три изгледа към блока за охлаждане на сервопреобразувателя, управляващ сервомоторите на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР*- робот *KUKA KR-150*

5. Механична конструкция

Механичната конструкция на сервопреобразувателя беше проектирана и изпълнена в модулен вариант (*фиг. 125*). Това позволи лесен монтаж в таблото за управление на реинженерирания робот и възможност за монтиране на допълнителни модули. Осигурен беше лесен достъп до входно-изходните силови терминали, всички клемореди и конектори на интерфейса.

Фиг. 125 Реализация на механичната конструкция на сервопреобразувателя, управляващ сервомоторите на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР* - робот *KUKA KR-150*

Необходимо беше да се осигури допълнителна вентилация в таблото за управление, за да се избегнат околни температури, превишаващи определените работни температури за сервопреобразувателя.

3.6.2.Изработване на електрическото табло за управление

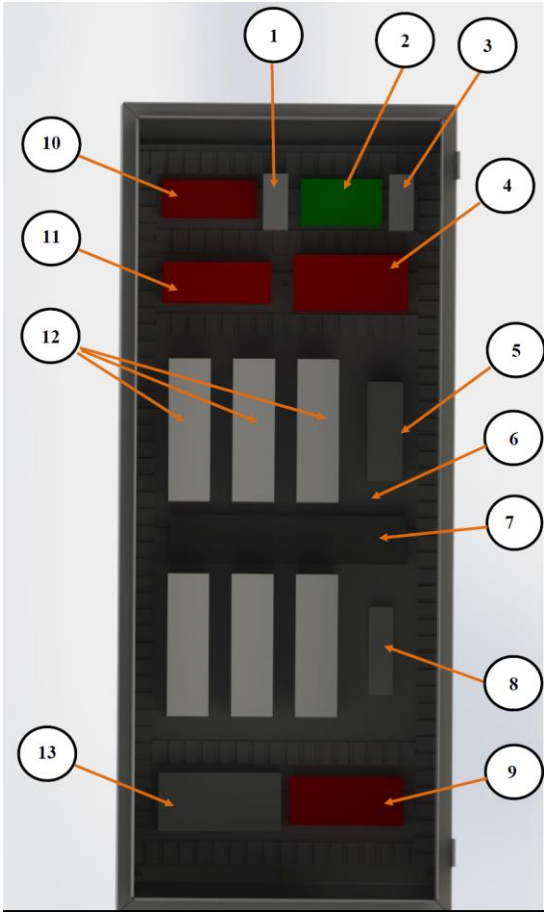
В *табл. 21* са показани основните технически параметри, които са предвидени за изпълнение в разработваното електрическо табло за управление на модела на *ИУР - KUKA KR 150*, обект на реинженеринг.

Таблица 21 Предвидени за изпълнение основни технически параметри на електрическото табло за управление на *KUKA KR 150*

Максимален брой оси за контрол	6
Захранващо напрежение	380V

Допустим толеранс **Честота** **Номинален ток**	380V-10% до 380V+10% 50 Hz 25A
Температура: **Без допълнителен охлаждащ модул** **С допълнителен охлаждащ модул**	 max 15°C max 60°C
Тегло	Около 112 кг

Изискванията, поставени към таблото за управление, основно бяха приведени към осигуряване на архитектура, осигуряваща скоростни комуникационни канали за връзка с различните модули на избрания робот - сервозадвижвания, интерфейс, пулт за управление и контролер. Сервоуправлението на моторите беше осъществено, посредством обратна връзка с резолвер за позиция и скорост. Електрическите елементи и компоненти, които се използваха в шкафа за управление на реинженерирания робот са: *+24V DC захранващ блок; клеми; релета; контактори; предпазители; бутони; съпротивления; кондензатори; диоди; светлинна кула; превключвател; куплунги; вентилатор; интерфейсна платка, защитно реле.* Разположението на елементите в проектираното табло за управление е показано във *фиг. 126*, където:



Фиг. 126 Проектно разположение на хардуерните елементи в разработваното табло за управление на модела на робот *KUKA KR-150*

1 - захранващ блок *24V/5A*
2 – интерфейсна платка
3 - захранващ блок *24V/10A*
4 – клеморед *XT:103*
5 - захранващ блок *12VDC*
6 – контактори *24V*
7 – метална основа *550x1320 мм*
8 – спирачен резистор *100Ω/150W*
9 - клеморед *XT:100*
10 - клеморед *XT:101*
11 - клеморед *XT:102*
12 - *AC* сервоуправление *Electroinvent*
13 - блок за защита (предпазители)

Захранващите блокове (1) и (3) захранват електрическите вериги, свързани съответно с: вентилаторите за охлаждане на електрическото табло, фотоелектрическите сензори за контрол на отливката и оперативната верига; захранването на електромагнитните спирачки на сервомоторите (12). Контакторните елементи и релета (6), служат за комутиране и управление на веригите в шкафа за управление. Спирачният резистор (8) служи за разсейване на мощността в режим на спиране на движението на робота. Интерфейсната платка (2), захранвана от блок (5), служи като логическо цифрово входно-изходно устройство, с което се приемат и предават управляващи сигнали от и към управлението на робота. С клеморедите *XT:100* (9), *XT:101* (10), *XT:102* (11) и *XT:103* (4), разположени заедно с всички останали електрически елементи върху металната основа (7), се разпределят електрическите вериги съответно за: главното захранване на робота; основните хардуерни елементи в таблото; интерфейсът; сигнализацията и управлението. Блокът за защита (13) или предпазителите служат за защита на електрическите вериги.

Планираните за използване механични и електрически компоненти, които впоследствие изградиха шкафа на таблото за управление са показани в *табл. 22*.

Таблица 22 Спецификация на използваните механични и електрически компоненти, планирани за изграждането на шкафа за електрическото табло за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

№	Обозначение в електрическите схеми	Описание	Количество
Електрически шкаф за таблото за управление на *KUKA KR-150*			
Сглобени единици:			
1		Метален шкаф	1
2		Пластмасова решетка с филтър	2
3		Кула със светлинна сигнализация	1
4		Метална плоча-основа, за разполагане на електрическите и електронните компоненти в таблото	1
Механични части и компоненти:			
6		Табелка със знак за предупреждение от високо напрежение	1
7		Табелка с надпис „RMC”	1
8		Табелка с надпис „E-Stop”	1
9		Табелка с надпис „Setting Mode“	1
Електрически и електронни части и елементи			
13	Q01	Главен прекъсвач	1
14	S140	Авариен стоп, XB4BS8442	1
15	S141	Двупозиционен превключвател	1
16	E01, E02	Вентилатор KDE2412PMS1-6A Вентилатор KDE2412PMS1-6A	2
17		Предпазна решетка	2
18		Кука за хващане на шкафа M12 DIN580	2
19		Ключалка	2
20		Акумулатор, MS4.5-12	1
21		LED лампа	1

Планираните за използване електронни и електрически компоненти, които впоследствие изградиха таблото за управление са показани в *табл. 23*.

Таблица 23 Спецификация на използваните електронни и електрически компоненти, планирани за изграждането на електрическото табло за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

№	Обозначение в електрическите схеми	Описание	Количество
Електрическо табло за управление на *KUKA KR-150*			
Сглобени единици:			
1		Опция: Реле 4 PDT 24VDC и LED диод	-
2		Опция: Реле 1 PDT 24VDC и LED диод	-
3	K17	Реле 2 PDT 24VDC и LED диод	1
4	R1, R2, R3, R4, R5, R6	Реле PLC-BSC-24DC/21	6
5		Полимерни уплътнения за кабелни входове *„Murrplastik“*	1
Механични части и компоненти			
6		Метална плоча-основа 550x1320 mm	1
1	2	3	4

Продължение на Таблица 23 Спецификация на използваните електронни и електрически компоненти, планирани за изграждането на електрическото табло за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

1	2	3	4
7		Клеморед и шина XT100:	
8		Клеморед и шина XT101:	
9		Клеморед и шина XT102:	
10		Клеморед и шина XT103:	
11		Релета	
12		Предпазители	
Електрически и електронни части и елементи			
13	A3	Комуникационен модул	1
14	A02	Защитно реле XPS-AV 11113	1
15	T01	Постояннотоково захранване 24VDC 10A	1
16	T02	Постояннотоково захранване 24VDC 5A	1
17	T03	Постояннотоково захранване –12VDC	1
18	N01, N02, N03, N04, N05, N06	AC сервоуправление „Electroinvent“	6
19	F01, F02, F03	Предпазител G63C25 3P C25 GE	3
20	K01, K02, K03, K04, K05, K06	Контактор 3P– LP1K0610BD	6
21	F07, F09	Предпазител G61C04 4A GE	2
22	F06, F08, F10, F11, F12	Предпазител G61C06 6A GE	4
23	F04	Предпазител G61C10 10ª GE	1
24	Socket	Контакт SD-D/SC/LA/GY, 16A, 250V	1
25		Ферит A:35mm/B:28mm/C:9mm	18
26		Ферит R40/24/16 LK4000	6
27		Ферит LF-503B (B15)	-
28		Куплунг, женски, 24 PIN, H-BE 24 BS (EPIC Contact)	1
29		Спирачен резистор 100 Ω / 150 W	3

1	2	3	4
1	2	3	4
30		Разпределителна клема 6 mm^2 Type ST 6 Phoenix Contact	3
31		Заземителна клема 6 mm^2 Type ST 6-PE Phoenix Contact	1
32		Нулева клема 6 mm^2 Type ST 6-blue Phoenix Contact	1
33		Заземителна клема 10 mm^2 Type ST 10 PE QUATTRO Phoenix Contact	1
34		Разпределителна клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5 Phoenix Contact	77
35		Нулева клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5-blue Phoenix Contact	2
1	2	3	4

Продължение на Таблица 23 Спецификация на използваните електронни и електрически компоненти, планирани за изграждането на електрическото табло за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

1	2	3	4
36		Заземителна клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5 PE Phoenix Contact	8
37		Разпределителна клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5 QUATTRO Phoenix Contact	24
38		Заземителна клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5 PE QUATTRO Phoenix Contact	5
39		Разпределителна клема 2.5 mm^2 ST 2.5 TWIN Phoenix Contact	13
40		Заземителна клема 2.5 mm^2 Type ST 2.5 PE TWIN Phoenix Contact	4

На първа и втора страници е показано опроводяването на силовата част на шкафа за управление (220V), оперативното захранване (24V), както и комутативната верига за управление на спирачките на сервомоторите. От трета до осма страници са показани схемите на опроводяване на сервоуправленията, като това включва главно захранване, оперативна верига, резолверна обратна връзка и свързване към сервомоторите. На 9-та страница е показана схемата на свързване на фотоелектрическите сензори за контрол на отливката, а на 10-та страница схемата на свързване на светлинната кула за сигнализация при различните режими на работа (ръчен, автоматичен и възникнала грешка) на избрания типопредставител. Схемите на страница 11 представят опроводяването на защитното реле и съответните защитени електрически вериги. В страници 12, 13 и 14 са показани схемите на свързване на операторския пулт за управление. На 16 и 17 страници са показани схемите на изградения интерфейс между реинженирания робот и машина за леене на алуминий под високо налягане (за новото индустриално приложение на *KUKA KR-150*). Свързването на хващача (задвижване и обратна връзка) е показано на страница 18. На последната страница е показано свързването на интерфейсния комуникационен модул (логическо цифрово входно-изходно устройство), с който се приемат и предават управляващи сигнали от и към управлението на робота.

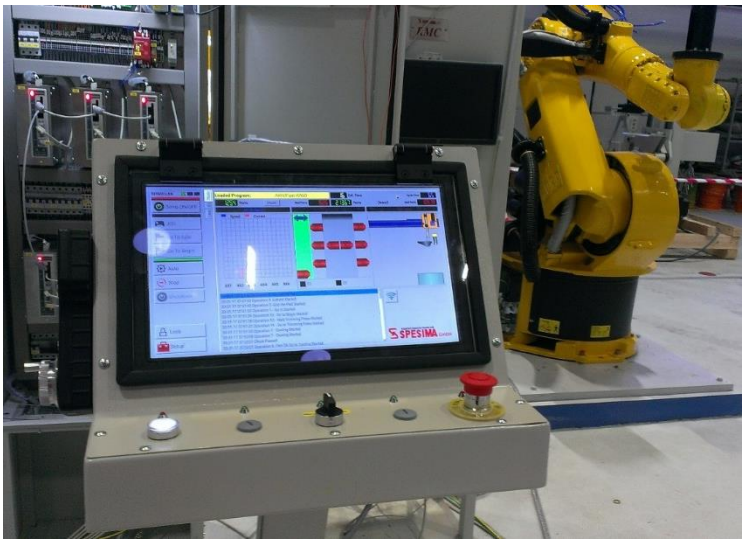
3.6.3. Изработване на панел за ръчно управление

Управлението на реинженирания робот беше реализирано, чрез операторски пулт за управление и *Wi-Fi* ръчен пулт за управление и настройване. Реализацията им е описана в следващите редове.

Операторски пулт за управление

Основната функция на операторския пулт за управление е да осъществява връзката между оператора и избрания типопредставител *KUKA KR-150*, обект на реинженеринг. По време на работа на дисплея на пулта се показват съобщения за състоянието на процесите и грешките на робота. При избор на съответните екрани, чрез използване на *"touchscreen"* функционалност на дисплея се въвеждат различните работни параметри на робота (лимити, точност, повтаряемост и др.) и се съставят програми, съгласно съответното приложение. Управлението предоставя възможност тези програми да бъдат редактирани, съхранявани и отново използвани. Операторът на пулта има на разположение екран, с който може да наблюдава в реално време координатите на робота в пространството, както и параметрите на отделните оси (големина на тока, позиция, скорост и др.). В управлението има възможности за различни функционалности, според нивото на достъп на оператора на пулта (оператор, настройчик или сервизен техник). В панела хардуерно и софтуерно е заложено да се осъществи *VPN* комуникация за дистанционен сервиз и диагностика.

На *фиг. 127* е показан разработеният операторски пулт за управление на избрания типопредставител *KUKA KR-150*.



Фиг. 127 Операторски пулт за управление на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

Планираните за използване механични, електронни и електрически компоненти, изграждащи операторския пулт за управление са показани в *табл. 24*.

Таблица 24 Спецификация на използваните механични, електронни и електрически компоненти, планирани за изграждането на операторския пулт за управление на реинженерирания *KUKA KR 150*

№	Обозначение в електрическите схеми	Описание	Количество
Операторски пулт за управление			
Сглобени единици:			
1		Защитна тръба: SPR-EDU-AS, AD27, 22x27, PG21	1
2		Кабел 25x2x0.25	1
Механични и електронни компоненти			
3	A1	Дисплей, Elo Touch Solutions 1541L	1
4	A4	Wi-Fi Ръчен пулт за управление	1
5	S141	Авариен стоп XB4BS8442	1
1	2	3	4
1	2	3	4
6	S10	Превключвател:	1

		ръчен/автоматичен режим	
7	SA02/HA02	Бял бутон със светлинна сигнализация	2
8	A2	PLC Контролер	1
9		Захранване 5V	1
10		Интерфейсна платка (комуникационен модул)	2
11		Куплунг (EPIC Contact) H-B 24 TG M25	1
12	X07	Куплунг, женски, 64 PIN H-D 64 BCM (EPIC Contact)	1
13		Основа H-B 24 AG (EPIC Contact)	1
14		Куплунг, мъжки, 64 PIN H-D 64 SCG	1
15		Безжичен рутер G Router	1
16		LED диодна индикация	1

В *табл. 25* са показани действията, които могат да се извършат с механичните бутони и сигнализация в операторския пулт за управление на реинженерания робот.

Таблица 25 Функции на механичните бутони и сигнализацията в операторския пулт за управление на реинженерания *KUKA KR 150*

Бутон / Ключ	Функция	Описание
	Бутон – серво включено RMC	**Бялата лампа свети:** подадено е захранване към инверторите. **Бялата лампа не свети:** не е натиснат бутона или не е изпълнено някое от следните условия: - натиснат авариен стоп на *DCM* машината. - Отворена предпазна ограда.
	Бутон авариен стоп	- Прекъсва веригата на захранване на серво моторите в шкафа за управление на *EM4*. - Прекъсва веригата на захранване на серво моторите в шкафа за управление на *MPS*. - Прекъсва веригата на захранване в шкафа за управление на *DCM*.
	Ключ – ръчен, неутрален и автоматичен режим на работа.	**Ръчен режим:** възможно е използването на ръчния пулт за управление. **Неутрална позиция**: манипулаторите не могат да се движат. **Автоматичен режим:** възможно е стартирането на автоматичния цикъл.

Основните компоненти на операторския пулт са *PLC контролер*, разширителен модул за *PLC контролер* и *„touchscreen“* дисплей *ELO ET-1541L*.

- *PLC контролер* - за да бъдат реализирани желаните функционалности на управлението е подбран *PLC контролер*, показан на *фиг. 128.*

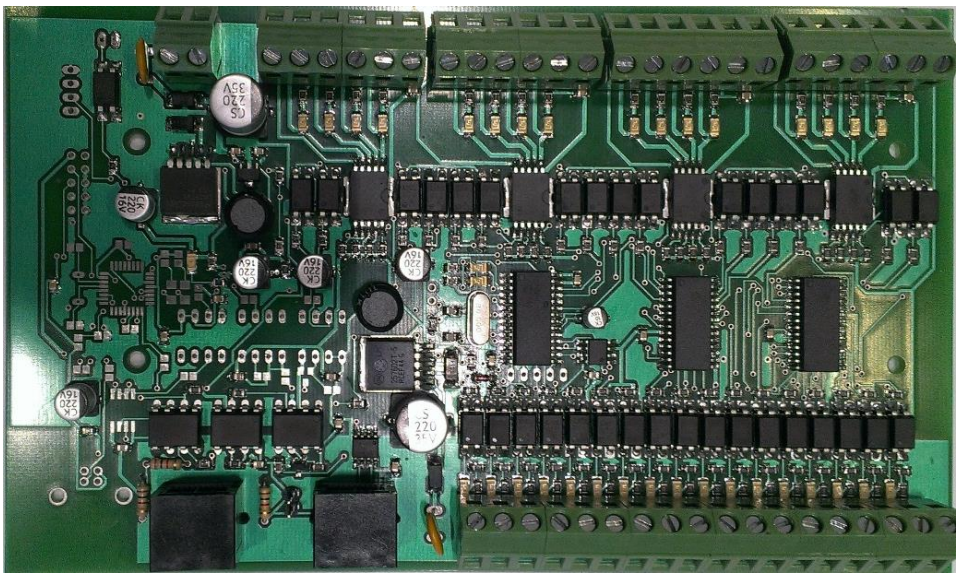
Фиг. 128 *PLC* контролер

PLC контролерът поддържа *Raspbian (Debian), Ubuntu, Windows 10 IoT Core, RISC OS, OSMC, OpenELEC* и др.

Основните характеристики на *PLC контролера* са:

- *CPU: Broadcom BCM2837 64-bit ARM Cortex-A53 Quad Core Processor SoC на 1.2GHz;*
- *Оперативна памет: 1GB RAM;*
- *BCM43143 WiFi на платката;*
- *Bluetooth Low Energy (BLE) на платката;*
- *GPU: Dual Core VideoCore IV® Multimedia Co-Processor;*
- *40-пинов GPIO хедър;*
- *4 x USB порта с изходен ток до 1.2A;*
- *Low-Level периферия:*
  - ✓ *27 x GPIO;*
  - ✓ *UART;*
  - ✓ *I2C шина;*
  - ✓ *SPI шина с два chip select пинове.*
- *Аудио и видео изходи:*
  - ✓ *3.5мм жак за композитен аудио/видео изход;*
  - ✓ *Стандартен HDMI изход (v1.3 & v1.4);*
- *CSI порт за камера;*
- *DSI дисплей порт за дисплей с тъчскрийн;*
- *Пълна съвместимост с HAT платките (тип шийлд);*
- *Слот за micro SD карта, за операционна система и съхранение на данни;*
- *Захранване: с Micro USB конектор, с препоръчителни параметри 5V@2A.*

- Разширителният модул за *PLC контролера*, показан на *фиг. 129*, притежава следните технически параметри и характеристики:
  - *8 цифрови входа;*
  - *4 цифрови изхода;*
  - *Опция резервно захранване (акумулаторно);*
  - *Серийна комуникация RS485;*
  - *CAN комуникация.*



Фиг. 129 Разширителен модул за *PLC* контролера

- Визуализацията на процесите се представя, чрез висококачествения *LCD* дисплей *ELO ET-1541L*.

Wi-Fi ръчен пулт за управление

Ръчният пулт използва *Wi-Fi* стандарт за комуникация с управлението на реинженерирания робот. Състои се от два основни компонента – приемник и предавател. Предоставя следните възможности:

- *монохромен дисплей, на който се показват координатите на робота;*
- *две опции за движение на робота в пространството – ос по ос и картезианно по координати x, y, z;*
- *програмите, запаметени в операторския панел, могат да бъдат изпълнявани стъпка по стъпка, чрез бутон от ръчния пулт за управление;*
- *могат да се подменят или добавят отделни точки в програмирания път за движение на робота;*
- *предоставя възможност за ръчно управление на крайния ефектор (хващач);*
- *разполага с бутон за аварийно спиране на работата на робота.*

На *фиг. 130* е показан *Wi-Fi* пулт за управление на реинженерирания робот *KUKA KR-150*.

Основните характеристики на ръчния пулт са показани в *табл. 26*.

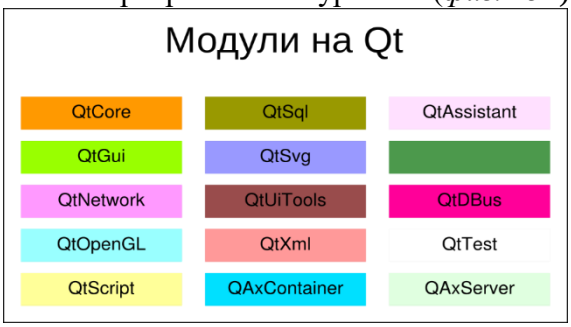
Таблица 26 Технически данни и параметри на ръчния пулт за управление на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

Тип на дисплея	LCD с подсветка
Честотни ленти	ISM, 433Mhz
Източник на захранване	2 AA батерии
Обхват на действие	40 метра
Размери, дължина x височина x широчина, мм	205 x 109 x 55
Максимален брой оси на управление	6
Брой функционални бутони	18
Време за отговор при допир на *“touchscreen”* дисплея, милисекунди	16
Тегло, кг	0.5

Фиг. 130 *Wi-Fi* пулт за управление на реинженирания робот *KUKA KR-150*
1) превключвател - *включено/изключено* 2) бутон за избор на оси за управление – *оси A1-A6*
3) потенциометър за избор на посока и управление на движението на осите на робота в ръчен режим

3.6.4. Разработване на приложния софтуер

Като основна платформа за разработването на приложното програмно осигуряване е използвана програмната среда *Qt*, със съответните инструменти за разработка *QtCreator*, *QtDesigner* и *QtLinguist*. Изборът е обусловен основно от отворения код, с който е реализирана средата, нейната мултиплатформеност и поддръжката на множество процесорни архитектури (което в процеса на развитието на апаратното осигуряване се оказва много важно свойство). Платформата *Qt* предоставя огромен набор от вградени модули, покриващ основните нужди на приложното програмно осигуряване (*фиг. 131*).



Фиг. 131 Вградени модули в програмната среда за разработване *Qt*

Изискванията към приложното програмно осигуряване за нуждите на проекта са комплексни и разнообразни и се групираха в следните основни компоненти:

- модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*;
- модул за синтез на заданието за движението на осите;
- модул за кинематично моделиране на робота (права и обратна кинематична задача);
- модул за синтез на движения в декартовото пространство;
- модул за обработка на спомагателните входно-изходни сигнали;
- модул за реализация на базовата логика на процеса;
- модул за синтез, съхранение и обработка на програмирани движения;

- модул ръчно управление;
- модул за графичен потребителски интерфейс;
- модул спомагателни функции.

На фигура *фиг. 132* са показани основните модули и тяхното взаимодействие.

Фиг. 132 Основни модули и взаимодействието между тях в разработвания софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

Описанието на отделните модули и реализацията на софтуерното осигуряване на реинженерирания робот е описана по-долу.

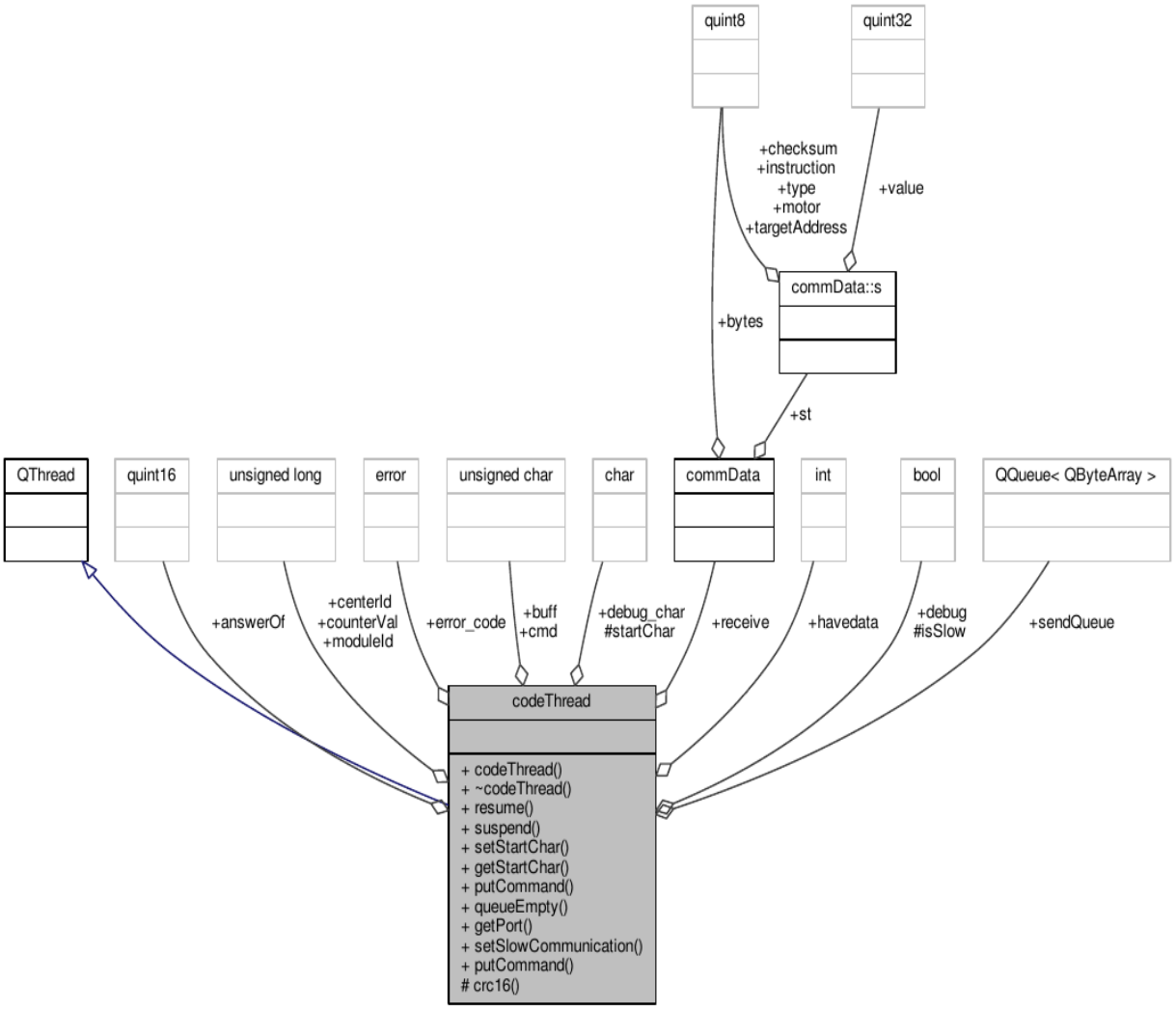
3.7. Модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот KUKA KR-150

За да се реализира каквото и да е движение на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150* е необходимо да се осигури надеждна комуникация между потребителското програмно осигуряване и сервозадвижванията на осите на робота. За целта са разработени две основни схеми за комуникация – на базата на сериен интерфейс *RS485* (протокол *MODBUS*) и на базата на по-бърз и оптимизиран интерфейс *CAN BUS*. Първият вариант беше избран като начална база, не изискваща специфични апаратни средства, по лесна и бърза за реализация, с цел начално изследване на поведението на робота.

Модулът е реализиран като отделен процес (*thread*), с цел оптимално използване на възможностите на съвременните процесори (наличието на повече от едно изчислително ядро). Основен се явява класът *codeThread*, който осигурява опашка за данните към сервозадвижванията, като същевременно приема и валидира получените от задвижванията данни.

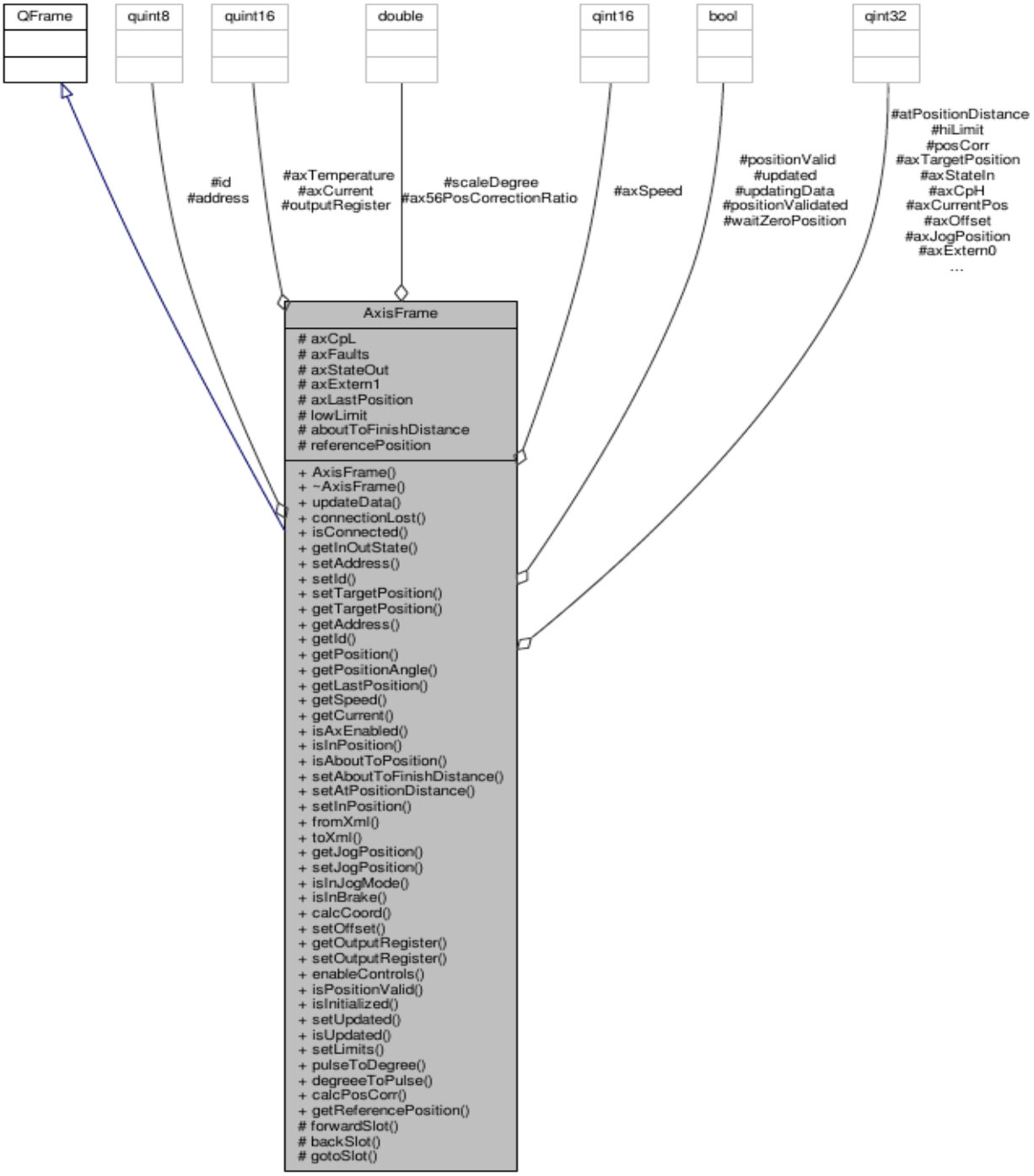
На *фиг. 133* е показана структурата на съответния клас.

При получаване на данни от задвижванията се генерира съответният сигнал, който задейства процедура по обновяването на данните за състоянието на осите във вътрешния клас *AxisFrame*. На *фиг. 134* е показана структурата на класа.



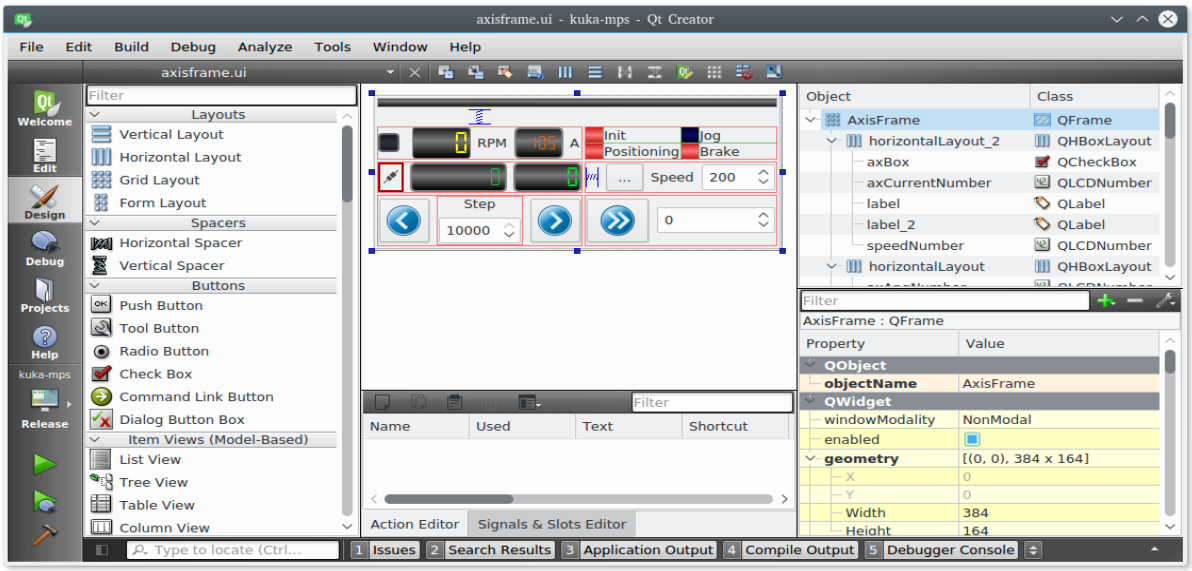
Фиг. 133 Структура на класа *codeThread* в разработвания софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Реализацията на основата на *CAN BUS* интерфейс се различава от реализацията на предишния интерфейс по вида на комуникационния клас. Класът *CanWorkerThread* работи отново като отделен процес, но разликата идва от сигнализирането към основния процес, което не е асинхронно, чрез опашка на съобщенията, а реално цялата по-нататъшна обработка се извършва в нишката на комуникационния клас. По този начин се осигурява близка до реалното време обработка и съответно генериране на заданието.



Фиг. 104 Структура на класа *AxisFrame* в разработвания софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Освен съхранението и обработката на данните за състоянието на съответната ос, този клас осигурява и графично представяне на основната информация (*фиг. 135*).



Фиг. 135 Графично представяне на основната информация от класа *AxisFrame* в разработвания софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

3.8. Модул за синтез на заданието за движението на осите

По подобен начин на предходния модул синтезирането на заданието за движение на осите на робота има две версии – една при реализация с протокол *MODBUS* и една при реализация с *CAN BUS*. Основната разлика се състои в това, че при първата версия се изпраща задание за позиция и скорост към сервомодулите и закона за движение на оста се определя от сервозадвижването. При втория вариант към сервомодула се подават в реално време само относително малки премествания в позицията, а цялостната траектория се генерира от приложния софтуер. Това дава възможност за много по-прецизна синхронизация на осите, което е особено важно при реализирането на следващия модул за генериране на движения в декартовото пространство. За краткост на изложението тук ще бъде описан само варианта на базата на *CAN BUS* протокол.

Реализацията се състои от набор функции и класове:

- функция за създаване на заданието за движение на шестте оси на робота (*табл. 27*);

Таблица 27 Функция за създаване на заданието за движение на шестте оси на робота

```
void MainWindow::createJointsTrajectory(int speed)
{

    QList<qreal> b,e;

    for(int i=0;i<6;i++){
       b.append(axises[i]->getPosition());
       e.append(axises[i]->getTargetPosition());
    }
    pTrajectory.setupJointsTrajectory(b,e,speed,CANSCANMS*4);

}
```

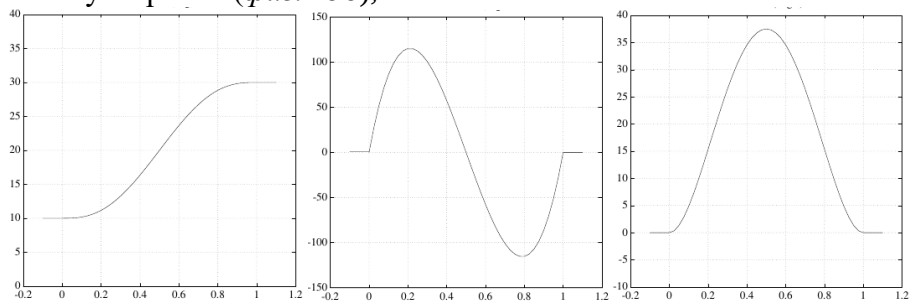
- клас за синтезиране на траектории - за синтезирането на траекторията за движение в пространството на осите на робота се използва полином от пета степен от вида:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5$$

При гранични условия за нулева начална и крайна скорост и нулево начално и крайно ускорение, могат да се изчислят коефициентите на полинома

$a_0 = 0$, $a_1 = 0$, $a_2 = 0$, $a_3 = 10$, $a_4 = -15$, $a_5 = 6$.

При този модел на синтезиране на траекториите се получават следните графики за позиция, скорост и ускорение (*фиг. 136*);



Фиг. 136 Графики за позиция, скорост и ускорение при този модел на синтезиране на траекториите

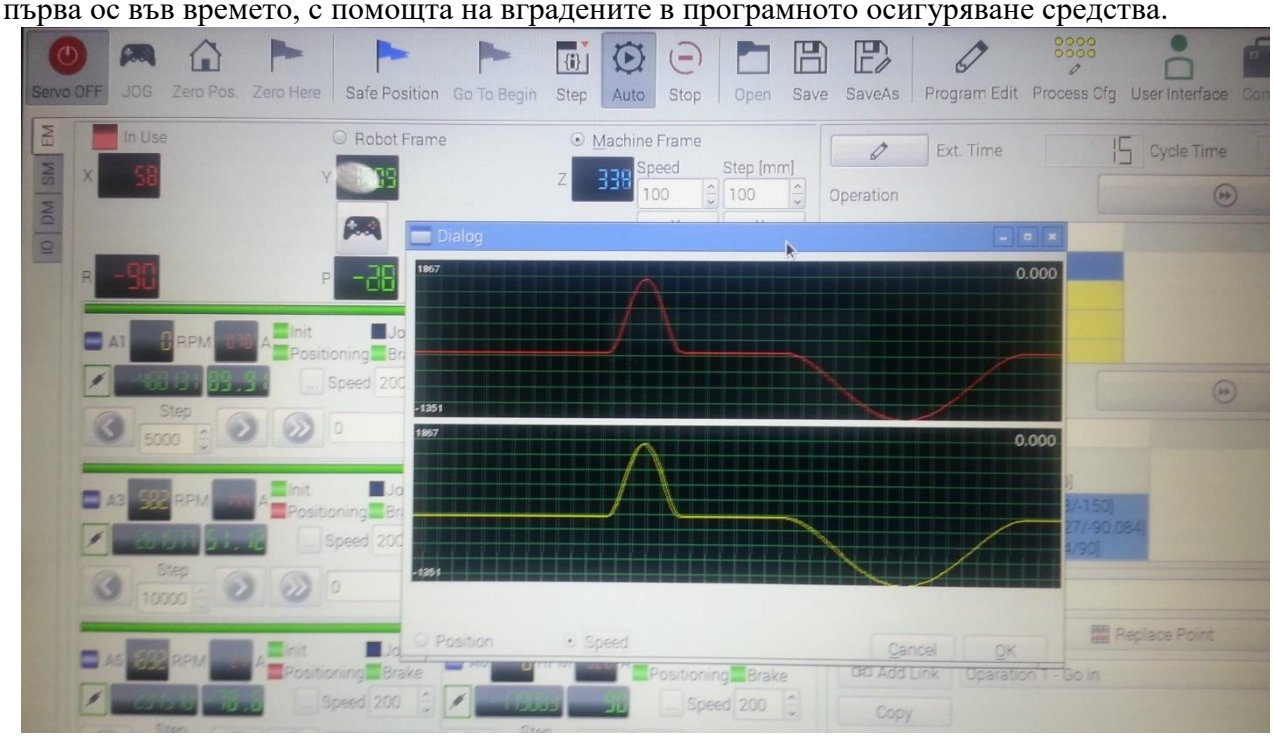
- Функция за изпълнение на генерираната траектория на осите *табл. 28*:

Таблица 28 Функция за изпълнение на генерираната траектория на осите

```
    case ServoJointsMove:
    {
       moveJoints();
       if(pTrajectory.timeIncrement(0)){
          pTrajectory.timeIncrement(CANSCANMS);
       }
       else servoMode=ServoEndCartesianMove;

    }
       break;

void MainWindow::moveJoints()
{
   bool converge=true;
   CommandsData d;
   CommandStruct cs;
   QList<qreal> newP=pTrajectory.getJointForTime(pTrajectory.getCurrentTime());
   for(int i=0;i<6;i++){
      cs.axPos[i]=axises[i]->getPosition();
      cs.axSpeed[i]=0;
   }
   cs.speed=0;
   d.setBeginPos(cs);

   for(int i=0;i<6;i++){

      double axNewPos=newP.at(i);
      cs.axPos[i]=axNewPos;
      axNewPos=axises[i]->getPositionAngle();
      if(axises[i]->isAxEnabled()){
         if(axUpperLimits[i]&&  axNewPos>axUpperLimits[i]){
            converge=false;
            qDebug()<<"Limits"<<i+1<<cs.axPos[i]<<axUpperLimits[i];
         }
         if(axLowerLimits[i]&&axNewPos<axLowerLimits[i]){
            converge=false;
            qDebug()<<"Limits"<<i+1<<cs.axPos[i]<<axUpperLimits[i];
         }
      }

      cs.axSpeed[i]=0;
   }
   cs.command=MOVETO;
```

```
    d.data.append(cs);

    if(converge){
      for(int i=0;i<6;i++){
        if(axises[i]->isEnabled()){
          axises[i]->setTargetPosition(d.data[1].axPos[i]);
          gotoPosition(i,d.data[1].axPos[i],CANSCANMS+5);
        }
      }
    }
}
```

На *фиг. 137* е показано реално движение на функционално действащия лабораторен модел на реинженерия робот *KUKA KR-150*, като е визуализирана графика на скоростта на първа ос във времето, с помощта на вградените в програмното осигуряване средства.

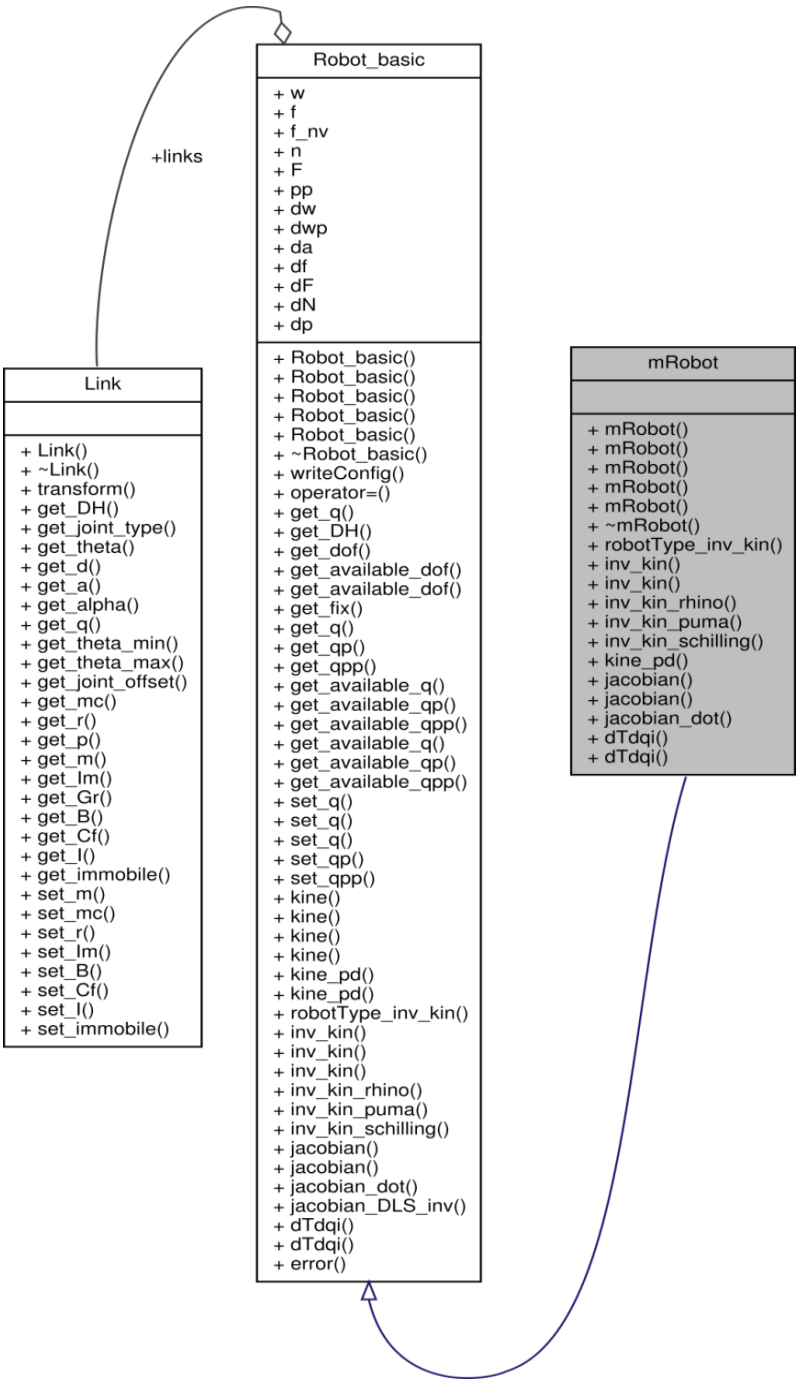


Фиг. 137 Графика на скоростта на първа ос на реинженерия робот във времето, с помощта на вградените в програмното осигуряване средства

Модул за кинематично моделиране на робота (права и обратна кинематична задача)

За да се позиционира крайният ефектор на всеки индустриален робот е необходимо да се осигури решаването на две основни задачи – права кинематична задача (изчисляване на позицията и ориентацията в декартовото пространство на базата на известните ъгли на всички оси) и обратна кинематична задача (изчисляване на необходимите ъгли на всички оси на робота, за достигане на определена позиция и ориентация на крайния ефектор). За реализирането на тези функции е използвана модифицирана и разширена библиотека на базата на библиотеката ***roboop***.

На базата на избраната схема за описание на кинематичната структура и на базата на модифицираната версия на *Denavit–Hartenberg*, основен клас се явява класът *mRobot*, чиято опростена структура е показана на *фиг. 138*.



Фиг. 138 Опростена структура на класа *mRobot*

Модифицираният код за конструиране на робота и разширените функции за решаване на обратната кинематична задача бяха показани в текста.

3.9. Модул за синтез на движения в декартовото пространство

При изпълнение на специфични задачи е необходима възможността индустриалният робот да изпълни движение до определена точка в декартовото пространство, със зададена ориентация на крайния ефектор. При това движението е необходимо да се извърши по определена траектория. Най-често използваното движение е движение от точка в точка по права линия, с евентуална промяна на ориентацията по време на самото движение. За целите на настоящия проект е разработен програмен модул, който решава тези задачи с помощта на по-горе описания модул за кинематично моделиране и функциите за синтез и изчисление на траектории, с помощта на полином от $5^{-та}$ степен.

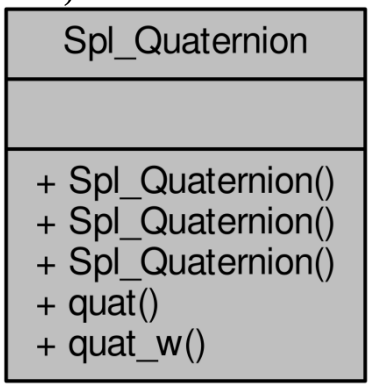
В *табл. 29* е показана функцията за синтез на движението в декартовото пространство.

Таблица 29 Функция за синтез на движението в декартовото пространство

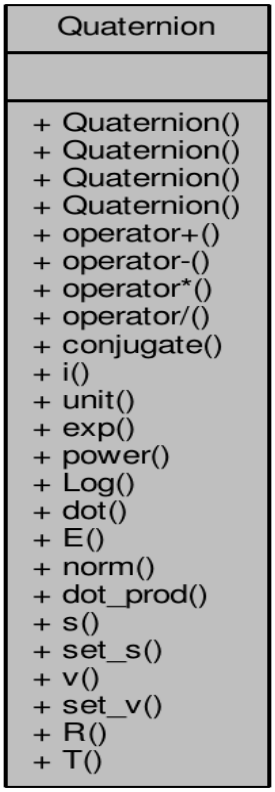
```
void PolynomTrajectory::setupCartesianTrajectory(QList<qreal> &b,QList<qreal> &e, qreal speed,quint32
minTime)
{
   begins=b;ends=e;
   current=b;

   double time=sqrt((ends.at(0)-begins.at(0))*(ends.at(0)-begins.at(0))+(ends.at(1)-begins.at(1))*(ends.at(1)-
begins.at(1)) + (ends.at(2)-begins.at(2))*(ends.at(2)-begins.at(2)) );
   time=time*1000./speed;
   timeEnd=time;
   if(timeEnd<minTime)timeEnd=minTime;

   Matrix result;
   ColumnVector dest(3);
   dest(3) = deg2rad(begins.at(3));
   dest(2) = deg2rad(begins.at(4));
   dest(1) = deg2rad(begins.at(5));
   result=rpy(dest);

   qb=Quaternion(result);
   //cout<<qb.T()<<"\n";

   dest(3) = deg2rad(ends.at(3));
   dest(2) = deg2rad(ends.at(4));
   dest(1) = deg2rad(ends.at(5));
   result=rpy(dest);

   qe=Quaternion(result);
   currentTime=0;
}
```

Вижда се, че функцията получава като входни параметри: начална позиция, крайна позиция и ориентация на крайния ефектор, както и желаната средна скорост за придвижване в *мм/сек*. Описанието на движението по права линия от точка в точка е лесно осъществимо. Не така стои въпросът с промяната на ориентацията в пространството по време на движението. За реализация на интерполирането се използва специфично представяне на ориентацията с помощта на **Кватерниони.**

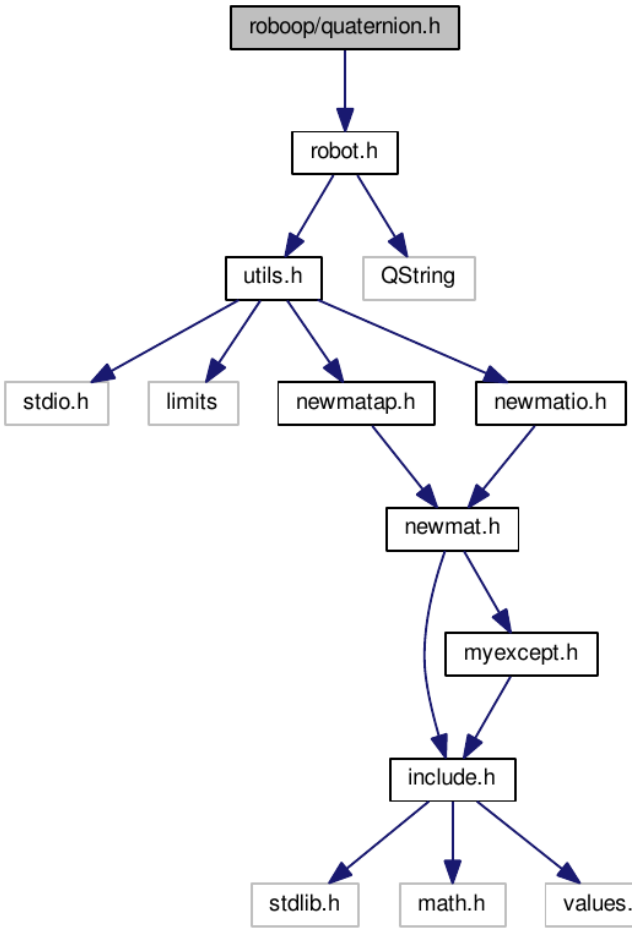
За представянето на кватернионите и операциите с тях са създадени съответните класове (*фиг. 139*, *фиг. 140* и *фиг. 141*).



Фиг. 139 Създадени класове за представянето на кватернионите и операциите с тях



Фиг. 140 Създадени класове за представянето на кватернионите и операциите с тях



Фиг. 141 Създадени класове за представянето на кватернионите и операциите с тях

По този начин функцията за изчисление на траекторията във времето изглежда по начина представен в *табл. 30*:

Таблица 30 Функция за изчисление на траекторията във времето

```
ReturnMatrix PolynomTrajectory::getCartesianForTime(quint32 time)
{
   Matrix target(4,4);
   if(time>timeEnd)time=timeEnd;
   qreal t=(qreal)time/timeEnd;
   qreal poly=6.*(t*t*t*t*t)-15.*(t*t*t*t)+10.*(t*t*t);
   if(poly>1.)poly=1.;
   if(poly<0.)poly=0.;
   target=Slerp(qb,qe,poly).T();
   for(int i=0;i<3;i++){
      current[i]=begins.at(i)+poly*(double)(ends.at(i)-begins.at(i));
      target(i+1,4)=current[i];
   }
   target.release();
   return target;
}
```

На базата на тези функции движението в декартовото пространство се осъществява чрез решаване на обратната кинематична задача за всяка точка от траекторията (*табл. 31*):

Таблица 31 Решаване на обратната кинематична задача за всяка точка от траекторията

```
double MainWindow::moveXYZ( bool init=false)
{
   bool converge;
   double stepDown;
   Matrix mat;

   ColumnVector qPrev;
   qPrev = robot->get_available_q();
   qint16 axSpeeds[6];
   CommandsData d;
   CommandStruct cs;
   for(int i=0;i<6;i++){
      cs.axPos[i]=axises[i]->getTargetPosition();
      cs.axSpeed[i]=0;
      qPrev(i+1)=deg2rad( axises[i]->pulseToDegree(axises[i]->getTargetPosition()));
   }
   robot->set_q(qPrev);

   Matrix result=pTrajectory.getCartesianForTime(pTrajectory.getCurrentTime());
   result(2,4)=-result(2,4); // Invert Y

   Matrix rob=machineToRobot*result;

   mat=robot->inv_kin(rob, 0, robot->get_dof(), converge);
   for(int i=0;i<6;i++)mat(i+1,1)=rad2deg(mat(i+1,1));


   if(converge){

      cs.speed=0;
      d.setBeginPos(cs);
      for(int i=0;i<6;i++){
         axSpeeds[i]=axises[i]->getTargetSpeed();
         switch (i) {
         case 4:
            axises[i]->calcPosCorr(cs.axPos[3],1);
            break;
         case 5:
            axises[i]->calcPosCorr(cs.axPos[3],1);
```

```
            break;

        default:
            break;
        }

        double axNewPos=mat(i+1,1);
        cs.axPos[i]=axises[i]->degreeeToPulse(axNewPos);
        if(axUpperLimits[i]&&  axNewPos>axUpperLimits[i]){
            converge=false;
            qDebug()<<"Limits"<<i+1<<axises[i]->pulseToDegree(cs.axPos[i])<<axUpperLimits[i];
        }
        if(axLowerLimits[i]&&axNewPos<axLowerLimits[i]){
            converge=false;
            qDebug()<<"Limits"<<i+1<<axises[i]->pulseToDegree(cs.axPos[i])<<axLowerLimits[i];
        }

        cs.axSpeed[i]=0;
    }

    cs.command=MOVETO;
    d.data.append(cs);

    stepDown=d.calcSpeeds(CANSCANMS,1,axSpeeds);
    if(converge){
        for(int i=0;i<6;i++){
            int sp=d.data[1].axSpeed[i];
            if(!sp)sp=1;
            axises[i]->setAboutToFinishDistance(2*(d.data[0].axPos[i]-d.data[1].axPos[i])/3);
            axises[i]->setTargetPosition(d.data[1].axPos[i]);
            axises[i]->setTargetSpeed(d.data[1].axSpeed[i]);
            if(!init)
                gotoPosition(i,d.data[1].axPos[i],CANSCANMS+5);

        }
    }

  }
  else {
    qDebug()<<"Can't solve";
  }
  if(!converge)return -1.;

  return stepDown;

}
```

3.10. Модул за обработка на спомагателните входно-изходни сигнали

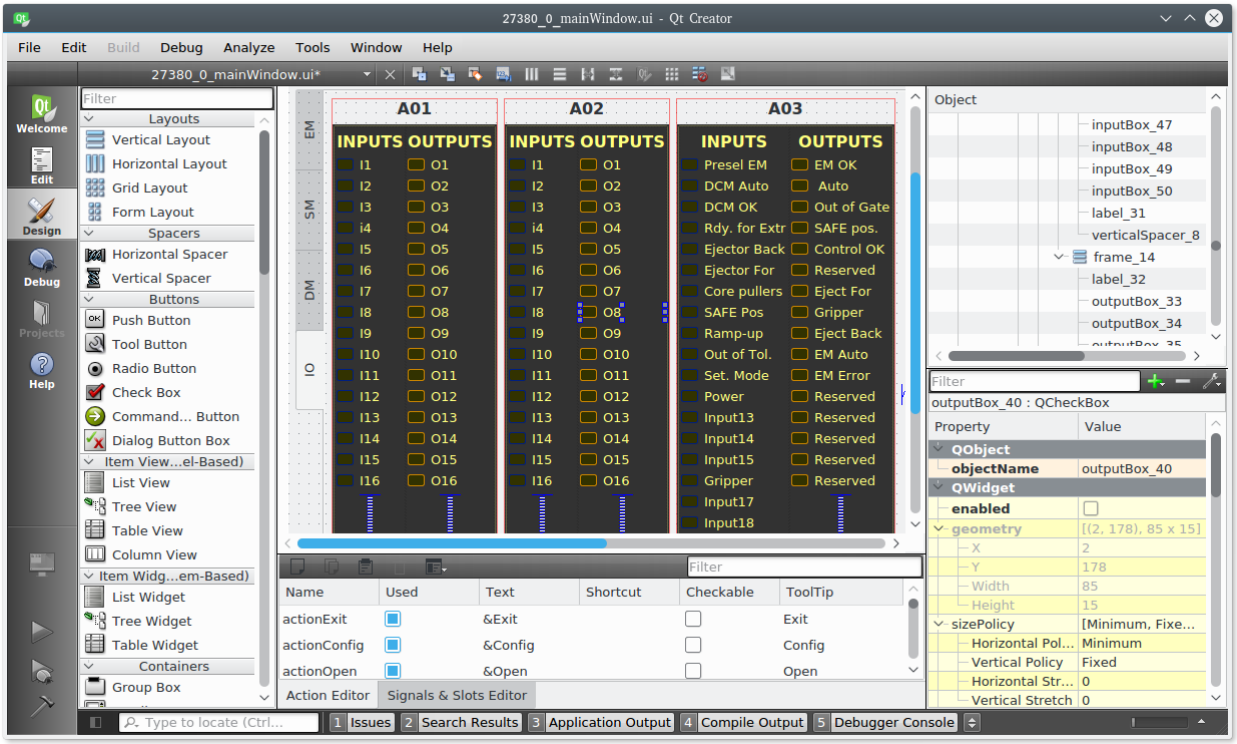
При използването на роботи в индустриални системи е необходима обработката на допълнителни входно – изходни сигнали, с цел комуникация с базовото оборудване. Този модул в действителност се състои от два компонента – компонент работещ на основния логически контролер и компонент работещ на разработения входно изходен разширителен модул.

Първият компонент на практика използва клас *codeThread* за комуникация, тъй като протоколът е съгласуван с протокола на сервозадвижванията. Разликата е в по-нататъшната обработка на информацията, като в зависимост от адреса на входно-изходния модул се попълват съответните структури (*табл. 32*).

Таблица 32 Попълване на структурите, в зависимост от адреса на входно-изходния модул

```
case 100:
   powerOffTimer.restart();
   if(buf[1]==0x3){
      quint32 extIns=0;
      extIns=(quint8)buf[5];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[6];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[3];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[4];
      for(int i=0;i<sizeof(inLeds)/sizeof(inLeds[0]);i++){
         if(extIns&1)inLeds[i]->setChecked(true);
         else inLeds[i]->setChecked(false);
         extIns>>=1;
      }
      ioExtUpdated=true;
   }
   break;
case 201:
   powerOffTimer.restart();
   if(buf[1]==0x3){
      quint32 extIns=0;
      extIns=(quint8)buf[5];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[6];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[3];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[4];
      for(int i=0;i<16;i++){
         if(extIns&1)inLedsDMSM[i]->setChecked(true);
         else inLedsDMSM[i]->setChecked(false);
         extIns>>=1;
      }
      ioExtUpdated201=true;
   }
   break;
case 202:
   powerOffTimer.restart();
   if(buf[1]==0x3){
      quint32 extIns=0;
      extIns=(quint8)buf[5];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[6];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[3];
      extIns<<=8;
      extIns|=(quint8)buf[4];
      for(int i=16;i<32;i++){
         if(extIns&1)inLedsDMSM[i]->setChecked(true);
         else inLedsDMSM[i]->setChecked(false);
         extIns>>=1;
      }
      ioExtUpdated202=true;
   }
   break;
default:
   break;
}
break;
```

Осигурено е и графично представяне на входно-изходните канали (*фиг. 142*).



Фиг. 142 Графично представяне на входно-изходните канали

Вторият компонент е реализиран като основна програма на входно-изходния разширителен модул на базата на едночипов микроконтролер от серията *dsPIC33F* на *Microchip*. Сканирането на състоянието на входовете се извършва в подпрограма, обработваща прекъсванията от таймер на всяка милисекунда. Извършва се цифрова филтрация с цел повишаване шумоустойчивостта и състоянията се запомнят във вътрешната памет, която е достъпна чрез комуникационния протокол. Съответно при подаване на команда за запис в съответен адрес, се обновяват изходните канали.

3.11. Модул за реализация на базовата логика на процеса

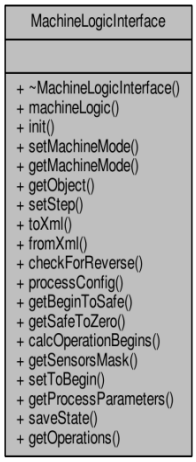
Приложението на индустриалните роботи обикновено е свързано с решаването на сложни и разнообразни задачи за позициониране, движение и манипулации, подчинени на специфична за всеки процес логика. Това разнообразие налага използването на система за динамично зареждане на програмни модули, специфични за всяко конкретно решение. По този начин системата за управление на самия робот (движения, обработване на входно-изходни сигнали и система за комуникация) остава единна, а специфичната логика се отделя в специализиран динамично зареждащ се модул (плъгин). Това дава огромна гъвкавост на цялостното програмно осигуряване и адаптивност при всеки конкретен случай. За реализирането на тази идеология са използвани инструментите, предоставяни от средата *Qt*.

Първа стъпка е дефинирането на интерфейса към плъгина (*табл. 33*), т.е.- набора от функции за взаимодействие с основния програмен код (*фиг. 143*):

Таблица 33 Дефиниране на интерфейса към плъгина на основния програмен код

```
#ifndef MACHINELOGICINTERFACE_H
#define MACHINELOGICINTERFACE_H
#include <QtPlugin>
#include "defines.h"
#include "commandsdata.h"
#include "../platform.h"
#include "../plugins/common/processparameters.h"
class MachineLogicInterface
```

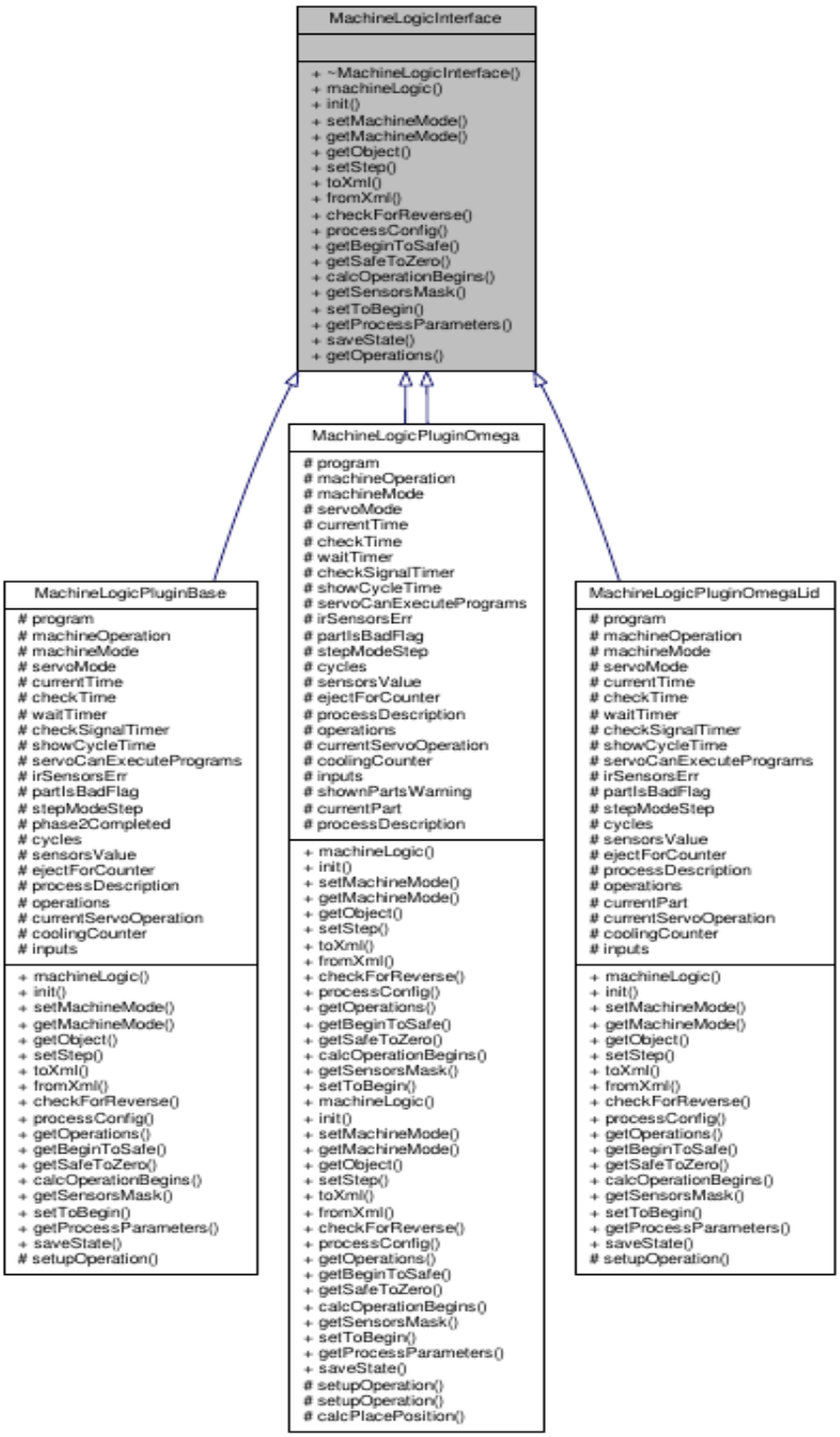
```
{
public:
    virtual ~MachineLogicInterface() {}
    virtual void machineLogic(ServoMode sm, bool canExecute, quint32 in, quint8 sensV, bool CheckInputs, bool
autoInSetupMode)=0;
    virtual void init()=0;
    virtual void setMachineMode(enum MachineMode mode)=0;
    virtual enum MachineMode getMachineMode()=0;
    virtual QObject * getObject()=0;
    virtual void setStep(bool on)=0;
    virtual const QDomElement toXml(QDomElement &qde)=0;
    virtual void fromXml(const QDomElement &qde)=0;
    virtual void checkForReverse()=0;
    virtual int processConfig()=0;
    virtual CommandsData &getBeginToSafe(void)=0;
    virtual CommandsData &getSafeToZero(void)=0;
    virtual void calcOperationBegins()=0;
    virtual quint8 getSensorsMask()=0;
    virtual void setToBegin()=0;
    virtual ProcessParameters &getProcessParameters()=0;
    virtual void saveState()=0;
    virtual QList<CommandsData> &getOperations()=0;
    /*
signals:
    void setProgram(CommandsData &pg);
    */
};
Q_DECLARE_INTERFACE(MachineLogicInterface,"com.Spesima.Plugin.MachineLogicInterface/1.0")
#endif // MACHINELOGICINTERFACE_H
```



Фиг. 143 Набор от функции за взаимодействие с основния програмен код

Дефиницията на интерфейса включва изцяло виртуални функции, които ще бъдат реализирани при програмирането на конкретни решения за управление на базовата логика.

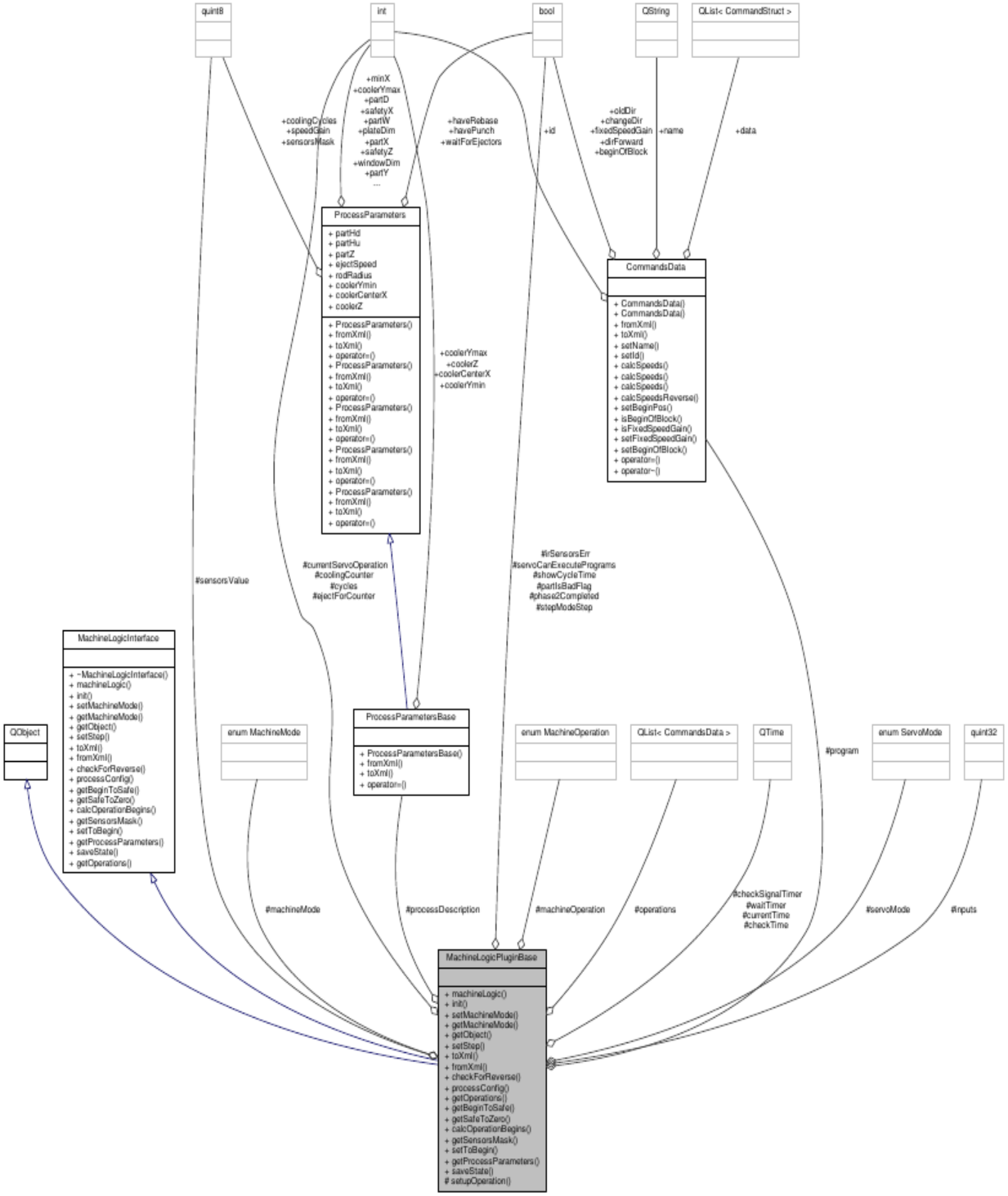
В рамките на настоящия проект са разработени няколко плъгина за машинна логика, реализиращи описания интерфейс за взаимодействие с основното програмно осигуряване, отговарящи на сценарии близки до реалните (*фиг. 144*).



Фиг. 144 Плъгини за машинна логика, реализиращи описания интерфейс за взаимодействие с основното програмно осигуряване, отговарящи на сценарии близки до реалните

Реализацията на логиката е изпълнена под формата на стейт машина, със съответните състояния, а обратното взаимодействие, с основното програмно осигуряване е осъществено с помощта на механизма *„сигнал-слот“* от програмната платформа *Qt*.

На *фиг. 145* са показани връзките при една от реализациите на плъгин за базова машинна логика.



Фиг. 145 Връзки при реализация на плъгин за базова машинна логика

В *табл. 34* е илюстрирана реализацията на стейт машината.

Таблица 34 Реализация на стейт машината

```
void MachineLogicPluginBase::machineLogic(enum ServoMode sm, bool canExecute, quint32 in, quint8 sensV,
bool CheckInputs, bool autoInSetupMode)
{
   static int cnt=0;
   bool readyToGo=false;
   servoMode=sm;
   inputs=in;
   servoCanExecutePrograms=canExecute;
   sensorsValue=sensV;
```

```
   // Some output signals
   ++cnt;
   if(checkSignalTimer.elapsed()>2000){
      checkSignalTimer.restart();
      emit resetOutputSignal(CONTROLOK);
   }
   switch (machineMode) {
   case MachineStop:
      emit resetOutputSignal(KUKAAUTO);
#ifdef HAVEIOEXT
      if(servoMode==ServoReady)emit setOutputSignal(YELLOWLAMP);
#endif
      emit resetOutputSignal(READYFORAURO);
      break;
   case MachineStep:
      emit resetOutputSignal(KUKAAUTO);
#ifdef HAVEIOEXT
      emit setOutputSignal(YELLOWLAMP);
#endif
      emit resetOutputSignal(READYFORAURO);
   break;
   case MachineAuto:
      if(CheckInputs){
        if(!autoInSetupMode){
           if(SETTINGMODE){
              //machineStopSlot(true);
              emit machineStopSignal(true);
              break;
           }
        }
        if(DCMAUTO && PRESEL){
#ifdef HAVEIOEXT
           if(servoMode==ServoReady)emit setOutputSignal(KUKAAUTO);
           else {
              if(cnt&1)emit setOutputSignal(KUKAAUTO);
              else emit resetOutputSignal(KUKAAUTO);
           }
           emit resetOutputSignal(YELLOWLAMP);
#else
           emit setOutputSignal(KUKAAUTO);
#endif
           emit setOutputSignal(READYFORAURO);
        }
        else {
           emit resetOutputSignal(KUKAAUTO);
           emit resetOutputSignal(READYFORAURO);
#ifdef HAVEIOEXT
           emit setOutputSignal(YELLOWLAMP);
#endif
        }
      }
      else emit setOutputSignal(KUKAAUTO);
   default:
      break;
   }
   //
   switch(machineMode){
      case MachineStop:
      phase2Completed=false;
      //showSensorsFrame=false;
      emit showSensorsFrameSignal(false);
      break;
```

```
    case MachineGoToBeginRequest:
      if(servoCanExecutePrograms){
        if(servoMode==ServoReady)goToBeginSignal();
      }
    break;
    case MachineAuto:
    case MachineStep:
    case MachineGoToBegin:
      if(servoCanExecutePrograms){
        switch (machineOperation) {
        case StepWaitAtBegin: // Go in
          emit setOutputSignal(EJECTORBACK);
          if(servoMode==ServoReady){
            emit setOutputSignal(GRIPPER);
            cycles++;
            if(showCycleTime){
              emit cycleTimeSignal(currentTime.elapsed()/1000);
              emit clearDebugSignal();
              /*
              userInterface->showCycleTime(currentTime.elapsed()/1000);
              cycleTimeNumber->display(currentTime.elapsed()/1000);
              */
              showCycleTime=false;
            }
            if(machineMode==MachineGoToBegin){
              emit machineStopSignal(true);
              //machineStopSlot(true);
              machineMode=MachineStop;
              break;
            }
            emit setOutputSignal(EMOK);
            emit setOutputSignal(OUTOFGATE);
            readyToGo=false;
            if(CheckInputs){
              if(PHASE2COMPL)phase2Completed=true;
              if(machineMode==MachineAuto){
                //if(DCMAUTO && PRESEL && PHASE2COMPL && DOORSOPENED &&
EJECTORISBACK && GRIPPERSENSOR) {readyToGo=true;}
                if(DCMAUTO && PRESEL && phase2Completed && DOORSOPENED &&
EJECTORISBACK && GRIPPERSENSOR) {phase2Completed=false; readyToGo=true;}
                else{
                  if(!DCMAUTO){phase2Completed=false; emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for DCM
Auto"));}
                  else if(!PRESEL){phase2Completed=false; emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for
Preselection EM"));}
                  //else if(!PHASE2COMPL)emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for Ready for Part
Extraction"));
                  else if(!phase2Completed)emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for Ready for Part
Extraction"));
                  else if(!DOORSOPENED)emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for DCM OK"));
                  else if(!EJECTORISBACK)emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for Ejector Back"));
                  else if(!GRIPPERSENSOR)emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for Gripper to open"));
                }
              }
              if(machineMode==MachineStep){
                if(PRESEL && DOORSOPENED && EJECTORISBACK) readyToGo=true;
              }
              if(KUKAGOTOSAFEPOS){
                emit userInterfaceLog(tr("EM Go to Safe Position"),-1);
                //userInterface->addLog(tr("EM Go to Safe Position"));
                program=operations.at(operations.size()-2); // Begin to Safe position
                emit setProgram(program,operations.size()-2);
```

```
                    servoMode=ServoOperation;
                    //programStep=0;
                    machineOperation=StepSafePos;
                    break;
                }
            }
            else {
                if(waitTimer.elapsed()>500)readyToGo=true;
            }
            if(readyToGo){
                currentTime.restart();
                if(setupOperation(0)){
                    showCycleTime=true;
                    emit resetOutputSignal(EMOK);
                    emit resetOutputSignal(OUTOFGATE);
                    waitTimer.restart();
                    machineOperation=StepInMachine;
                }
            }
        }
        break;
    case StepInMachine: // EM is IN
        emit setOutputSignal(EJECTORBACK);
        if(CheckInputs){
            if(!DOORSOPENED ){
                //emStopSlot(tr("Machine DOOR is closed!"));
                emit emStopSignal(tr("Machine DOOR is closed!"));
                break;
            }
        }
        if(servoMode==ServoReady){
            readyToGo=false;
            if(CheckInputs){
                if(machineMode==MachineAuto){
                    if(!DCMAUTO){ // Execute back movement trajectory
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepReverse0;
                        break;
                    }
                }
                readyToGo=true;
            }
            else {
                if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
            }
            if(readyToGo){
                emit setOutputSignal(GRIPPER); // Open the Gripper
                if(setupOperation(1)){
                    waitTimer.restart();
                    machineOperation=StepReadyToGrip;
                    ejectForCounter=0;
                }
            }
        }
        break;
    case StepReadyToGrip: // Go to PART, ready to handle it
        if(CheckInputs){
            if(!DOORSOPENED ){
                //emStopSlot(tr("Machine DOOR is closed!"));
                emit emStopSignal(tr("Machine DOOR is closed!"));
                break;
            }
```

```
            readyToGo=true;
        }
        if(servoMode==ServoReady){
            if(processDescription.waitForEjectors){
                emit resetOutputSignal(EJECTORBACK);
                emit setOutputSignal(EJECTORFORWARD);
                readyToGo=false;
            }
            if(CheckInputs){
                if(processDescription.waitForEjectors){
                    if(EJECTORISFOR){
                        ejectForCounter++;
                        if(ejectForCounter>3) readyToGo=true;
                    }
                    else {
                        ejectForCounter=0;
                        //userInterface->setInfoLabel(tr("Waiting for Ejector Forward"));
                        emit userInterfaceMessage(tr("Waiting for Ejector Forward"));
                    }
                }
                else readyToGo=true;
                if(machineMode==MachineStep)readyToGo=true;
                if(machineMode==MachineAuto){
                    if(!DCMAUTO){ // Execute back movement trajectory
                        if(processDescription.waitForEjectors){
                            emit resetOutputSignal(EJECTORFORWARD);
                            waitTimer.restart();
                            machineOperation=StepReverse1;
                        }
                        break;
                    }
                }
            }
            else {
                if(waitTimer.elapsed()>100)readyToGo=true;
            }
            if(readyToGo){
                waitTimer.restart();
                emit resetOutputSignal(GRIPPER); // Hold the part
                emit gripPartSignal(true); // for symulator
                machineOperation=StepGrip;
            }
        }
        break;
    case StepGrip:
        if(waitTimer.elapsed()>500){
            readyToGo=false;
            waitTimer.restart();
            if(CheckInputs){
                if(!GRIPPERSENSOR){
                    if(!processDescription.waitForEjectors){
                        emit resetOutputSignal(EJECTORBACK);
                        emit setOutputSignal(EJECTORFORWARD);
                        if(!EJECTORISBACK)readyToGo=true;
                    }
                    else readyToGo=true;
                }
                else {
                    //userInterface->setInfoLabel(tr("Waiting Gripper to close"));
                    emit userInterfaceMessage(tr("Waiting Gripper to close"));
                }
            }
```

```
            else readyToGo=true;
            if(readyToGo){
               if(processDescription.waitForEjectors){
                  emit resetOutputSignal(EJECTORFORWARD);
               }
               if(setupOperation(2)){
                  waitTimer.restart();
                  machineOperation=StepExtract;
                  if(processDescription.waitForEjectors){
                     emit setOutputSignal(EJECTORBACK);
                  }
               }
            }
         }
         break;
      case StepExtract:
         if(CheckInputs){
            if(!DOORSOPENED ){
               //emStopSlot(tr("Machine DOOR is closed!"));
               emit emStopSignal(tr("Machine DOOR is closed!"));
               break;
            }
         }
         if(servoMode==ServoReady){
            if(!processDescription.waitForEjectors){
               emit resetOutputSignal(EJECTORFORWARD);
               emit setOutputSignal(EJECTORBACK);
            }
            readyToGo=false;
            if(CheckInputs){
               readyToGo=true;
            }
            else {
               if(waitTimer.elapsed()>100)readyToGo=true;
            }
            if(readyToGo){
               if(setupOperation(3)){
                  waitTimer.restart();
                  machineOperation=StepGoOut;
               }
            }
         }
         break;
      case StepGoOut:
         if(CheckInputs){
            if(!DOORSOPENED ){
               //emStopSlot(tr("Machine DOOR is closed!"));
               emit emStopSignal(tr("Machine DOOR is closed!"));
               break;
            }
         }
         if(servoMode==ServoReady){
            emit setOutputSignal(EJECTORBACK);
            emit setOutputSignal(EMOK);
            emit setOutputSignal(OUTOFGATE);
            //extractionTimeNumber->display(currentTime.elapsed()/1000);
            emit extractionTimeSignal(currentTime.elapsed()/1000);
            //userInterface->showExtTime(currentTime.elapsed()/1000);
            readyToGo=false;
            if(CheckInputs){
               readyToGo=true;
               if(sensorsValue&processDescription.sensorsMask){
```

```
                    irSensorsErr=true;
                    //userInterface->addLog(tr("IR Sensors Error!"),1);
                    emit userInterfaceLog(tr("IR Sensors Error!"),1);
                  }
                  else irSensorsErr=false;
                }
                else {
                  if(waitTimer.elapsed()>1000)readyToGo=true;
                }
                if(readyToGo){
                  if(setupOperation(4)){
                    emit resetOutputSignal(EJECTORBACK);
                    waitTimer.restart();
                    //showSensorsFrame=true;
                    emit showSensorsFrameSignal(true);
                    machineOperation=StepPartCheck;
                    // ToDo Check sensors if any is active -> throw error and mark part as BAD ! Do not start a
new machine Cycle!!!
                  }
                }
              }
              break;
            case StepPartCheck:
              if(servoMode==ServoReady){
                bool partIsOK;
                readyToGo=false;
                if(waitTimer.elapsed()>1000){
                  if(CheckInputs){
                    if(((sensorsValue&processDescription.sensorsMask)!=processDescription.sensorsMask) ||
irSensorsErr){
                      partIsOK=false;
                      emit resetOutputSignal(CONTROLOK);
                    }
                    else {
                      if(RAMPUP || OUTOFTOLERANCE)partIsOK=false;
                      else partIsOK=true;
                      emit setOutputSignal(CONTROLOK);
                      checkSignalTimer.restart();
                    }
                    readyToGo=true;
                  }
                  else {
                    if(waitTimer.elapsed()>1000){
                      readyToGo=true;
                      if(cycles&1) partIsOK=true;
                      else partIsOK=false;
                     }
                  }
                  if(readyToGo){
                    //userInterface->updateParts(partIsOK);
                    emit updatePartsSignal(partIsOK);
                    if(partIsOK){
                      partIsBadFlag=false;
                      if(setupOperation(5)){
                        //userInterface->addLog(tr("Check Passed"));
                        emit userInterfaceLog(tr("Check Passed"),-1);
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepGoToCooling;
                      }
                    }
                    else {
                      partIsBadFlag=true;
```

```
                    int afterCheckOperation=5; // Always go to cool the part .. we will fork after the cooling
                    // if we don't have program for bad parts, just continue by normal way,just log the bad part
                    if(setupOperation(afterCheckOperation)){
                        QString badPart=tr("Check did not passed:");
                        if(RAMPUP)badPart+=tr("Ramp up");
                        if(OUTOFTOLERANCE)badPart+=tr("Out of tolerance");
                        //userInterface->addLog(badPart,1); // Warning
                        emit userInterfaceLog(badPart,1);
                        waitTimer.restart();
                        if(afterCheckOperation==15)machineOperation=StepGoToBad;
                        else machineOperation=StepGoToCooling;
                    }
                }
            }
        }
    }
    else waitTimer.restart(); // ensure a little time before sensors check to prevent vibration errors
    break;
case StepGoToCooling:
    if(servoMode==ServoReady){
        readyToGo=false;
        if(CheckInputs){
            readyToGo=true;
        }
        else {
            if(waitTimer.elapsed()>500)readyToGo=true;
        }
        if(readyToGo){
            if(setupOperation(6)){
                coolingCounter=0;
                waitTimer.restart();
                //showSensorsFrame=false;
                emit showSensorsFrameSignal(false);
                machineOperation=StepCooling;
            }
        }
    }
    break;
case StepCooling: // Cooling
    if(servoMode==ServoReady){
        readyToGo=false;
        if(CheckInputs){
            readyToGo=true;
        }
        else {
            if(waitTimer.elapsed()>500)readyToGo=true;
        }
        if(readyToGo){
            if(coolingCounter<processDescription.coolingCycles){
                coolingCounter++;
                if(setupOperation(6)){
                    waitTimer.restart();
                    machineOperation=StepCooling;
                }
            }
            else {
                if(partIsBadFlag){
                    int afterCheckOperation=15;
                    // if we don't have program for bad parts, just continue by normal way,just log the bad part
                    if(operations.at(afterCheckOperation).data.size()>1){
                        if(setupOperation(afterCheckOperation)){
                            waitTimer.restart();
```

```
                        machineOperation=StepGoToBad;
                        break;
                    }
                }
            }
            if(processDescription.haveRebase){
                if(setupOperation(7)){
                    waitTimer.restart();
                    machineOperation=StepRebasePut;
                }
            }
            else {
                if(processDescription.havePunch){
                    if(setupOperation(10)){
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepPutInPunch;
                    }
                }
                else {
                    if(setupOperation(13)){
                        // Modify trajectory End point according the part place in rows and columns
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepGoPlaceOKParts;
                    }
                }
            }
        }
    }
    break;
case StepRebasePut:
    if(servoMode==ServoReady){
        readyToGo=false;
        if(CheckInputs){
            readyToGo=true;
        }
        else {
            if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
        }
        if(readyToGo){
            if(setupOperation(8)){
                waitTimer.restart();
                machineOperation=StepRebase;
            }
        }
    }
    break;
case StepRebase:
    if(servoMode==ServoReady){
        readyToGo=false;
        if(CheckInputs){
            readyToGo=true;
        }
        else {
            if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
        }
        if(readyToGo){
            if(setupOperation(9)){
                waitTimer.restart();
                machineOperation=StepRebaseTake;
            }
        }
```

```
            }
            break;
        case StepRebaseTake:
            if(servoMode==ServoReady){
                readyToGo=false;
                if(CheckInputs){
                    readyToGo=true;
                }
                else {
                    if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
                }
                if(readyToGo){
                    if(setupOperation(10)){
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepPutInPunch;
                    }
                }
            }
            break;
        case StepPutInPunch:
            if(servoMode==ServoReady){
                readyToGo=false;
                if(CheckInputs){
                    readyToGo=true;
                }
                else {
                    if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
                }
                if(readyToGo){
                    if(setupOperation(11)){
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepWaitPunch;
                    }
                }
            }
            break;
        case StepWaitPunch:
            if(servoMode==ServoReady){
                readyToGo=false;
                if(CheckInputs){
                    readyToGo=true;
                }
                else {
                    if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
                }
                if(readyToGo){
                    if(setupOperation(12)){
                        waitTimer.restart();
                        machineOperation=StepGetFromPunch;
                    }
                }
            }
            break;
        case StepGetFromPunch:
            if(servoMode==ServoReady){
                readyToGo=false;
                if(CheckInputs){
                    readyToGo=true;
                }
                else {
                    if(waitTimer.elapsed()>200)readyToGo=true;
                }
```

```
            if(readyToGo){
               if(setupOperation(13)){
                  // Modify trajectory End point according the part place in rows and columns
                  waitTimer.restart();
                  machineOperation=StepGoPlaceOKParts;
               }
            }
         }
         break;
      case StepGoPlaceOKParts: // Go To OK Position
         if(servoMode==ServoReady){
            emit setOutputSignal(GRIPPER);
            emit gripPartSignal(false); // for symulator
            if(waitTimer.elapsed()>1500 || GRIPPERSENSOR){
               readyToGo=false;
               if(CheckInputs){
                  readyToGo=true;
               }
               else {
                  if(waitTimer.elapsed()>500)readyToGo=true;
               }
               if(readyToGo){
                  if(setupOperation(14)){ // From OK to Begin
                     waitTimer.restart();
                     machineOperation=StepWaitAtBegin;
                  }
               }
            }
         }
         else waitTimer.restart();
         break;
      case StepGoToBad: // Go To Bad Position
         if(servoMode==ServoReady){
            //showSensorsFrame=false;
            emit showSensorsFrameSignal(false);
            emit setOutputSignal(GRIPPER);
            emit gripPartSignal(false); // for symulator
            if(waitTimer.elapsed()>2000 || GRIPPERSENSOR){
               readyToGo=false;
               if(CheckInputs){
                  readyToGo=true;
               }
               else {
                  if(waitTimer.elapsed()>500)readyToGo=true;
               }
               if(readyToGo){
                  if(setupOperation(16)){ // From BAD to Begin
                     waitTimer.restart();
                     machineOperation=StepWaitAtBegin;
                  }
               }
            }
         }
         else waitTimer.restart();
         break;
      case StepReverse0:
         if(servoMode==ServoReady){

            program=operations.at(0);
            program=~program;
            //programStep=0;
            servoMode=ServoOperation;
```

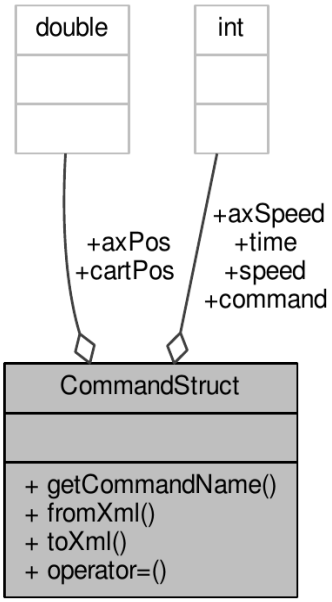
```
                emit setProgram(program,0);
                waitTimer.restart();
                machineOperation=StepWaitAtBegin;
            }
            break;
        case StepReverse1:
            if(servoMode==ServoReady){
                program=operations.at(1);
                program=~program;
                servoMode=ServoOperation;
                emit setProgram(program,1);
                waitTimer.restart();
                machineOperation=StepReverse0;
            }
            break;
        case StepSafePos:
            if(servoMode==ServoReady){
                emit setOutputSignal(ATSAFEPOSITION);
                if(DCMAUTO && PRESEL){
                    if(!KUKAGOTOSAFEPOS){

                        emit userInterfaceLog(tr("Out from Safe Position"),-1);
                        emit resetOutputSignal(ATSAFEPOSITION);
                        program=operations.at(operations.size()-2);
                        program=~program;
                        //programStep=0;
                        emit setProgram(program,operations.size()-2);
                        servoMode=ServoOperation;
                        machineOperation=StepWaitAtBegin;
                    }
                }
            }
            break;
        default:
            break;
        }
    }
    break;
  }
}
```

3.12. Модул за синтез, съхранение и обработка на програмирани движения

Неразделна част от програмното осигуряване е възможността за синтезиране, генериране, обработване и съхранение на програмирани движения на индустриалния робот, или така нареченото потребителско програмно осигуряване.

За целта е създадена специализирана структура за представяне на програмираните движения, като блокове от последователни команди за позициониране и/или ориентация на робота в пространството на неговите стави или в декартовото пространство. Така съставените блокове от движения се активират от модула за изпълнение на базовата машинна логика в съответните моменти.

На *фиг. 146* е показана структурата на един елемент от блок на потребителската програма.



Фиг. 146 Структура на един елемент от блок на потребителската програма

За съхранение и зареждане на програмите е използван *XML стандарт* за представяне на данни. Тук основни функции се явяват функциите *void fromXml(const QDomElement &)* и *const QDomElement toXml(QDomElement &)* на класа *CommandsData*, показани в *табл. 35*.

Таблица 35 Функции *void fromXml(const QDomElement &)* и *const QDomElement toXml(QDomElement &)* на класа *CommandsData*

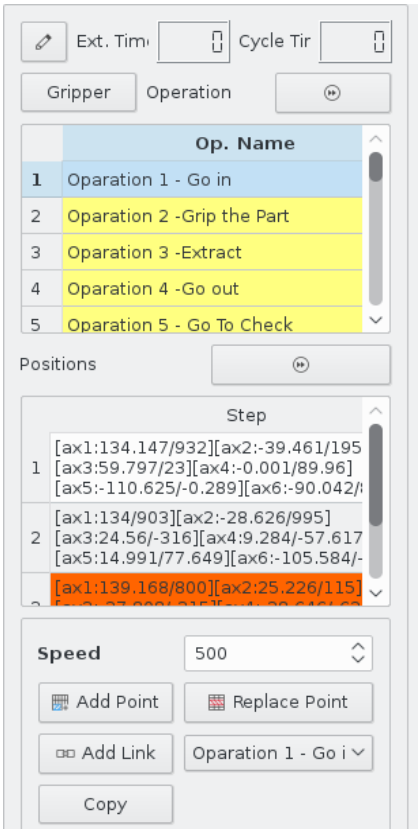
```
void CommandsData::fromXml(const QDomElement &qde)
{
   id=qde.attribute("id").toInt();
   name=qde.attribute("name");
   beginOfBlock=qde.attribute("Block","0").toInt();
   fixedSpeedGain=qde.attribute("fixedSpeedGain","0").toInt();
   data.clear();
   int s=qde.attribute("commandDataSize","0").toInt();
   data.reserve(s);
   for (QDomNode n = qde.firstChild() ; !n.isNull() ; n = n.nextSibling()) {
      QDomElement elmts = n.toElement();
      if(elmts.tagName()=="xmldata"){
            CommandStruct cs;
            cs.fromXml(elmts);
            data.insert(elmts.attribute("dataId","0").toInt(),cs);
      }
   }
}
const QDomElement CommandsData::toXml(QDomElement &qde) const
{
   QDomElement xml_element=qde;
   xml_element.setAttribute("name",name);
   xml_element.setAttribute("id",id);
   xml_element.setAttribute("Block",beginOfBlock);
   xml_element.setAttribute("fixedSpeedGain",fixedSpeedGain);
   xml_element.setAttribute("commandDataSize",data.size());
   QDomDocument xml_document;
   for(int i=0;i<data.size();i++){
         QDomElement xml_data=xml_document.createElement("xmldata");
         data[i].toXml(xml_data);
         xml_data.setAttribute("dataId",i);
         xml_element.appendChild(xml_data);
   }
   return xml_element;
}
```

Съответните функции от структурата за съхранение на единичното движение, са показани в *табл. 36*.

Таблица 36 Функции от структурата за съхранение на единичното движение

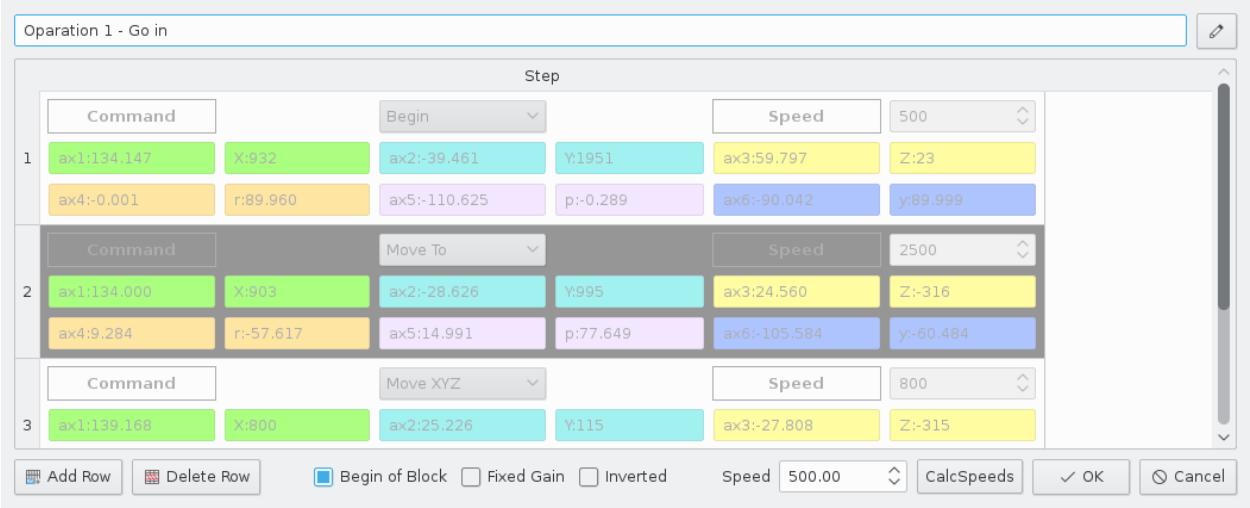
```
void CommandStruct::fromXml(const QDomElement &qde)
{
   for(int i=0;i<6;i++){
      axPos[i]=qde.attribute("axPos"+QString::number(i)).toDouble();
      axSpeed[i]=qde.attribute("axSpeed"+QString::number(i)).toInt();
      cartPos[i]=qde.attribute("cartPos"+QString::number(i)).toDouble();
   }
   command=qde.attribute("command").toInt();
   time=qde.attribute("time").toInt();
   speed=qde.attribute("speed").toInt();
}
const QDomElement CommandStruct::toXml(QDomElement &qde) const
{
   QDomElement xml_element=qde;
   for(int i=0;i<6;i++){
      xml_element.setAttribute("axPos"+QString::number(i),axPos[i]);
      xml_element.setAttribute("axSpeed"+QString::number(i),axSpeed[i]);
      xml_element.setAttribute("cartPos"+QString::number(i),cartPos[i]);
   }
   xml_element.setAttribute("command",command);
   xml_element.setAttribute("time",time);
   xml_element.setAttribute("speed",speed);
   return xml_element;
}
```

На *фиг. 147* е илюстрирана системата за визуализиране и въвеждане на програмни движения на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*.

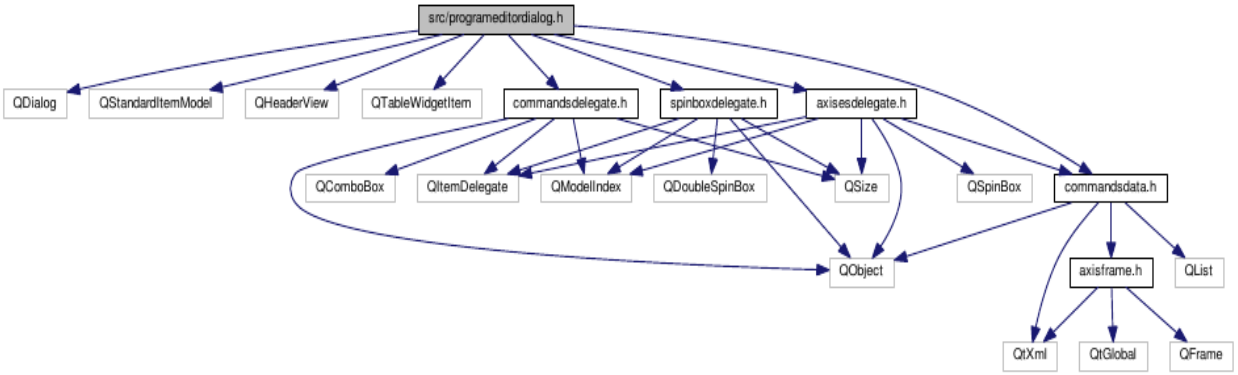


Фиг. 147 Система за визуализиране и въвеждане на програмни движения на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

На *фиг. 148* се вижда работата на вградения редактор на програмни движения, а на *фиг. 149* е показана структурата на съответния клас.



Фиг. 148 Работа на вградения редактор на програмни движения



Фиг. 149 Структура на съответния клас

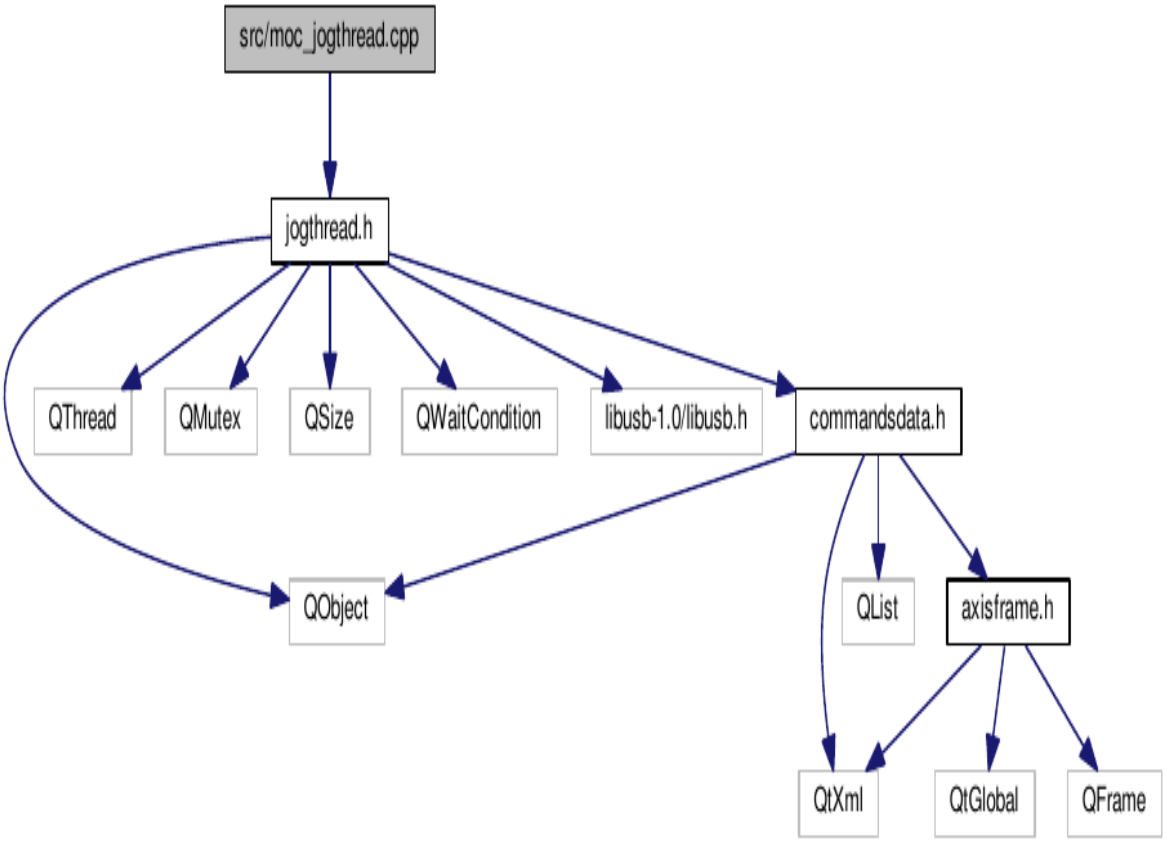
3.13. Модул ръчно управление

За улеснение на оператора е разработена цялостна система за безжично дистанционно ръчно управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*. Управлението предоставя възможност за управление на индивидуални оси (стави) на робота, както и за извършване на движения в декартовото пространство.

Модулът може да се раздели условно на две части – система за комуникация със специализираното апаратно средство и система за генериране на задание към робота, на базата на получената информация от дистанционния пулт.

За поддръжка на комуникацията с дистанционния пулт е разработен специализиран клас *JogThread*, който работи като отделна нишка (*thread*) на основния процес.

На *фиг. 150* е показана структурата на класа *JogThread*.



Фиг. 150 Структура на класа *JogThread*

Посредством механизмите *„сигнал-слот“* се предават сигнали към основния програмен модул, където се генерират съответните команди към сервозадвижванията на осите, в зависимост от типа на нужното движение (движение в пространството на ставите на робота или в декартовото пространство).

В *табл. 37* са показани съответните пасажи от код за движение по оси и за движение в декартовото пространство.

Таблица 37 Пасажи от код за движение по оси и за движение в декартовото пространство

```
case ServoJog:
  if(servoCanExecutePrograms){
    servoCanExecutePrograms=false;
    resetServoOutput(EMOK);
  }
  resetServoOutput(EMOK);
  resetServoOutput(OUTOFGATE);
  for(int ax=0;ax<6;ax++){
    if(axLowerLimits[ax]){
      if(axises[ax]->getPositionAngle()<=axLowerLimits[ax])
        jogMove(ax,0);
    }
    if(axUpperLimits[ax]){
      if(axises[ax]->getPositionAngle()>=axUpperLimits[ax])
        jogMove(ax,0);
    }
  }
  mutexEM.lock();
  jogInProcessEM=true;
    if(jogAx){

      if(axises[jogAx-1]->isAxEnabled()){
        if(jogTimeout.elapsed()>200){
          jogSpeed=0;
```

```
                    //qDebug()<<"jog timeout";
                }
                if(jogSpeed){// Disables Easy Return
                    lastOperation=-1;lastStep=-1;
                }
                jogMove(jogAx-1,jogSpeed);
            }
        }
        else{
#ifdef HAVEIOEXT

#endif
        }
        if(USECANBUS){
            for(int i=0;i<6;i++){
                if(axises[i]->isAxEnabled())
                    gotoPosition(i,axises[i]->getSpeedProfilePosition(),CANSCANMS+5);
            }
        }
        jogInProcessEM=false;
        mutexEM.unlock();
    break;
    case ServoEndJog:
      {
        if(servoCanExecutePrograms){
            servoCanExecutePrograms=false;
        }
        bool inJog=false;
        if(!USECANBUS){
            for(int i=0;i<6;i++){
                if(axises[i]->isAxEnabled()){
                    if(axises[i]->isInJogMode()){
                        inJog=true;
                        axises[i]->setTargetPosition(axises[i]->getPosition());
                        jogOffCmd(i);
                    }
                    else gotoPosition(i,axises[i]->getPosition(),20);
                }
            }
        }
        else {
            for(int i=0;i<6;i++){
                jogMove(i,0);
                gotoPosition(i,axises[i]->getSpeedProfilePosition(),CANSCANMS+5);
                if(axises[i]->getSpeedProfileSpeed())inJog=true;
            }
        }
        if(!inJog){
            for(int i=0;i<6;i++)axises[i]->enableControls(AxisFrame::MovementControls);
            servoMode=ServoReady;
            addLog(("Servo Exited Jog and Redy"),0);

        }
      }
    break;
```

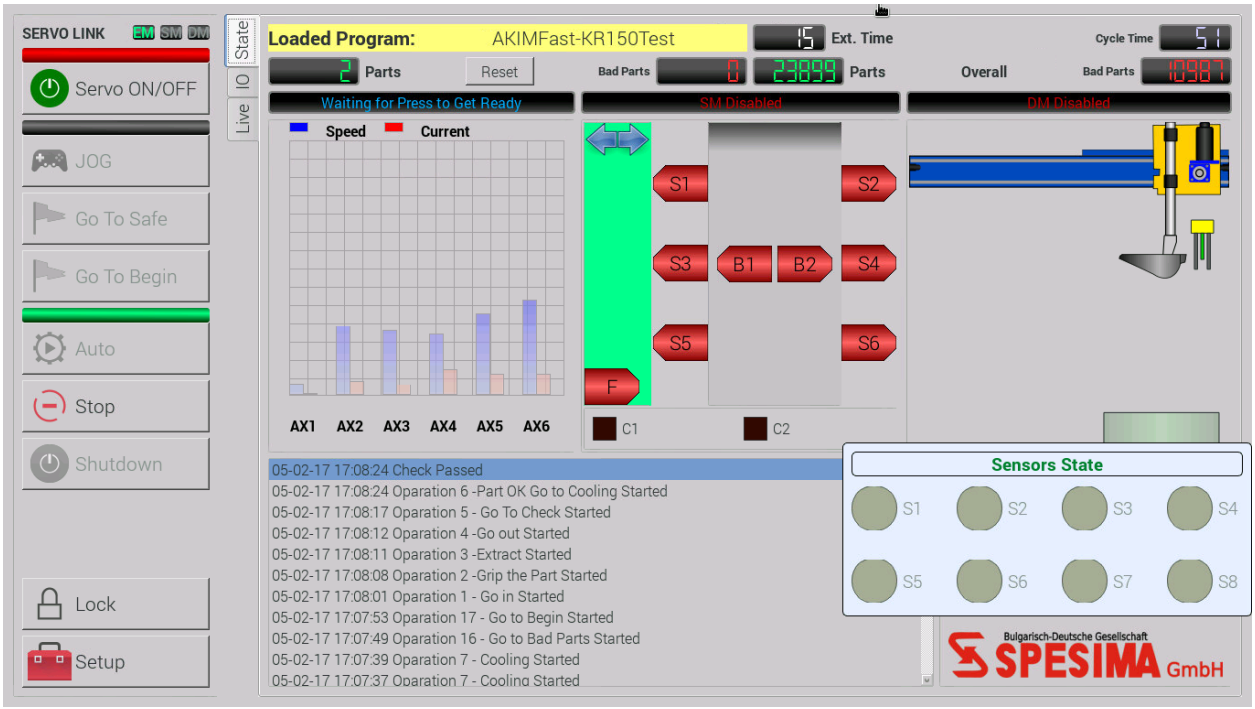
```
  case ServoCartesianJog:
    mutexEM.lock();
    if(cartJog.xStep<cartJog.xTargetStep)cartJog.xStep++;
    else if(cartJog.xStep>cartJog.xTargetStep)cartJog.xStep--;
    if(cartJog.xStep<0)cartJog.xStep=0;
    if(cartJog.yStep<cartJog.yTargetStep)cartJog.yStep++;
```

```
        else if(cartJog.yStep>cartJog.yTargetStep)cartJog.yStep--;
        if(cartJog.yStep<0)cartJog.yStep=0;
        if(cartJog.zStep<cartJog.zTargetStep)cartJog.zStep++;
        else if(cartJog.zStep>cartJog.zTargetStep)cartJog.zStep--;
        if(cartJog.zStep<0)cartJog.zStep=0;
        if(jogSpeed>0){
           lastOperation=-1;lastStep=-1;  // Disables Easy Return
           if(cartJog.xStep)cartJog.curX=robotX+cartJog.xStep;
           if(cartJog.yStep)cartJog.curY=robotY+cartJog.yStep;
           if(cartJog.zStep)cartJog.curZ=robotZ+cartJog.zStep;
        }
        else if(jogSpeed<0){
           lastOperation=-1;lastStep=-1;  // Disables Easy Return
           if(cartJog.xStep)cartJog.curX=robotX-cartJog.xStep;
           if(cartJog.yStep)cartJog.curY=robotY-cartJog.yStep;
           if(cartJog.zStep)cartJog.curZ=robotZ-cartJog.zStep;
        }

        if(cartJog.xStep==0 && cartJog.yStep==0 && cartJog.zStep==0)jogSpeed=0;
        mutexEM.unlock();

           moveXYZ(cartJog.curX,cartJog.curY,cartJog.curZ,cartJog.rollB,cartJog.pitchB,cartJog.yawB,cartJog.speed);


        break;
     case ServoEndCartesianJog:
     {
        qDebug()<<"Ending Cartesian Jog";
        bool inPos=true;
        cartJog.xTargetStep=cartJog.yTargetStep=cartJog.zTargetStep=0;
        for(int i=0;i<6;i++){
           if(!axises[i]->isInPosition()){inPos=false;break;}
        }
        if(inPos)servoMode=ServoReady;
     }
        break;
```

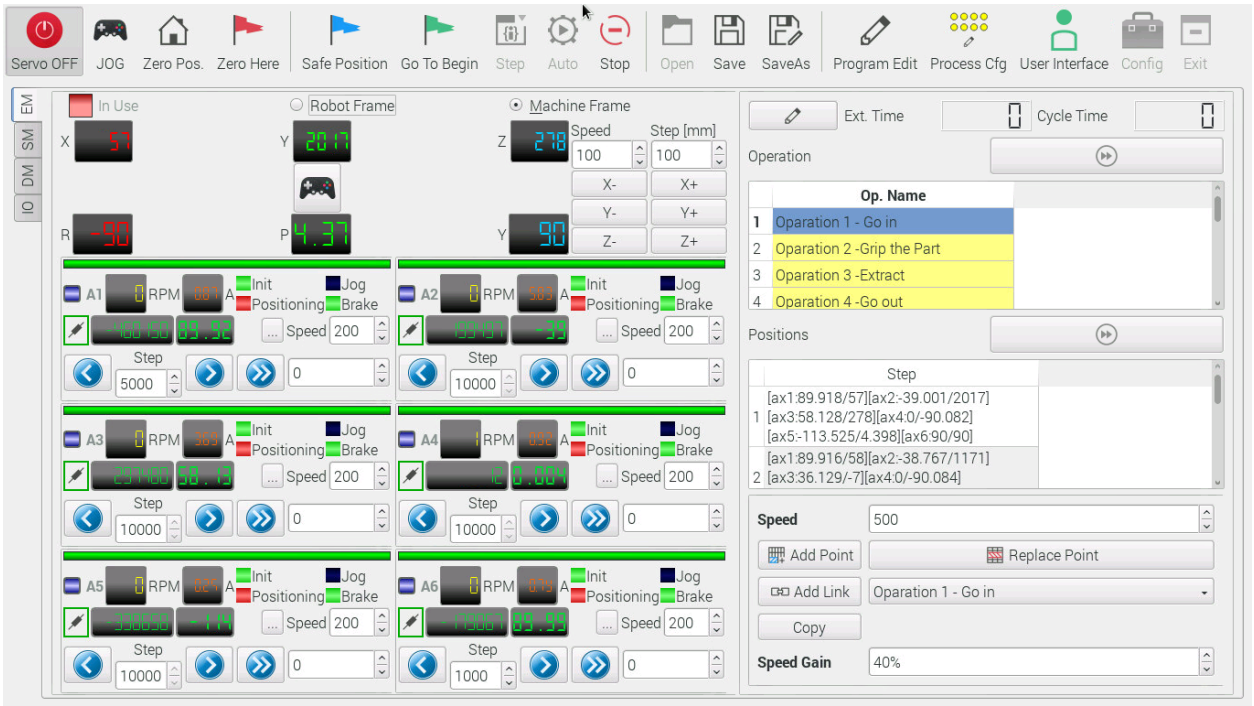
3.14. Модул за графичен потребителски интерфейс

Всяка съвременна система за управление трябва да предоставя и съответния потребителски интерфейс за работа, настройка и конфигуриране на системата. За целта е разработен двукомпонентен потребителски интерфейс, ориентиран за работа със сензорни диспеи.

Графичният потребителски интерфейс условно е разделен на два основни компонента – интерфейс на оператора, който е опростен и включва само базови елементи за контрол и визуализация и инженерен интерфейс за пълен контрол на роботизираната система: програмиране, диагностика и настройка. На *фиг. 151* и *фиг. 152* са показани съответно операторския и инженерния интерфейс.

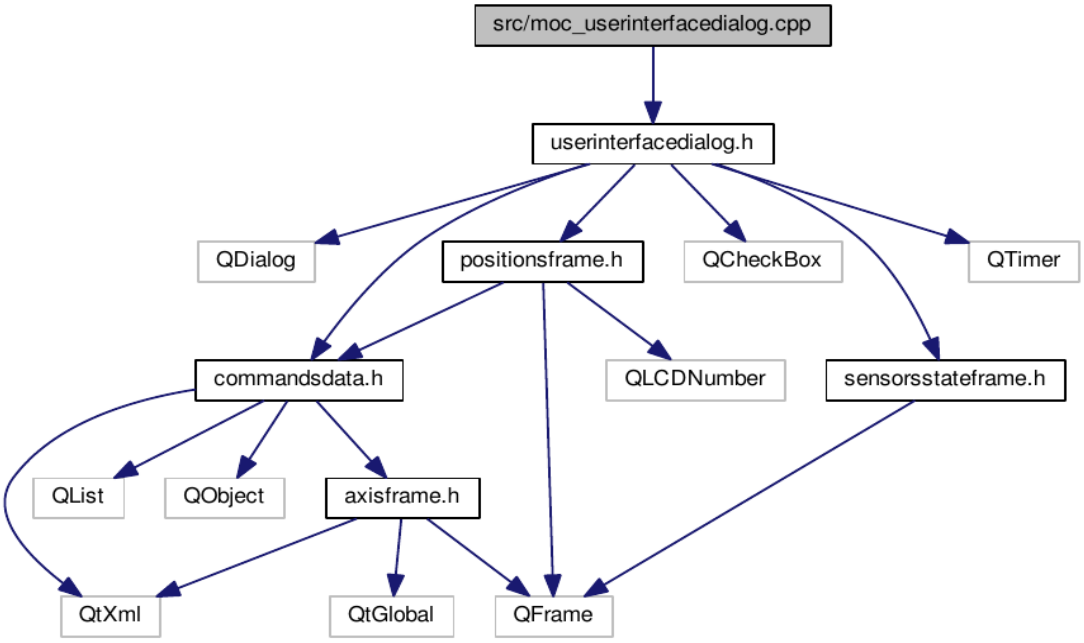


Фиг. 151 Графичен операторски интерфейс на операторския пулт за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*



Фиг. 152 Графичен инженерен интерфейс на операторския пулт за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

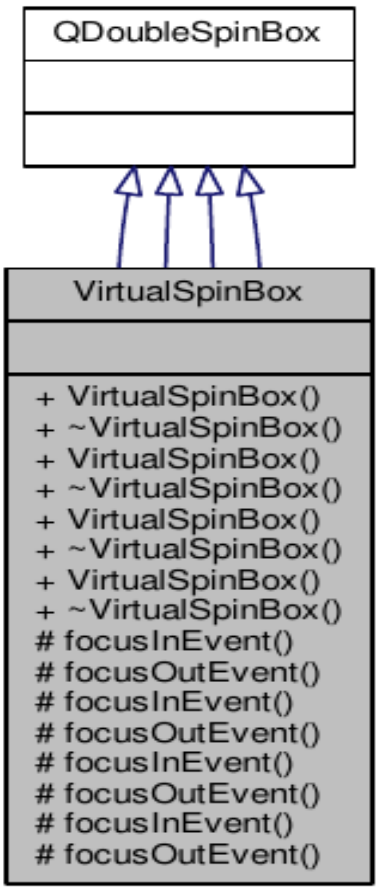
Потребителският интерфейс на оператора е отделен в специализиран клас, който от своя страна взаимодейства с основния програмен процес, посредством системата *„сигнал-слот“* (*фиг. 153*).



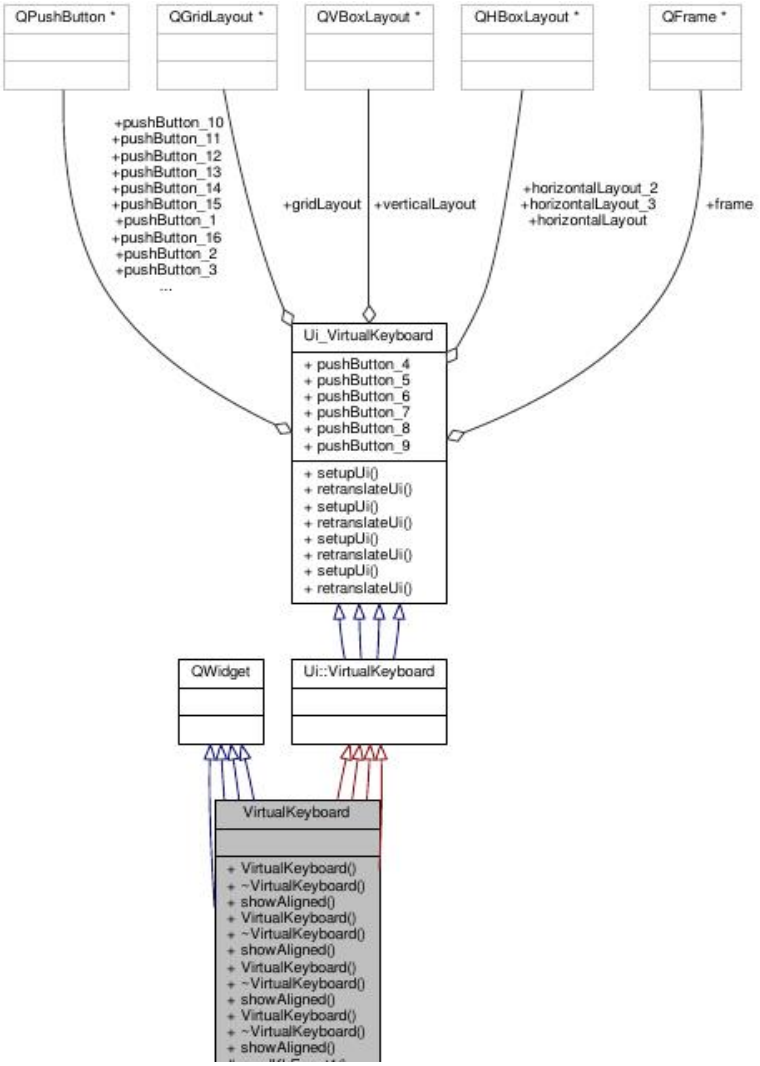
Фиг. 153 Структура на специализирания клас за работа с потребителския интерфейс

Особеност при изграждането на потребителския интерфейс е възможността за работа със сензори дисплеи. За тази цел са създадени два класа за предоставяне на виртуални екранни клавиатури за въвеждане на информация. Първият клас предоставя само цифрова клавиатура, а вторият – пълен набор от знаци.

Цифровата версия е свързана с класа *VirtualSpinBox* (*фиг. 154*) и е със структура показана на *фиг. 155*.

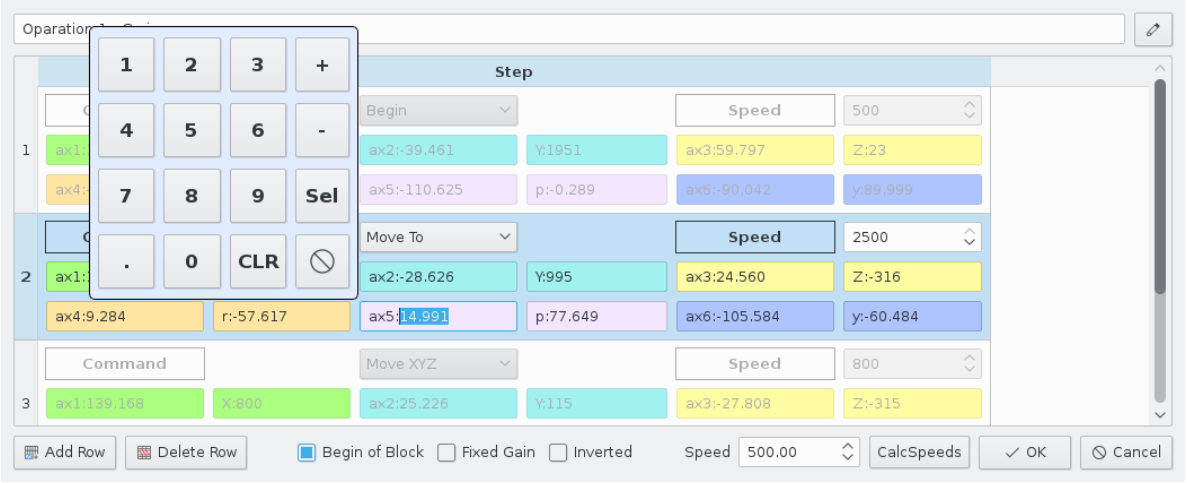


Фиг. 154 Структура на елементите от класа *VirtualSpinBox*



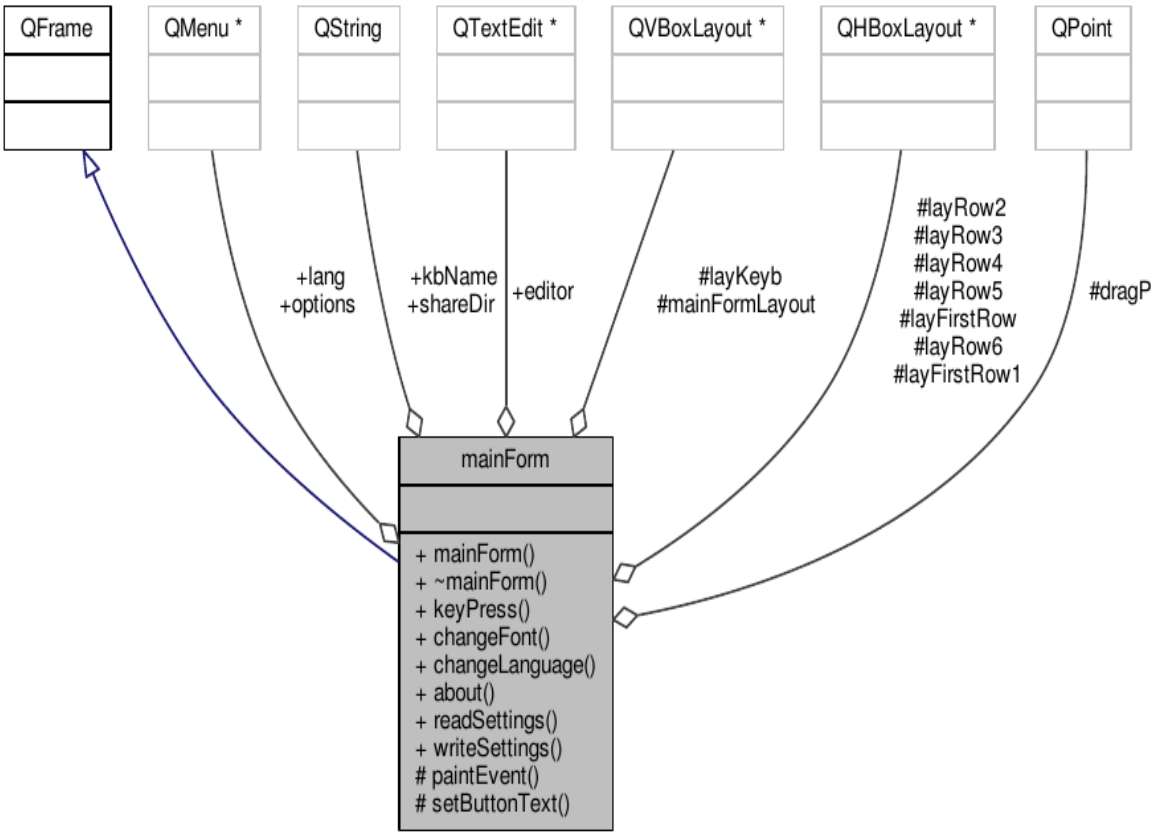
Фиг. 155 Структура на класа *VirtualSpinBox*

На *фиг. 156* е илюстрирано използването на цифровата екранна клавиатура, в процес на редактиране потребителската програма.



Фиг. 156 Цифрова екранна клавиатура, в процес на редактиране потребителската програма

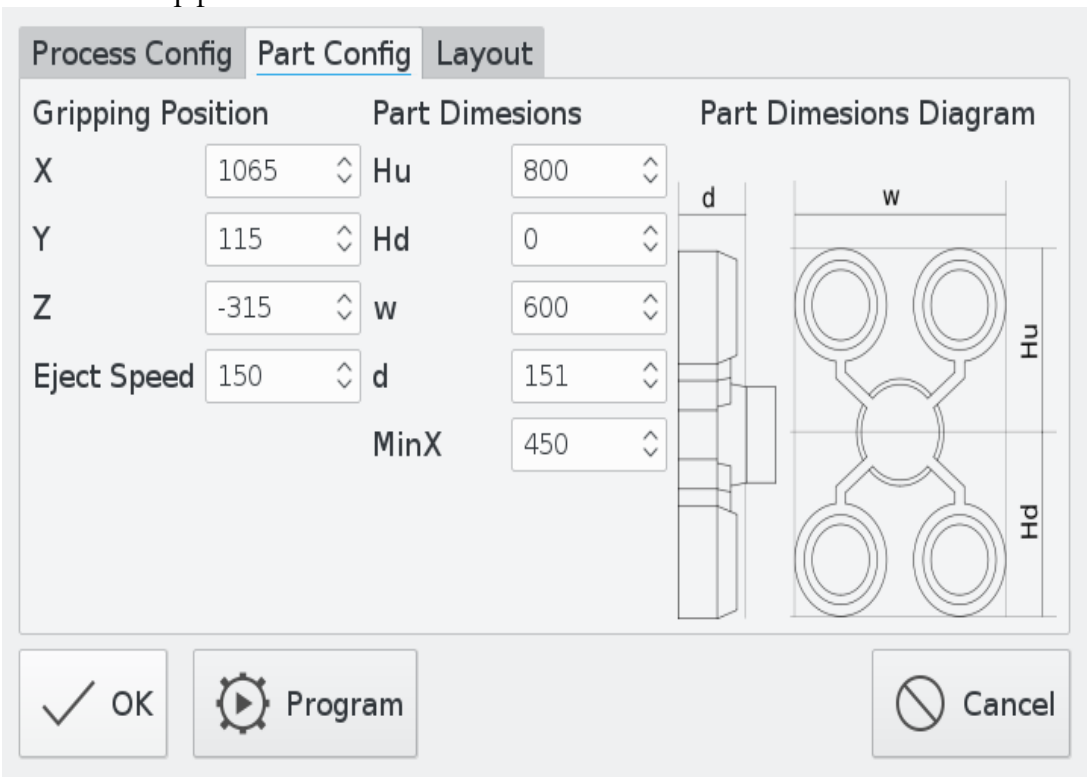
На *фиг. 157* е показана структурата на класа, реализиращ пълна символна виртуална клавиатура.



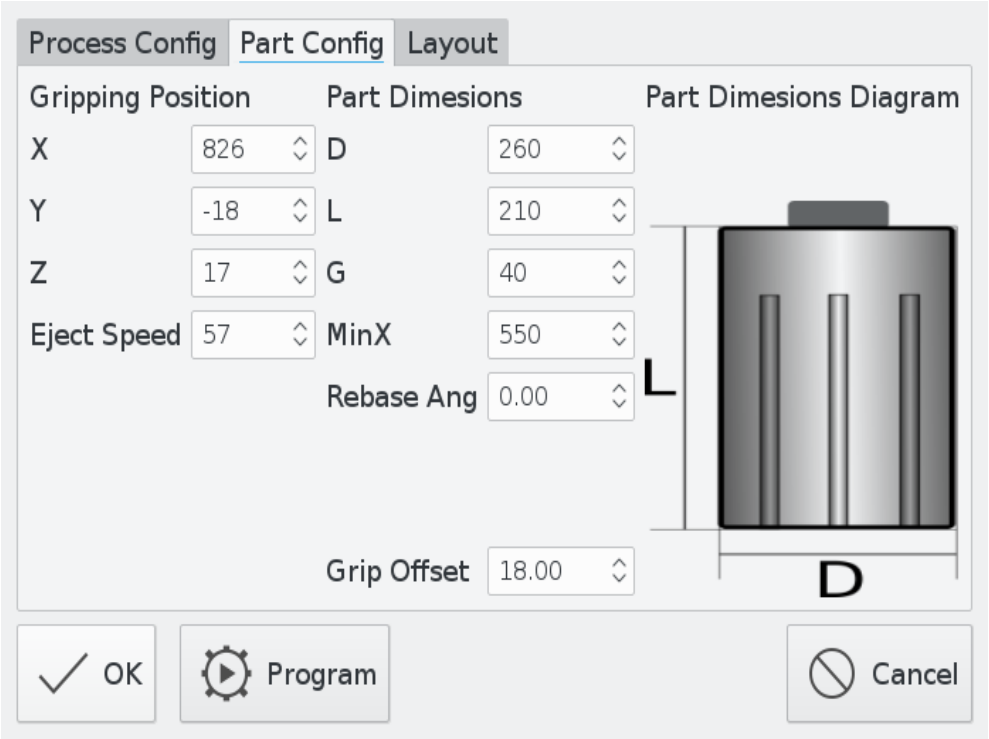
Фиг. 157 Структура на класа, реализиращ пълна символна виртуална клавиатура

Важен компонент на графичния потребителски интерфейс е задаването и редактирането на параметрите на модула за машинна логика, като всеки плъгин носи със себе си и специфичен потребителски интерфейс, т.е. този модул се явява отчасти динамичен и се зарежда в зависимост от конкретната реализация на роботизираната система.

На *фиг. 158* и *фиг. 159* са показани два различни сценария за работа, със съответните потребителски интерфейси към тях.



Фиг. 158 Сценарий 1 за работа с потребителския интерфейс

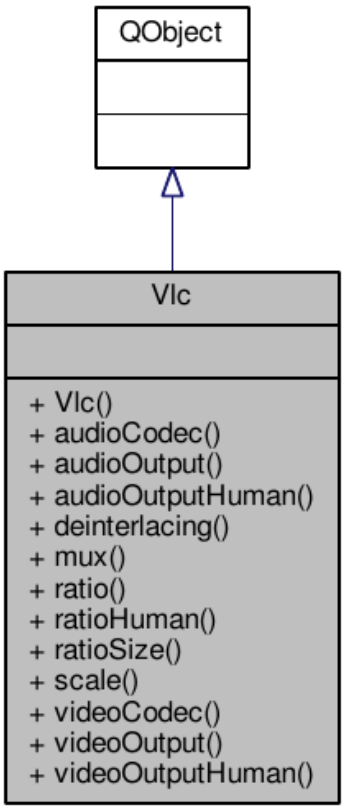


Фиг. 159 Сценарий 2 за работа с потребителския интерфейс

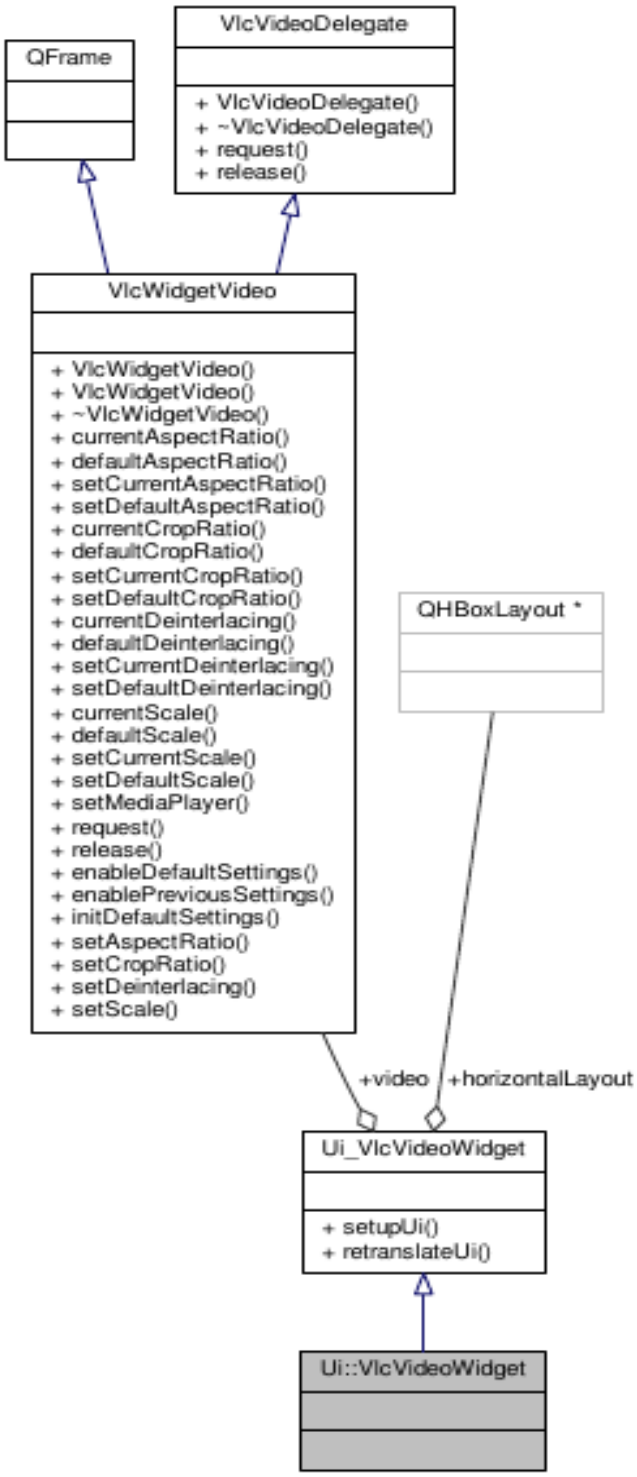
3.15. Модул спомагателни функции

Този модул представлява съвкупност от спомагателни функции и класове, необходими за пълноценното функциониране на програмното осигуряване.

Друг спомагателен клас е класът за показване на поточно видео в рамките на потребителския интерфейс на оператора, базиран на резултатите от работата на *VideoLAN* (*фиг. 160* и *фиг. 161*).



Фиг. 160 Клас за показване на поточно видео в рамките на потребителския интерфейс на оператора

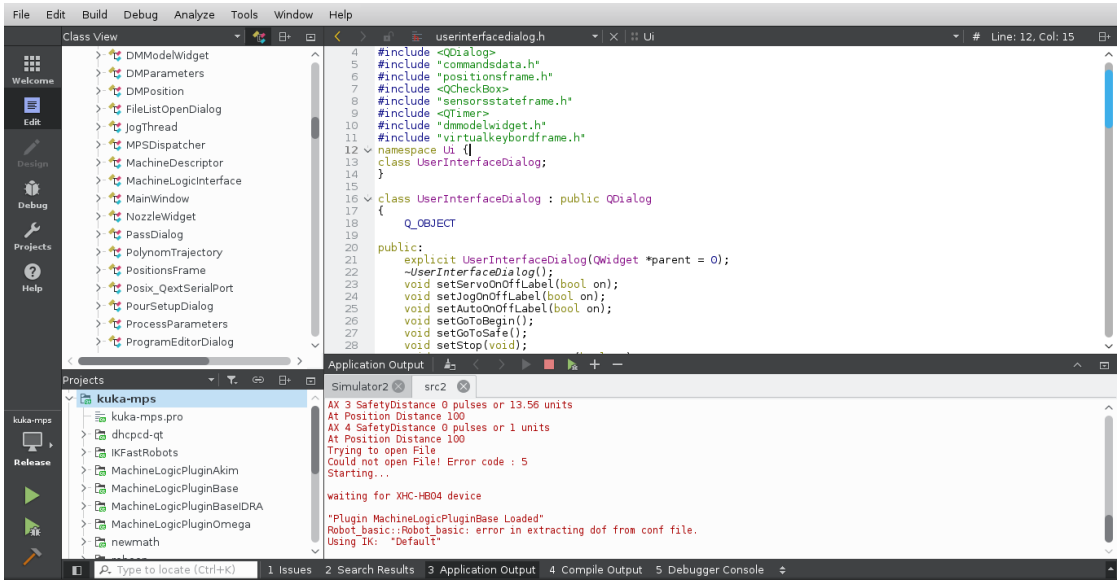


Фиг. 161 Структура на класа за показване на поточно видео, в рамките на потребителския интерфейс на оператора

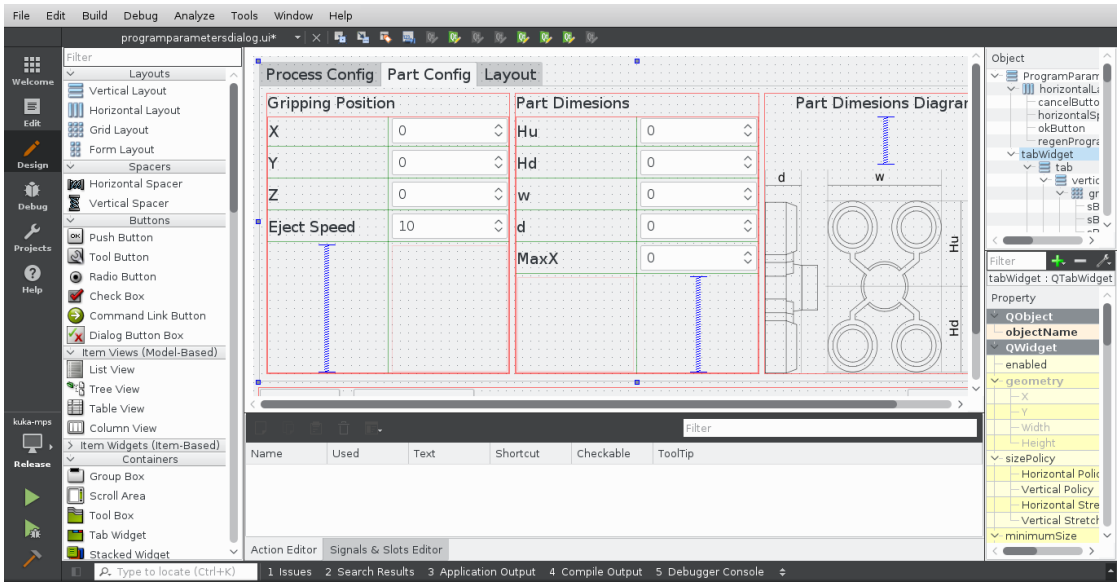
Разработени са и множество други спомагателни функции и класове, които за краткост на изложението, няма да бъдат описвани.

В заключение може да се каже, че в процеса на разработка е създаден пълноценен програмен продукт за управление на индустриален робот, съобразен със различни сценарии на промишлено приложение. Кодът съдържа повече от 200000 програмни реда и няколко десетки класа.

Общ изглед от процеса на програмиране в средата *Qt Creator* е показан на *фиг. 162* и *фиг. 163*.



Фиг. 162 Общ изглед 1 от процеса на програмиране в средата *Qt Creator*



Фиг. 163 Общ изглед 2 от процеса на програмиране в средата *Qt Creator*

4. Изграждане на модернизирания *ИУР*

Мехатронният подход (функционален синтез на механичната конструкция на *ИУР* с хардуерната система и приложния софтуер), който е използван за решаване на настоящата задача се базира на извършване на обратен синтез и монтаж на разработени предварително механична част с хардуерно и софтуерно осигуряване и управление, за ново индустриално приложение на избрания за реинженеринг типопредставител, модел *KR-150*.

Извършените дейности служат като основа за прилагане на този мехатронен подход при монтажа на отделните ключови звена за сглобяването на цялостната мехатронна система, която представлява избрания типопредставител на *ИУР*, заедно с неговото хардуерно и софтуерно осигуряване (*фиг. 164*). Към избрания типопредставител, след извършеното възстановяване на механичната му конструкция, е добавен разработеният хардуер, включващ избраните сервозадвижвания и шкаф за управление, заедно със софтуерното осигуряване, предлагащо управление на цялата система, съгласно целите и изискванията поставени към функционален действащ лабораторен модел на реинженериран робот, за неговото ново индустриално предназначение като екстрактор в работната зона на леярска машина за леене под налягане на алуминиеви отливки.

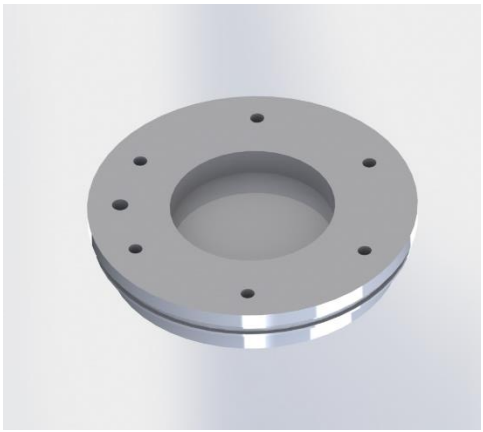
Фиг. 164 Подготовка за монтаж на функционалния действащ лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

4.1.Монтаж на всички елементи, включително и крайния ефектор, определящ специфичното приложение на избрания типопредставител на ИУР

След възстановяването на механичната конструкция на избрания типопредставител на *ИУР* е извършен монтаж на всички елементи, демонтирани преди нанасянето на нова боя. Това включва електродвигателите, заедно с тяхното окабеляване, предпазните шлаухи за кабелите, монтажните стойки, предпазният капак на ос *A1*, както и фланецът на ос *A6*, предназначен за монтаж на крайния ефектор. Всички кабели са покрити със защитни ръкави от термоустойчив материал (*фиг. 165*).

Фиг. 165 Монтаж на елементите на функционално действащия лабораторен модел и покриване на кабелите с термоустойчив материал

Изходният фланец на *ос А6,* е детайлът към който са присъединени всички крайни ефектори, разработвани за новото индустриално приложение на избрания типопредставител на функционално действащия лабораторен модел на *ИУР*. За целта е направен точен *3D* модел и чертеж на фланеца (*фиг. 166*), на базата на който са конструирани присъединителните елементи на разработените крайни ефектори.



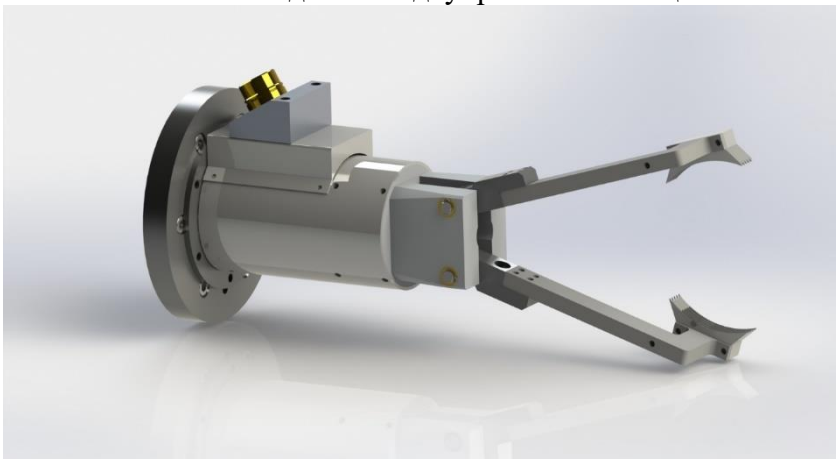
Фиг. 166 Изходен фланец на *ос А6* на функционално действащия лабораторен модел, към който ще бъдат присъединени разработваните за новото индустриално приложение на робота крайни ефектори

Новото индустриално приложение на реинженерания робот като екстрактор, работещ в зоната на работа на леярска машина за хоризонтално леене под налягане, определя и вида на крайния ефектор на робота като хващач. Спецификата на процеса на леене, разнообразието от пресформи (които могат да бъдат както с много сложна конструкция, така и относително прости), разнообразието при типоразмерите на леярските машини и при теглото на отливките, определиха необходимостта от разработването на три вида хващачи, покриващи всички възможни приложения. Високите изисквания за пожарна безопасност, обусловени от високите температури на които ще бъде изложен хващача при вадене на отливката, определя трите вида хващачи да се реализират с пневмозадвижване, което максимално ще удовлетвори критериите за работата на крайния ефектор на реинженерания робот, за избраното му ново индустриално приложение. По-долу е дадено описание на разработените за целите на реинженеринга хващачи и техния принцип на действие.

Разработката е съобразена с нуждите на потенциалния потребител – СПЕСИМА ООД.

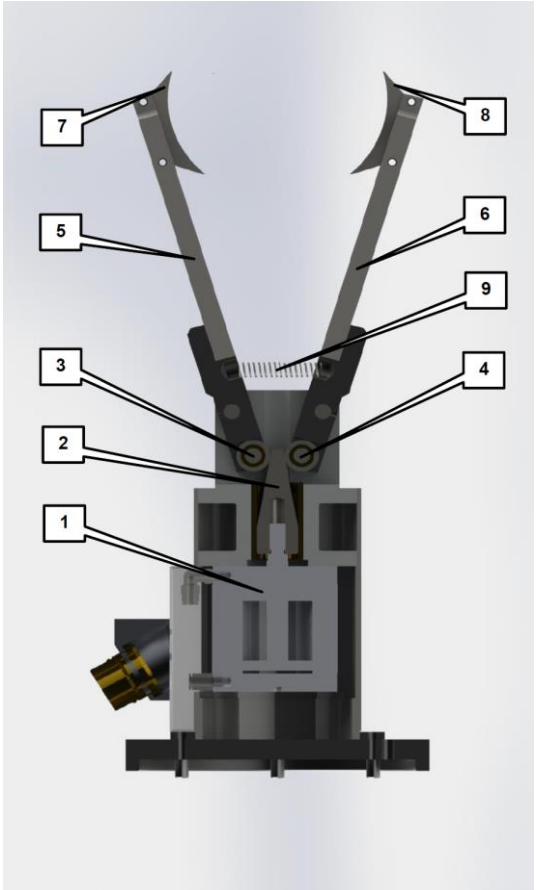
Двупръстов хващач

Използването на двупръстов хващач с опростена конструкция е целесъобразно, когато към него е поставено изискване да извършва само прости операции с отливката - да бъде извадена от пресформата, проверена и поставена на транспортьор или палет. Хващачът намира приложение и при работа с по-прости пресформи, без наличието на подвижни „сърца“. На *фиг. 167* е показан *3D* моделът на двупръстовия хващач.



Фиг. 167 *3D* модел на двупръстов хващач, конструиран за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Схемата на конструирания хващач е показана на *фиг. 168*.

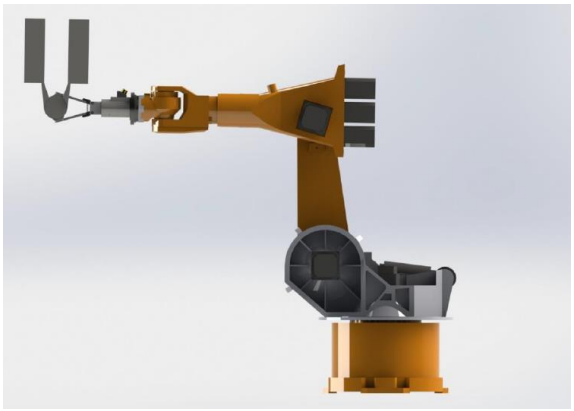


Фиг. 168 Схема на двупръстов хващач, конструиран за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Той е с основен клинов задвижващ механизъм, при който към буталния прът на пневматичен цилиндър *(1)* е фиксиран коничен накрайник *(2)*, контактуващ с работните повърхнини на две ролки *(3)* и *(4)*, монтирани на два подвижни лоста *(5)* и *(6)*. На другия край на лостовете са монтирани накрайниците на хващача *(7)* и *(8)*, с които той захваща

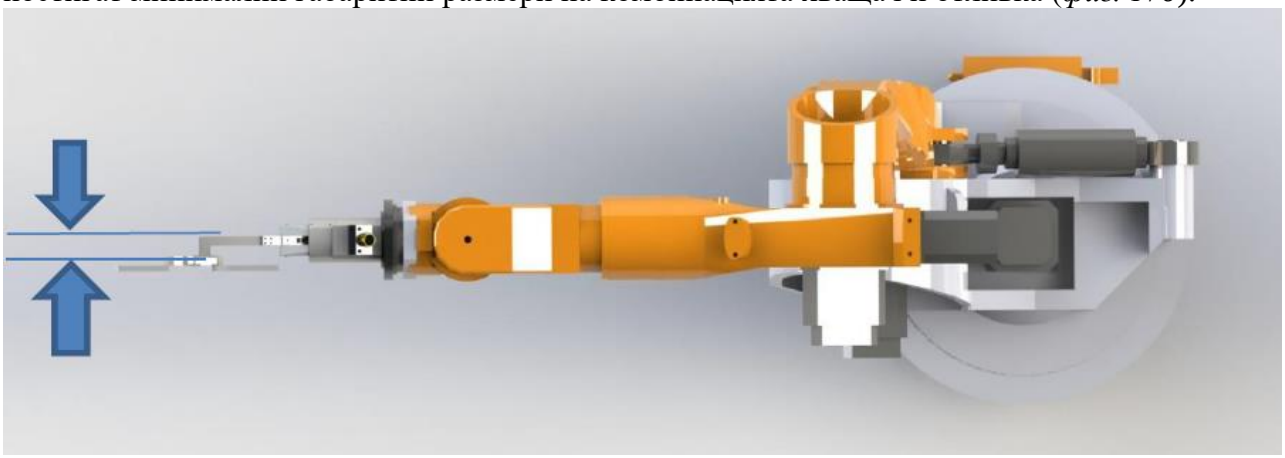
отливката. Лостовете се затварят при ход на буталото напред и се отварят под действието на пружина *(9)*, когато буталото се върне назад. По този начин силата на захващане действа само при затваряне на челюстите и хващачът може да се използва само за хващане по външен контур. Силата на хващане позволява да бъдат манипулирани отливки до осем килограма.

На фиг. *169* е показан *3D* модел на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, с монтирания към *ос А6* двупръстов хващач.



Фиг. 169 *3D* модел на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* с монтирания към *ос А6* двупръстов хващач

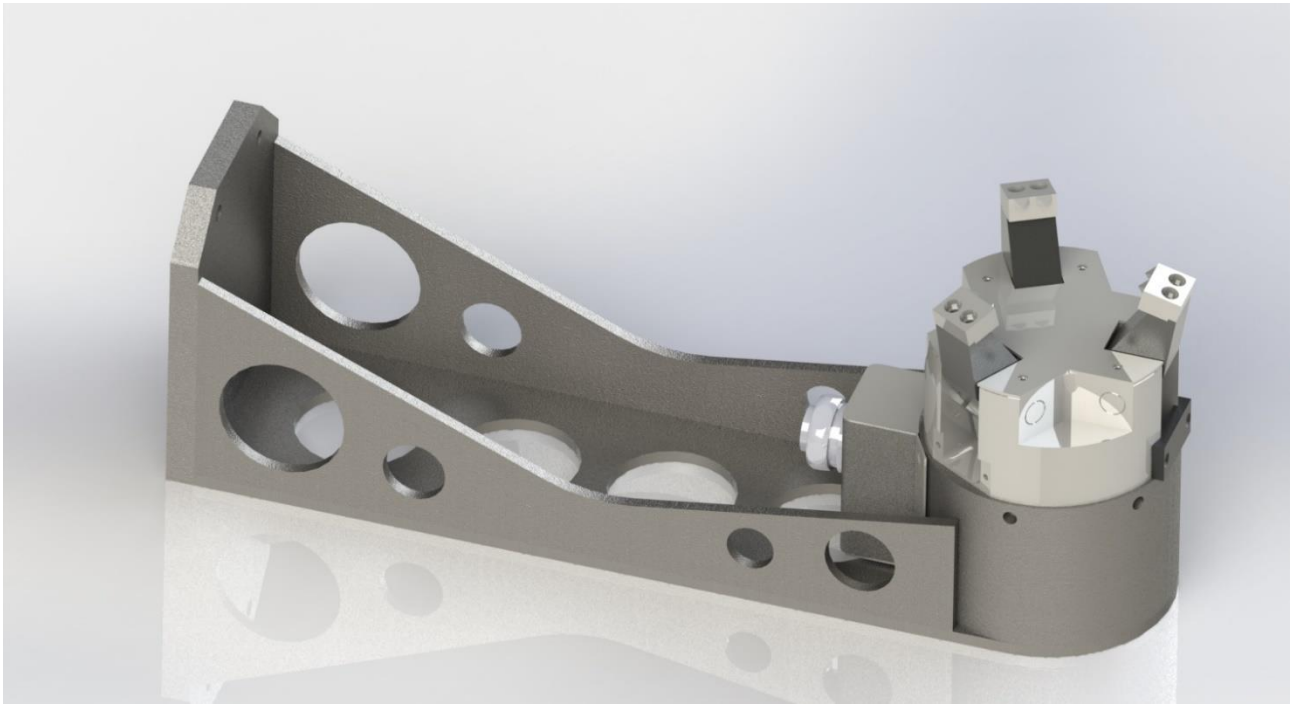
От приложените *фигури 167*, *168* и *169* се вижда че хващачът се монтира на изходния фланец на реинженирания робот *KUKA KR-150*, така че оста на цилиндъра съвпада с *ос А6* на робота, а оста на манипулирания детайл е перпендикулярна на тях. По този начин се постигат минимални габаритни размери на комбинацията хващач и отливка (*фиг. 170*).



Фиг. 170 *3D* модел на разположението на двупръстовия хващач, спрямо *оста А6* на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

Трипръстов хващач

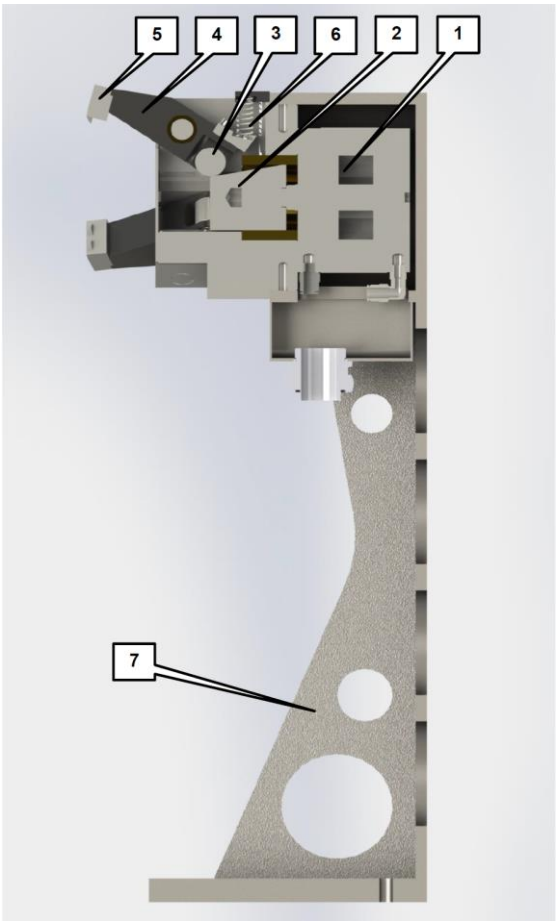
В случаите, когато теглото на отливката надвишава осем килограма и има повишени изисквания към динамиката на робота, е целесъобразно използването на друг тип хващач. За целта е конструиран трипръстов хващач с по-висока товароносимост, показан на фиг. *171*.



Фиг. 171 *3D* модел на трипръстов хващач, конструиран за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Триточковото захващане на детайла и увеличеният диаметър на пневмоцилиндъра, позволяват теглото на манипулирания обект да бъде до 30 килограма.

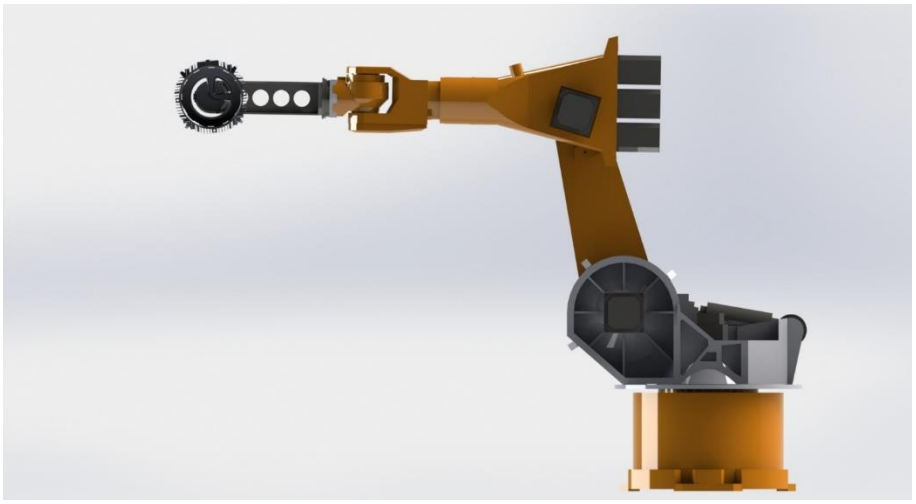
Конструкцията на хващача е подобна на двупръстовия хващач и е показана на схемата на фиг. *172*.



Фиг. 172 Схема на трипръстов хващач, конструиран за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

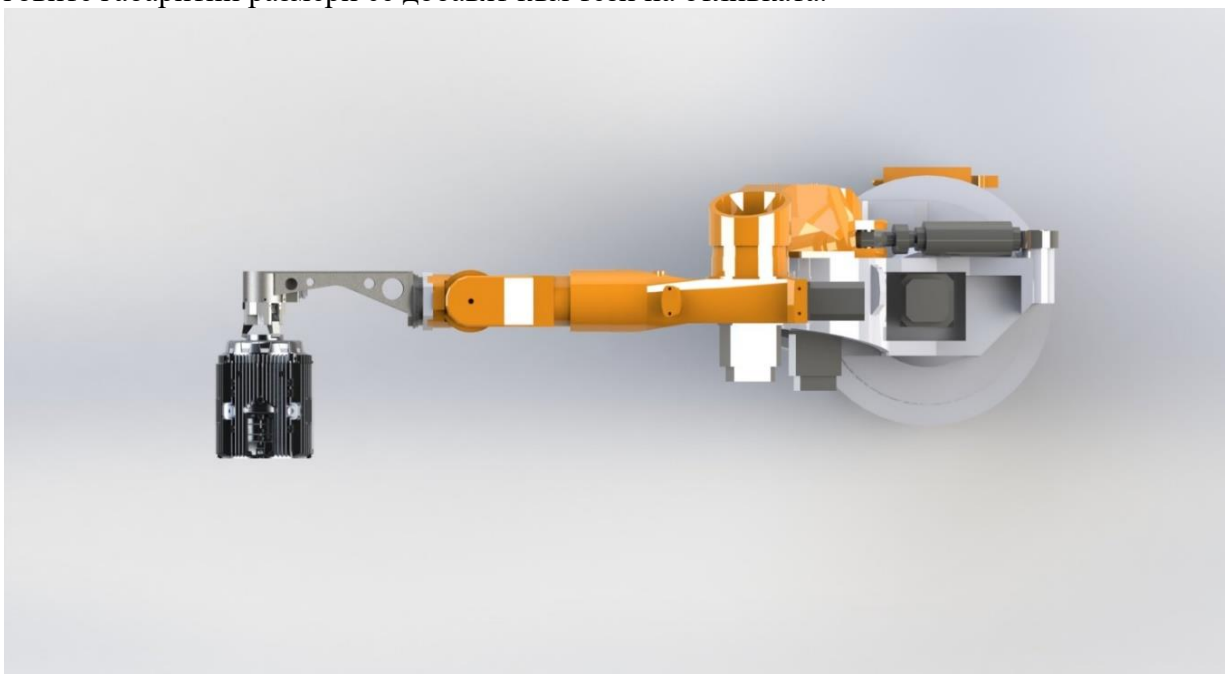
Задвижващият механизъм отново е конусен, при който към буталния прът на пневматичен цилиндър *(1)* е фиксиран коничен накрайник *(2)*, контактуващ с работните повърхнини на три ролки *(3)*, монтирани на три подвижни лоста *(4)*. На другия край на лостовете са накрайниците на хващача *(5)*, с които той хваща отливката. Лостовете се затварят при ход на буталото напред и се отварят под действието на пружини *(6)*, когато буталото се върне назад. По този начин силата на хващане отново действа само при затваряне на челюстите и хващачът може да се използва за хващане по външен контур. Поради това, че при тази конструкция оста на цилиндъра е перпендикулярна на *ос А6*, е конструирано допълнително рамо *(7)* за монтаж на хващача към изходния фланец на реинженерирания робот *KUKA KR-150*.

На фиг. *173* е показан *3D* модел на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, с монтирания към *ос А6* трипръстов хващач.



Фиг. 173 *3D* модел на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* с монтирания към *ос А6* трипръстов хващач

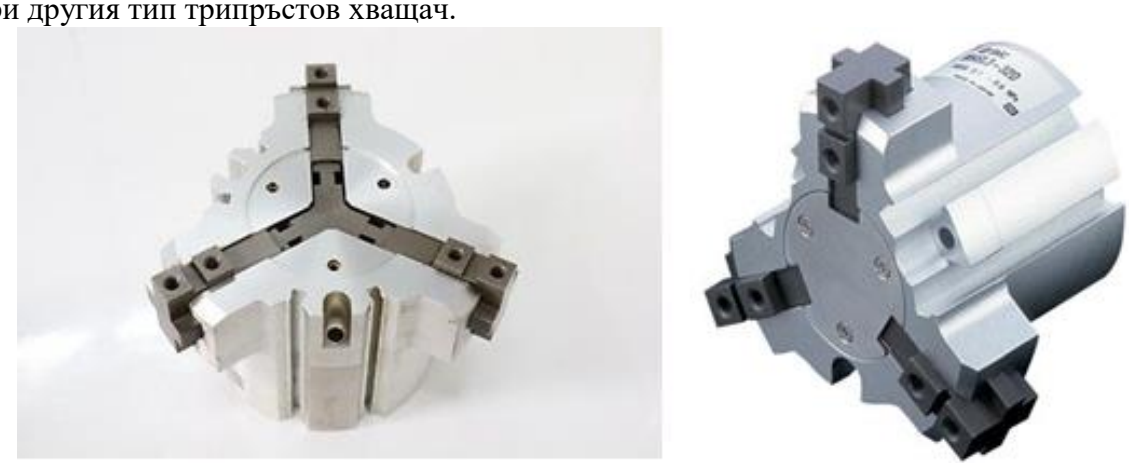
Оста на пневмоцилиндъра съвпада с оста на отливката (*фиг. 174*), което означава, че неговите габаритни размери се добавят към тези на отливката.



Фиг. 174 *3D* модел на разположението на трипръстовия хващач, спрямо *оста А6* на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

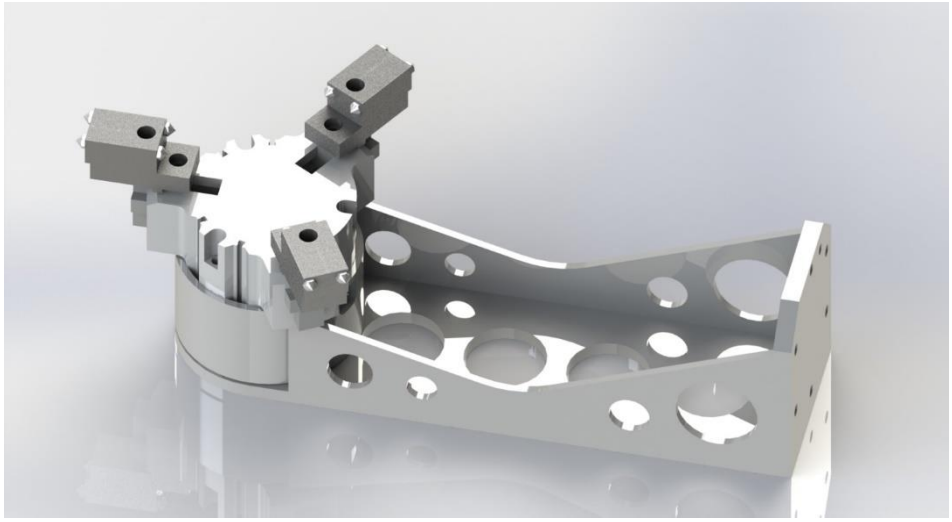
Сравнявайки *фигури 170* и *174* се вижда, че добавените габаритни размери към отливката при трипръстовия хващач са значително повече от тези при двупръстовия. Това следва да се вземе под внимание, при избора на подходящ хващач за конкретната ситуация на индустриално приложение на реинженирания робот.

Използването на *ИУР* като екстрактори в леярската индустрия не са ограничава само с изваждането и проверката на отливката. В някои случаи технологичният процес включва охлаждане и поставяне на отливката на преса, за разделяне на леяковата система от детайла. В някои случаи, преди поставянето в пресата, отливката е необходимо да се пребазира и захване по друга повърхност, като най-често захващането е по вътрешен диаметър. Това поражда необходимост хващачът да може да хваща, както при затваряне на челюстите си, така и при отварянето им. За да се изпълнят всички тези условия, е избран стандартен хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC* (*фиг. 175*), който е с пневмозадвижване и условен диаметър на пневмоцилиндъра *φ125 мм*. За присъединяването му към робота беше предвидено да се използва същото допълнително рамо (*поз.7 от фиг. 172*), което се използва и при другия тип трипръстов хващач.



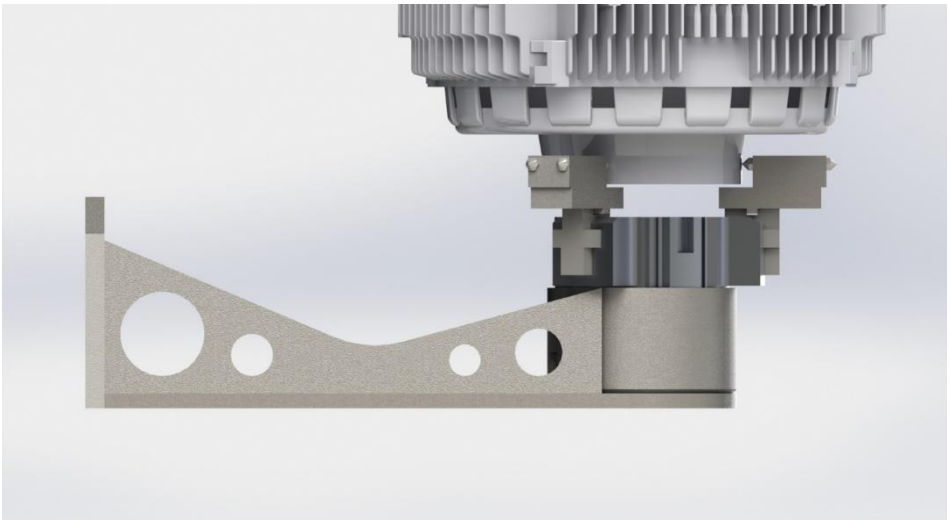
Фиг. 175 Конструкция на трипръстов хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC*, предназначен за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

На *фиг. 176* е показан хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC*, монтиран към допълнителното рамо. Допълнително са монтирани челюсти за захват по вътрешен и външен контур.

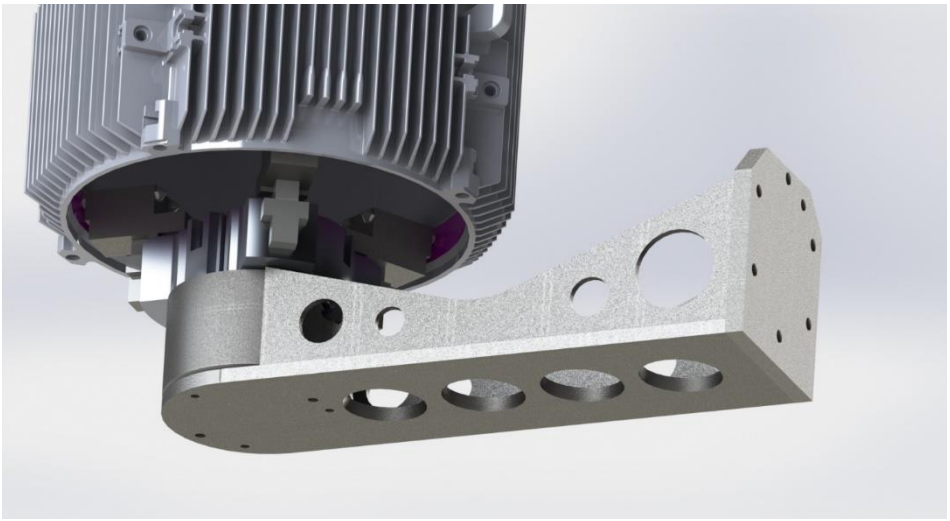


Фиг. 176 Трипръстов хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC* и монтирано към него допълнително рамо, предназначени за новото индустриално приложение на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

На *фигури 177* и *178* е показан захвата на хващача, съответно по външен и по вътрешен контур на отливката.



Фиг. 177 Захват на трипръстовия хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC* по външен контур на отливката



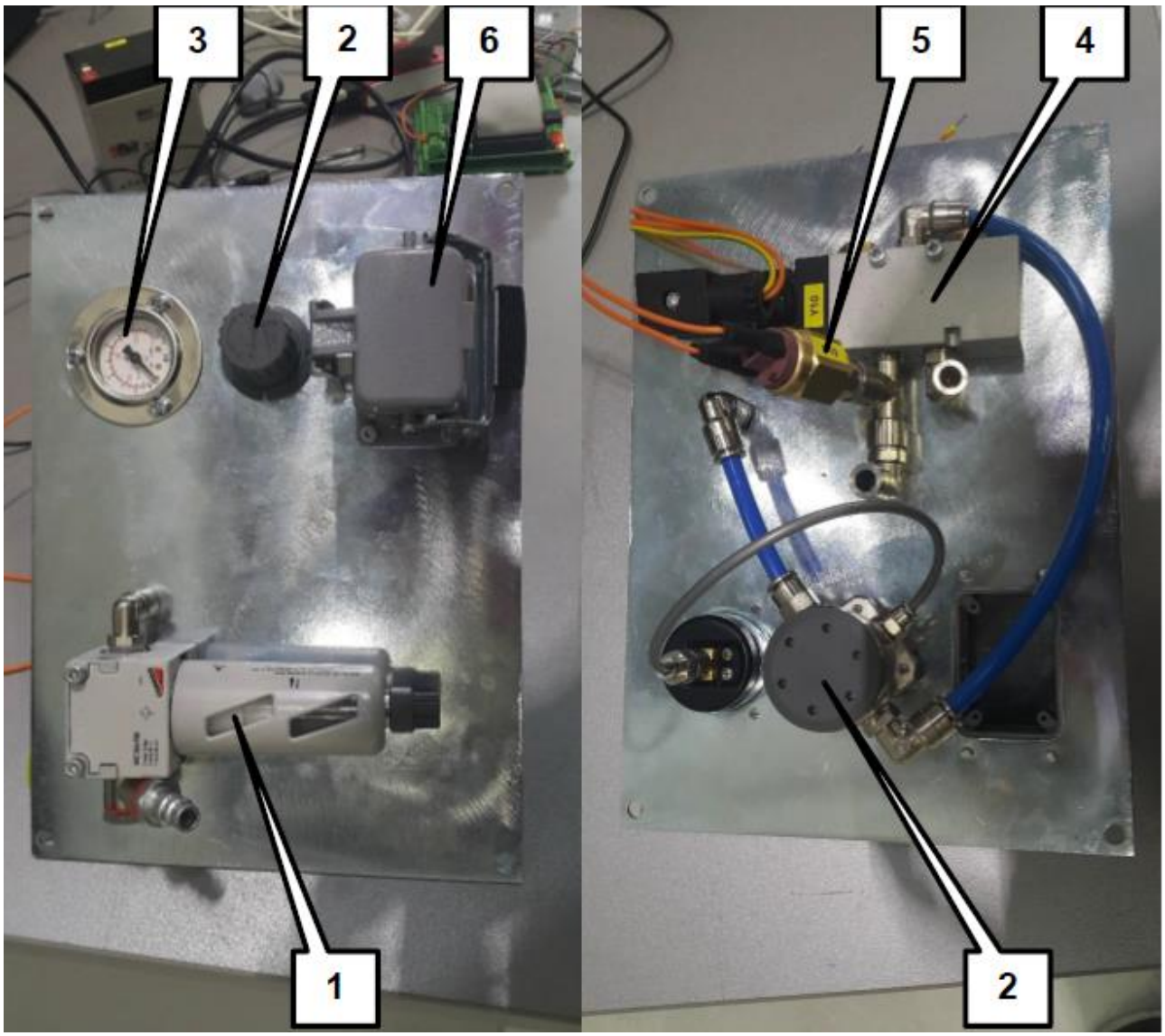
Фиг. 178 Захват на трипръстовия хващач *MHSL3-125* на фирма *SMC* по вътрешен контур на отливката

На *фиг. 179* и *фиг. 180* е показан функционално действащият лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* с монтирани към него съответно двупръстов и трипръстов хващач.

За работа с пневмоцилиндъра, който е задвижващият елемент и на трите вида хващачи, беше необходимо да се изработи и монтира специално управление. За целта беше конструирана и изработена монтажна плоча към която да бъдат закрепени елементите нужни за: захранване на пневмоцилиндъра, управляване посоката на движение на цилиндъра и вграждане на сензори за текущото му положение. На *фиг. 181* е показана плочата с пневматичното управление, погледната от двете й страни. На позиция *(1)* е показан филтър-влагоуловител, които служи за филтриране на входящия въздух и отделяне на влагата от него. След филтриране въздухът постъпва на входа на регулатор за налягане *(2)*, чрез който се задава работното налягане на цилиндъра на хващача и респективно чрез него може да се регулира силата на захват. Зададеното налягане се отчита с помощта на манометър *(3)*. Посоката на движение на буталото на цилиндъра се управлява от пет пътен двупозиционен разпределител с електромагнитно превключване *(4)*. Положението на буталото се следи непряко от системата за управление, чрез датчик за налягане, монтиран на единия от изходите на разпределителя *(5)*. Кабелите за управление на бобината на разпределителя и за пневмосензора са изведени на общ куплунг *(6)*.

Фиг. 179 Функционално действащ лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* с монтиран към него двупръстов хващач

Фиг. 180 Функционално действащ лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* с монтиран към него трипръстов хващач



Фиг. 181 Монтажна плоча с елементи за пневматично управление на пневмоцилиндъра, основен задвижващ елемент на трите вида хващачи на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

На *фиг. 182* е показан интерфейсният панел на крайния ефектор на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, преди и след реинженеринга. На фигурата се вижда, че там е монтирано таблото за управление на хващача, куплунгът за връзка с управлението и захранването със сгъстен въздух.

Фиг. 182 Интерфейсният панел на крайния ефектор на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, преди и след реинженеринга

4.2. Асемблиране на хардуерната част на таблото за управление

В резултат от дейностите по изграждане на основните хардуерни компоненти, които бяха посочени, беше пристъпено към монтаж на хардуерната конфигурация за управление на реинженерирания робот. Дейността е извършена успешно, а реализацията е описана по-долу в текста.

4.2.1. Монтаж на елементите в таблото за управление и входно-изходния интерфейс за връзка с външни машини и устройства

Съгласно разработените схеми на свързване, се преминава към асемблирането на таблото за управление, което е извършено в няколко стъпки:

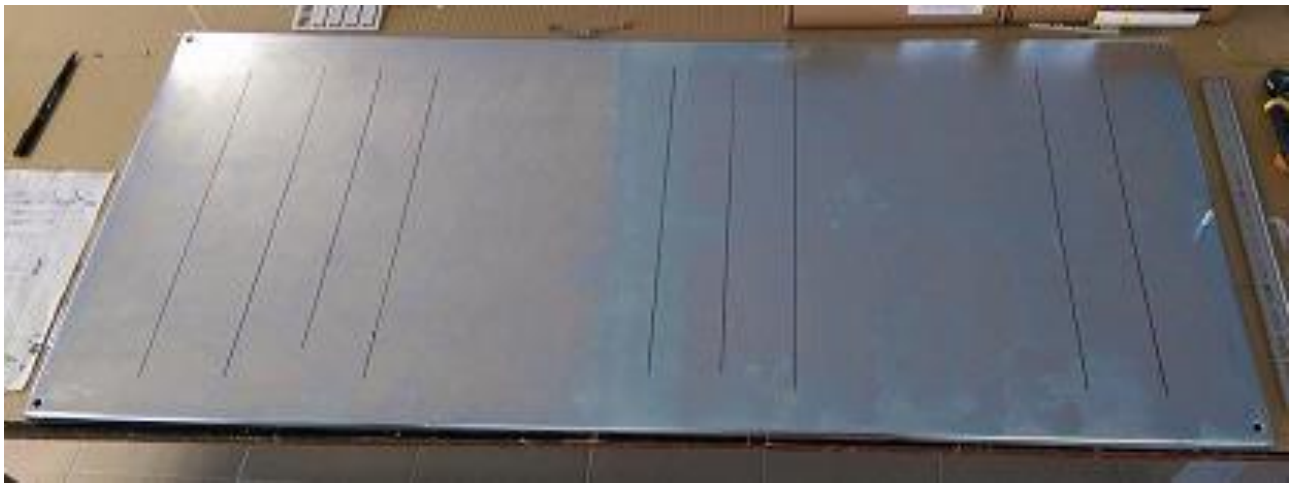
- подготвителни процеси преди насищането със защитна и комутационна апаратура, сервоуправления и комуникационен модул на металната монтажна плоча за таблото за управление;
- насищане със защитна и комутационна апаратура, сервоуправления и комуникационен модул на металната монтажна плоча за таблото за управление;
- монтаж на механични, електрически и електронни елементи и компоненти в таблото за управление;
- контрол на изправността на таблото за управление;

За всяка от стъпките е преминато през последователност от дейности, с които се реализира поетапно асемблирането на таблото (шкафа) за управление. Стъпките са описани по-долу, както са реализирани в разработката.

Подготвителни процеси преди насищането с електронни елементи на металната монтажна плоча за таблото за управление

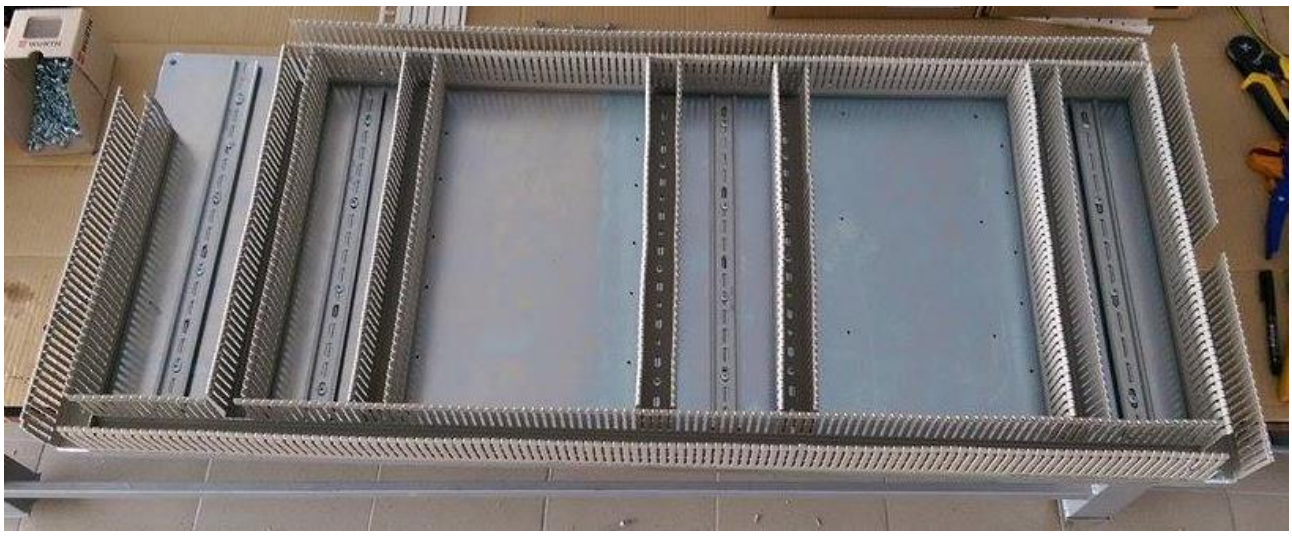
Извършват се подготвителните процеси, които подготвят металната монтажна плоча за насищане с електронни елементи и компоненти:

- визуален контрол за отсъствие на повърхностни дефекти върху монтажната плоча;
- проверка на размерите на монтажната плоча, съгласно работните скици;
- разчертаване на монтажната плоча за разположението на кабеловодите (кабелни канали) и *DIN* шините, съгласно монтажната схема (*фиг. 183*);



Фиг. 183 Разчертаване на монтажната плоча за разположението на кабеловодите (кабелни канали) и DIN шините, съгласно монтажната схема

- закрепване на предварително оразмерените и нарязани кабелни канали и *DIN* шини към монтажната плоча (*фиг. 184*);



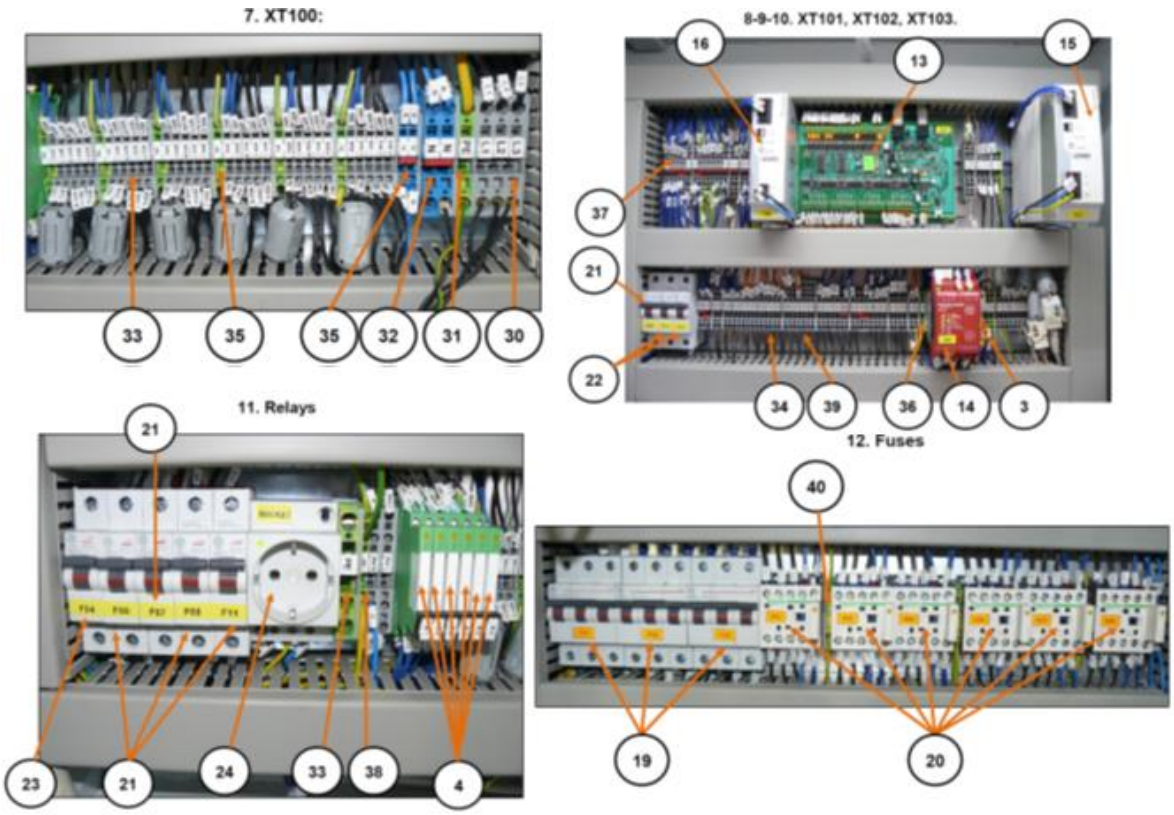
Фиг. 184 Закрепване на предварително оразмерените и нарязани кабелни канали и *DIN* шини към монтажната плоча

Насищане с електронни елементи на металната монтажна плоча за таблото за управление

- поставяне на необходимите клеми, капачки за клеми и крайни клеми в *DIN* шините;
- поставяне на необходимите предпазители, релета, захранващи блокове, комуникационни модули, спирачни резистори и др. елементи в монтажната плоча (*фиг. 185*);

Фиг. 185 Поставяне на електронни и електрически елементи и компоненти в монтажната плоча за таблото за управление

- опроводяване между елементите в монтажната плоча (*фиг. 186*).



Фиг. 186 Опроводяване между елементите в монтажната плоча – клемореди *XT100, XT101, XT102, XT103,* релета, контактори, захранвания, предпазители, комуникационен модул и др. (позициите във фигурата отговарят на позициите в таблица 23)

Монтаж на механични, електрически и електронни елементи и компоненти в таблото за управление

- монтаж на монтажна плоча в таблото за управление (шкафа за управление) (*фиг. 187а*);
- монтаж на планка с куплунги и основи за тях, за свързване на таблото за управление към машината;
- монтаж на основа с кабелодържачи на дъното на шкафа, съгласно необходимия брой проводници, които трябва да излизат от таблото, съгласно схемите за управление;
- поставяне на входно-изходен информационен дисплей (*HMI*);
- поставяне на необходимите бутони и превключватели на вратата на таблото за управление (*фиг. 187б*);
- закрепване на пластмасови решетки с филтър за вентилаторите за охлаждане на таблото за управление;
- закрепване и опроводяване на вентилатори за охлаждане;
- монтаж на светлинна и/или сигнална кула за показване режима на работа на машината;
- свързване на заземителните проводници в таблото за управление;
- поставяне на уплътнение на вратата на металния шкаф (таблото за управление);
- закрепване на тавана на таблото за управление на куки за транспортиране;
- поставяне на ключалки на вратата;

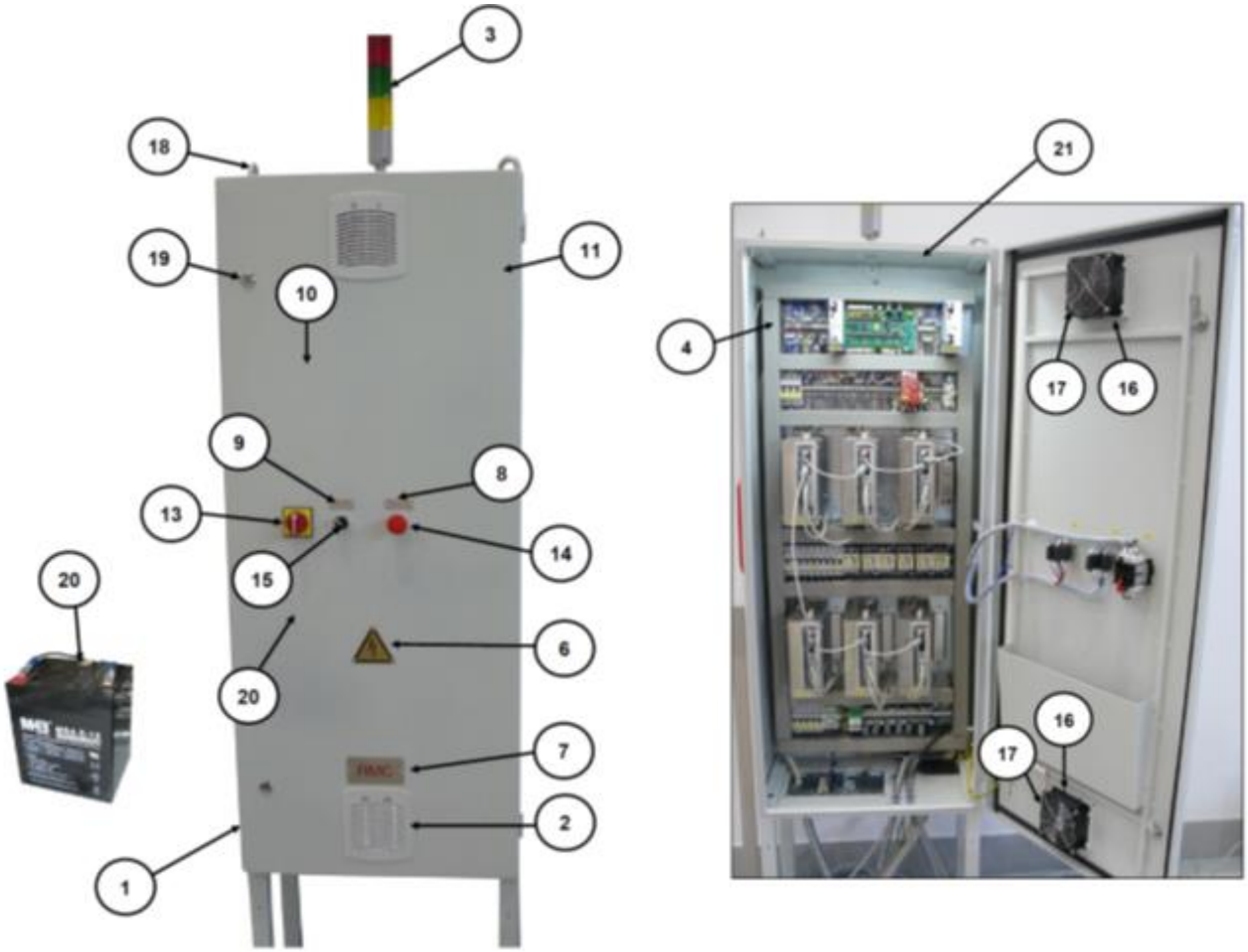
- поставяне на маркировка на закрепените елементи на вратата на таблото за управление;
- свързване на таблото за управление с реинженерия робот.

Фиг. 187 Вграждане на монтажната плоча с елементи в шкафа на таблото за управление
а) монтиране на плочата в шкафа на таблото за управление б) монтиране на електронните и механични компоненти, в самия шкаф на таблото за управление

Контрол на изправността на таблото за управление

- проверката за късо съединение в: нисковолтовата част – 24 VDC и високоволтовата верига – 220V;
- визуален контрол за висящи и несвързани кабели;
- изключване на всички предпазители;

Асемблираното табло за управление е показано на *фиг. 188*.



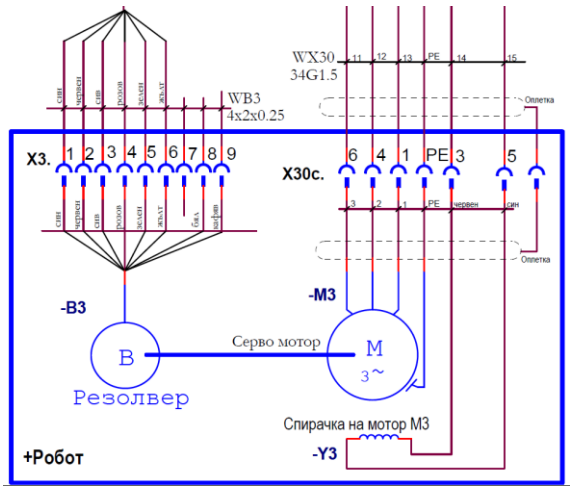
Фиг. 188 Асемблираното табло за управление (позициите във фигурата, отговарят на позициите в спецификацията, посочена в таблица 22)

Изграденият интерфейс в таблото за управление е предвиден за свързване на реинженерирания робот с леярска машина за леене под налягане, опериращи едновременно в общ автоматизиран цикъл на работа. Разработването на подобна съгласуваност и свързаност между двете мехатроннни системи е обусловено от планираното ново индустриално приложение на функционално действащият лабораторен модел на избрания типопредставител *KUKA KR-150,* след извършения реинженеринг върху него. Сигналите, предвидени за съгласуване на отделните операции в общия автоматизиран цикъл на работа на двете мехатронни системи, се разпределят, чрез разработения интерфейс и комуникационния модул в таблото за управление, и обработват от контролера и разширителния модул в операторския пулт за управление. Връзката с интерфейс от функционално действащия лабораторен модел към машината за леене под налягане се осъществява чрез клеми *605-707* от клемореда *XT102* в таблото за управление на робота и специален куплунг в таблото за управление на машината за леене под налягане. Сигналите са показани в схемите на връзване на таблото за управление на реинженерирания робот.

4.2.2. Свързване на сервоуправленията в таблото за управление с механичната част на реинженерирания робот и конфигуриране на сервозадвижванията

Свързване на сервоуправленията в таблото за управление с механичната част на реинженерирания робот

Сервоуправленията, монтирани в електрическото табло, са свързани със серводвигателите на робота. Схемата на свързване за всяка ос е показана на *фиг. 189.*



Фиг. 189 Схема на свързване за всяка ос на сервоуправленията със сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

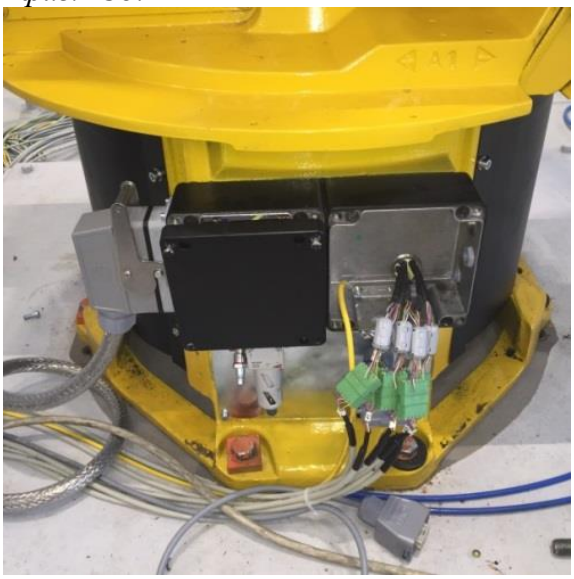
Както се вижда от схемата сервомоторите за всяка ос на робота имат следните електрически връзки с електрическото табло:

- силово захранване на сервомотора;
- захранване на спирачката на сервомотора;
- свързване на резолвера.

Всички електрически връзки са реализирани по начин, който:

- разрешава разделяне на реинженерирания робот и таблото за управление, с цел удобство при транспортиране;
- лесно и бързо разкъсване и свързване на всички електрически вериги при демонтаж и последващ монтаж;
- еднозначно определяне на електрическите вериги, което да гарантира последващото им свързване, по същия начин, каквито са били преди демонтажа;
- гарантира качествено и надеждно свързване на всички електрически вериги;

За изпълнението на изброените изисквания и свързването на сервомоторите със сервоуправленията в таблото за управление, към основата на робота са монтирани две клемни кутии, показани на *фиг. 190*.



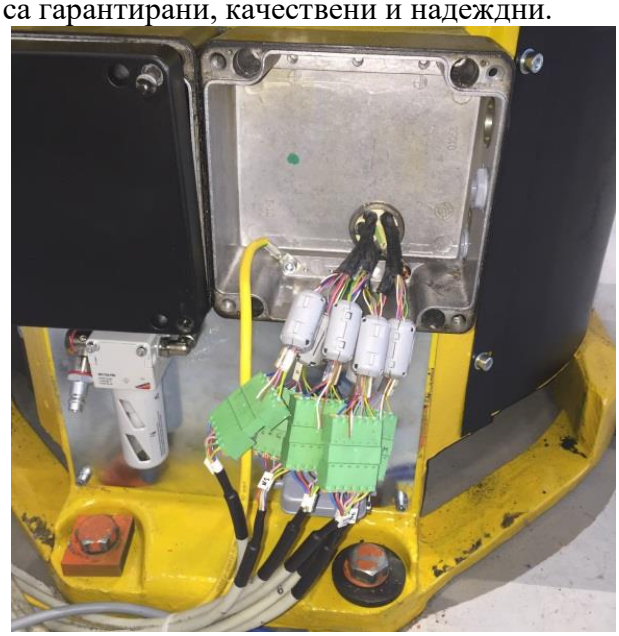
Фиг. 190 Клемни кутии, монтирани в основата на робота, свързващи сервоуправленията със сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

В първата клемна кутия са свързани силовите кабели за сервомоторите и захранването на спирачките им. Връзката на силовия кабел с кутията е осъществена с куплунг *Harting* (*фиг. 191*). Този тип куплунг гарантира висока надеждност на електрическата връзка, еднозначно определен начин за връзка между двете части на куплунга (подвижна и неподвижна) и висока степен на защита (*IP 66*). Допълнително е осигурено заключване на куплунга, за надеждна работа в условия на вибрации. Практически силовата връзка на шестте сервомотора е реализирана само с един кабел *34G1,5*.

Фиг. 191 Връзка на силовия кабел на сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* и захранването на спирачките им с клемна кутия, чрез куплунг *Harting*

Във втората клемна кутия бяха свързани кабелите за резолверите на всичките шест сервомотора (*фиг. 192*). Свързването на всеки резолвер беше реализирано с отделен кабел *4x2x0.25*, като прекъсването на електрическата връзка при транспортиране се осъществява чрез куплунг.

В двете клемни кутии всеки сервомотор е свързан с отделен кабел, така че всички електрически връзки да са гарантирани, качествени и надеждни.



Фиг. 192 Свързване на кабелите на резолверите на сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* с клемна кутия

Свързването от клемните кутии към сервомоторите е показано на *фиг. 193*.

Фиг. 193 Свързване на сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* с клемните кутии

В таблото за управление всички кабели са свързани към входно-изходния клеморед (*XT-100*), разположен в долната част на таблото (*фиг. 194*). С цел намаляване на смущенията от работата на сервомоторите, на изходните проводници за всеки един от кабелите захранващ сервомоторите, е монтиран ферит.

Фиг. 194 Свързване на всички кабели на сервомоторите от функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* с таблото за управление

По-долу е дадено описание на сервозадвижванията, използвани в реинженерирания робот, техните параметри и режими на работа.

4.3.Основни параметри, режими на работа и конфигуриране на сервозадвижванията

I. Режими на работа на сервопреобразувателите

Сервопреобразувателите са предназначени за управление на скорост, позиция и въртящ момент на серводвигатели (безколекторни синхронни двигатели с постоянни магнити). В зависимост от заданието за управление могат да се програмират и да изпълняват няколко режима на работа. Техният начин на работа и описание са показани в *табл. 38*.

Таблица 38 Описание на режимите на работа на сервопреобразувателите в таблото за управление на реинженерирания *KUKA KR 150*

Режим на работа	Код	Описание
Външно управление по позиция	Pt P3.00 = 0 (Operat.Mode)	Серво задвижването се конфигурира в този режим когато заданието за позиция/скорост са 2 импулсни поредици (Стъпка/Посока) подавани от външен контролер (PLC). Честотата на първата поредица определя заданието за скорост, а периодите определят заданието за позиция. Логическото ниво на втората импулсна поредица определя знака на заданието за позиция.

Продължение на таблица 38 Описание на режимите на работа на сервопреобразувателите в таблото за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

Вътрешно управление по позиция	Pr P3.00 = 3 (Operat.Mode)	Серво задвижването се конфигурира в този режим когато позицията се задава: чрез цифрови входове (DI) - чрез параметри могат да се задават до седем позиции за изпълнение).
Вътрешно управление по позиция	Pc P3.00 = 5 (Operat.Mode)	Серво задвижването се конфигурира в този режим когато позицията се задава: чрез сериен интерфейс Modbus Protocol (COM port) или CAN.
Управление по скорост	S P3.00 = 1 (Operat.Mode)	Конфигурира в този режим когато скоростта се задава: чрез Modbus сериен интерфейс (COM port) или CAN. чрез цифрови входове (DI) - чрез параметри могат да се задават до седем задания за скорост. чрез аналогов вход от -10 VDC до +10 VDC.
	Sz P3.00 = 4 (Operat.Mode)	Конфигурира се в този режим когато скоростта се задава: чрез цифрови входове (DI) - вътрешно чрез параметри могат да се задават до седем задания за скорост.
Управление по момент	T P3.00 = 2 (Operat.Mode)	Конфигурира се в този режим когато момента се задава: чрез цифрови входове (DI) - вътрешно чрез параметри могат да се задават до седем задания за момент. чрез аналогов вход от -10 VDC до +10 VDC.

II. Аналогови и цифрови входове и изходи на сервопреобразувателите

Описанието на аналоговите и цифровите входове и изходи на сервопреобразувателите е показано в *табл. 39*.

Таблица 39 Описание на аналоговите и цифровите входове и изходи на сервопреобразувателите в таблото за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

Аналогови входове – 2	Многофункционално програмируеми (Диапазон : 0÷±10 V или 0÷+10 V)
Аналогов изход – 1	Многофункционално програмируем (Диапазон : ±5 V или 0÷10V)
Цифрови входове – 6	Оптоизолирани. Тип NPN/PNP. Многофункционално програмируеми. Разрешение за работа, Ресет на алармите, Нулиране на регистъра за позиция, Ивертиране на заданието, Забрана на заданието за позиция, Стъпково изпълнение, Електронна предавка, Авариен стоп, Забавяне при търсене на опорна точка, Старт търсене на опорна точка, Ротация -, Ротация +, до 7 задания за позиция, до 3 задания за скорост, до 3 токови ограничения
Цифрови изходи – 3	Оптоизолирани. Транзисторни “Отворен колектор” Многофункционално програмируеми. Готовност за работа, Разрешение за работа, Нулева скорост, Достигната скорост, Достигната позиция, Ограничен момент и др.

III. Електронни защитни функции на сервопреобразувателите

Сервопреобразувателят има комплект електронни защити, описани в *табл. 40*, които гарантират безопасната работа както на сервопреобразувателя, така и на цялата система.

Таблица 40 Описание на електронните защитни функции на сервопреобразувателите в таблото за управление на реинженирания *KUKA KR 150*

Защитни функции	Свръхток, Свръхнапрежение, Липса на напрежение, Прегряване, Претоварване на спирачен резистор, Продължителен претоварващ ток, Грешка на обратната връзка, Грешка от транзисторен модул, Грешка по серийна комуникация, Грешка по позиция и др.

Цялата информация свързана с електронните защити, тяхната визуализация и алгоритъм, с който те оказват влияние върху процесите на управление и работа на сервозадвижването, евентуалната причина за възникване на нуждата от тези защити и начин за отстраняването им, се описват елементарно, които за краткост на настоящото изложение, няма да бъдат описвани тук.

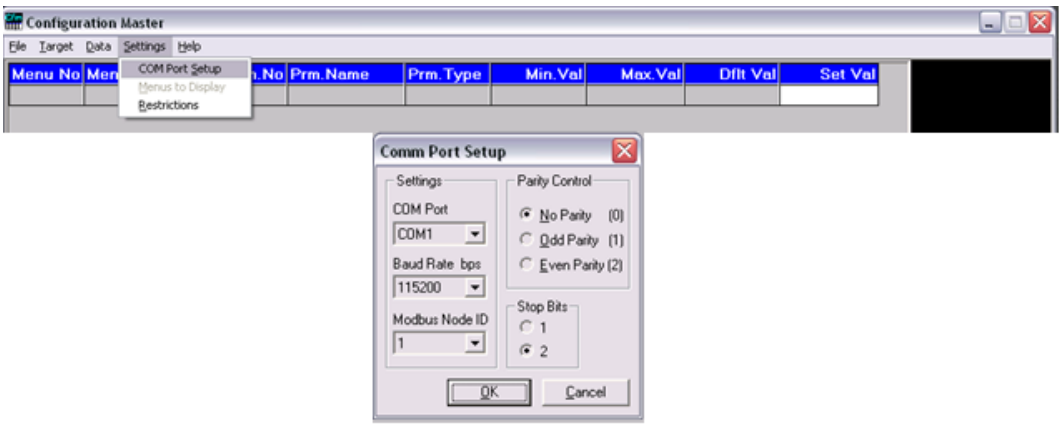
IV. Софтуер за конфигуриране и свързване към сервозадвижването

Свързването на сервозадвижването към персонален компютър *(PC)* и основните инструкции за настройка с използване на *ConfigMaster* софтуер, са описани по-долу. За тази цел е необходимо потребителят да се запознае със следното:

- свързване на сервозадвижването към *PC*;
- настройка на параметрите;
- съхранение на параметрите.

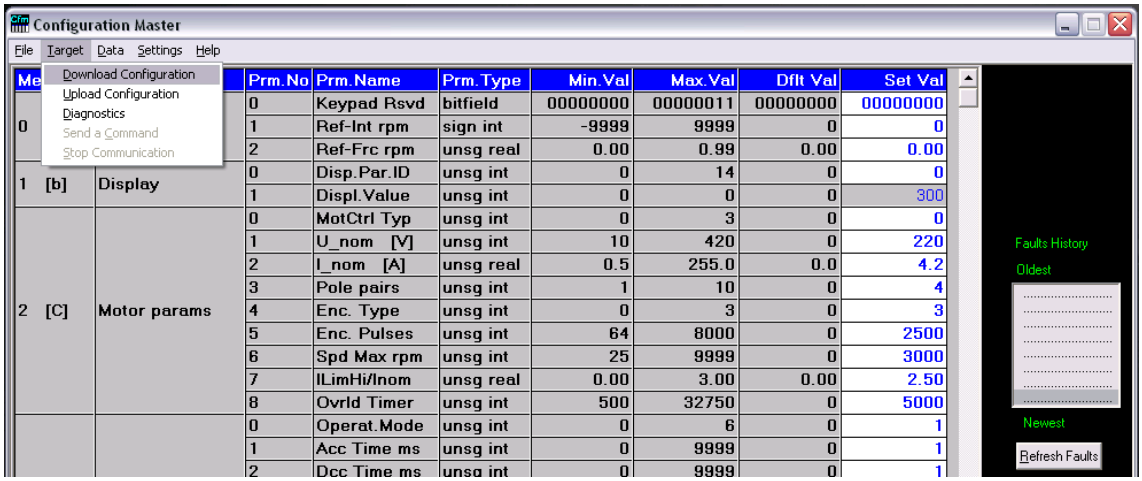
Стъпките за конфигуриране на софтуера са следните:

1. Инсталира се софтуерът (стартира се *ConfigMasterRedistInstaler.bat*) на *PC* или лаптоп.
2. Свързва се *RS-232* комуникационен порт на *PC* към серийния интерфейс на сервозадвижването *CN2*.
3. Свързва се обратната връзка от двигателя (резолвера) към съответния куплунг за обратна връзка *CN4*.
4. Свързват се силовите кабели на мотора към съответните клеми на сервозадвижването.
5. Подава се захранване към сервозадвижването.
6. Стартира се *ConfigMaster.exe*.
7. В полето *Settings -> COM Port Setup* се избира съответният комуникационен порт за връзка със сервозадвижването, битове за четност, *Node ID* (*фиг. 195*).



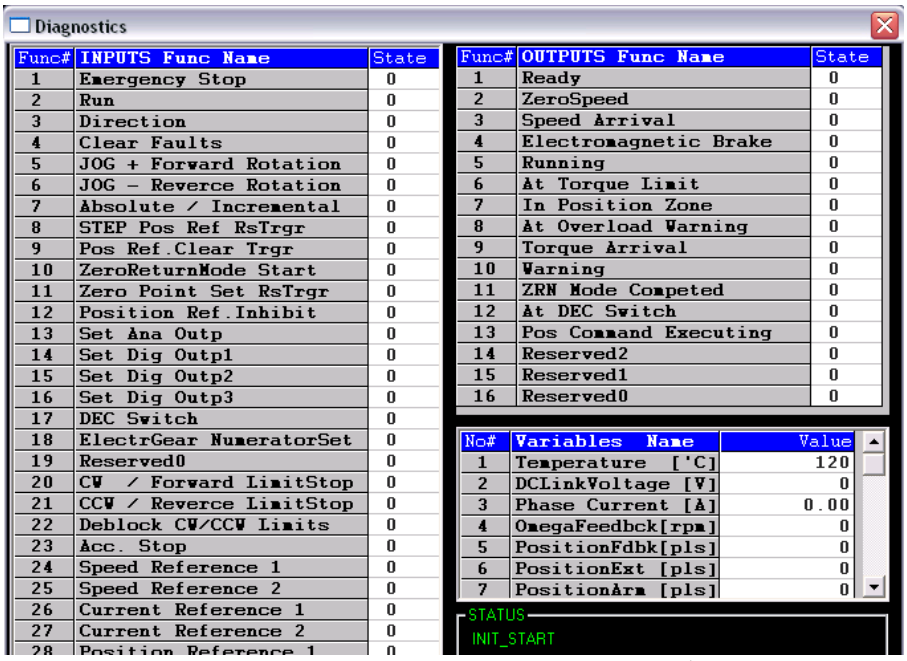
Фиг. 195 Избор на комуникационен порт за връзка със сервозадвижването на реинженирания робот *KUKA KR-150*

8. Избор на *Target -> Download Configuration*, за да се визуализират параметрите от преобразувателя (*фиг. 196*).



Фиг. 196 Визуализация на параметрите на сервозадвижването на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

За визуализация на основни величини и състояние се избира *Target -> Diagnostics* (*фиг. 197*).



Фиг. 197 Визуализация на основни величини и състояние на сервопреобразувателя в прозореца *Target -> Diagnostics*

- Таблица *Variables Name* – визуализира основните величини. В таблицата потребителят може да наблюдава в реално време стойностите на тока (пропорционален на момента), напрежението, аналоговите входове, температурата на охладителя, позицията на енкодера, скоростта, отклоненията по позиция и скорост, и др.
- Таблица *STATUS* - визуализира текущи и алармени състояния. В таблицата се изписват възникналите по време на работа аларми.
- Таблица *INPUTS Func Name* - директно активира всички входни функции. Също така бутоните визуализират статуса на съответната входна функция, при активиране от външен входен сигнал на съединителя *CN4*.
- Таблица *OUTPUTS Func Names* – в таблицата се наблюдават всички изходни функции. В това поле потребителя диагностицира статуса на изходните функции.

Протокол за комуникация CANBus на сервопреобразувателя

Сервопреобразувателите са реализирани с *CANBus* протокол, показан в *табл. 41.* и *табл. 42.*

Таблица 41 Протокол за комуникация *CANBus (Servo Command Frames (RPDO frames))* на сервопреобразувателя на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR 150*

	COB-ID	Num bytes	Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7
RPDO1	0x100+NodeID	8								
RPDO2	0x300+NodeID	8								
RPDO3	0x500+NodeID	0-8								
RPDO	0x100	0								
	RegPositionReference 32 bit signed									
	RegSpeedReference 16 bit unsigned									
	RegStateDigInpFuncExtrn0 16 bit unsigned									
	RegInpFuncCurLim 16 bit unsigned									
	RegStateAnaOutput 16 bit unsigned									
	RegPsnNumerator 16 bit unsigned									
	RegPsnDenominator 16 bit unsigned									
	Reserved									
	Start TPDO									

Таблица 42 Протокол за комуникация *CANBus (Servo Status Frames (TPDO frames))* на сервопреобразувателя на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR 150*

	COB-ID	Num bytes	Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7
TPDO1	0x200+NodeID	8								
TPDO2	0x400+NodeID	8								
TPDO3	0x600+NodeID	0-8								
	RegPsnFdbkInp0 32 bit signed									
	RegStateDigOutpFuncExtrn0 16 bit unsigned									
	RegStateInputs 16 bit unsigned									
	RegFaults 16 bit unsigned									
	RegPsnFastInp0 16 bit unsigned									
	RegTorquePercent 16 bit unsigned									
	RegStateAnaInp0 16 bit signed									
	Reserved									

Управление на електромагнитната спирачка на сервомотора

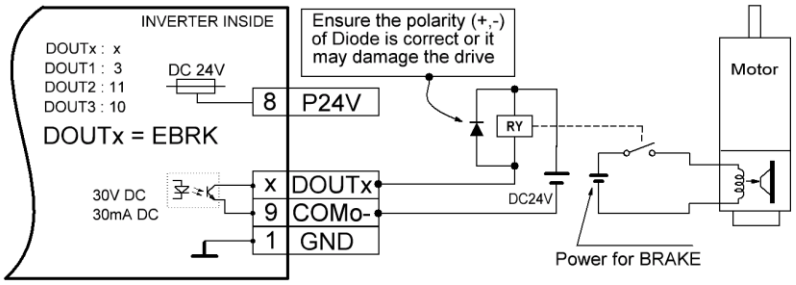
Управлението на електромагнитната спирачка и синхронизирането й с управлението на сервомотора е от съществена важност за функционалността на системата. Тя беше реализирана по схемата и описанието, дадени в *табл. 43*.

Таблица 43 Схема и описание на управлението на електромагнитната спирачка на сервомоторите на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR 150*

EBRK	x04	Pt,Pr,Pc,S,T	Изходният сигнал *«Electromagnetic Brake»* е предназначен за управление на куплираната на вала на сервомотора електромагнитна спирачка. Активирането на *EBRK* води до освобождаване на спирачката. При активна изходна функция *“Готовност за работа” READY* и активна входна функция

			RUN при зададено време в параметър *F.10 (Brake OFF),* се освобождава спирачката. Спирачката се задейства незабавно *EBRK* = 1 при: ➢ аварийно състояние; ➢ отпадане на входна функция *RUN*, само в случай че е зададен начин на спиране по инерция *d.05 = 0 (StopMode)*. При отпадане на входна функция *RUN* и активна изходна функция *“Готовност за работа” READY* и управляемо спиране *d.05 = 1 (StopMode)*, спирачката се задейства (*EBRK = 0*), когато скоростта на вала на двигателя достигне границата, зададена от параметър *F.11 (Brake ON)*.

Свързването на цифров изход при управлението на електромагнитната спирачка е показано на *фиг. 198*.



Фиг. 198 Свързване на цифров изход при управлението на електромагнитната спирачка на сервомоторите на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот KUKA KR 150

Проверката за работоспособност на вградената в сервомотора електромагнитна спирачка и цифровият изход, предназначен за управлението й, се извършва в следната последователност:

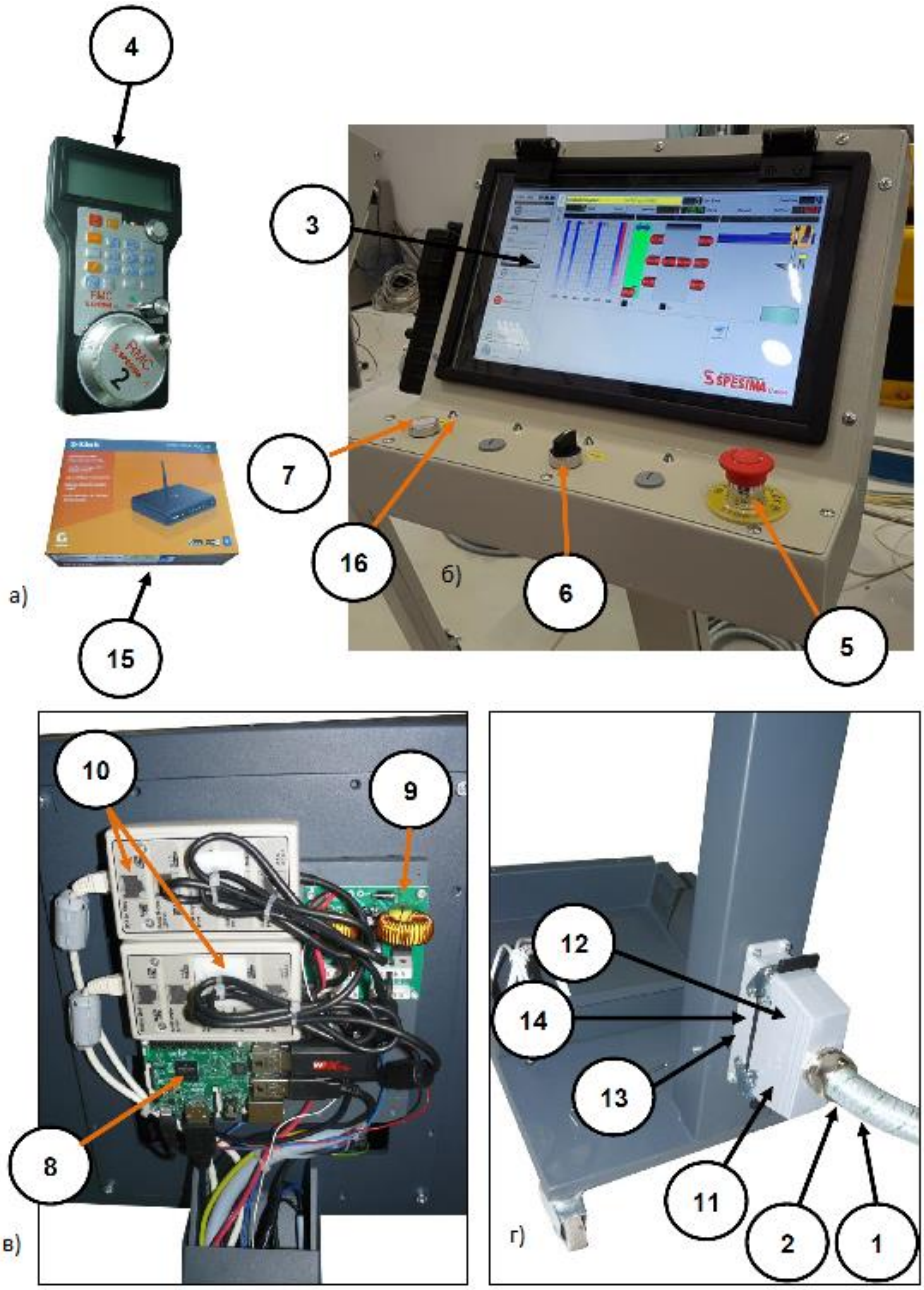
1. Деактивира се функция *RUN* и валът на двигателя е блокиран.
2. Стартира се комуникационната програма *ConfigMaster*.

Активират се функции *RUN* и *JOG*. Сервомоторът се върти контролирано и токът на двигателя по време на работа на празен ход трябва да е *< 200mA*.

Свързване на таблото за управление с пултовете за управление и сензорната система

Операторският пулт за управление е монтиран в метална кутия със метални крак, стойка и основа за базиране (*фиг. 199 б*), в която са асемблирани *PLC контролер* (8), разширителен модул за *PLC контролер* (10), *„touchscreen“* дисплей *ELO ET-1541L* (3) и захранване (9) (*фиг. 199 в*). В металната кутия на операторския пулт е предвидена стойка за ръчния пулт за управление (4) (*фиг. 199 а*), който чрез двата си основи модула – приемник и предавател, комуникира с управлението на робота, чрез *Wi-Fi* стандарт, посредством рутер (15). В крака на металната кутия на операторския пулт са пуснати всички електрически кабели и сигнали, които се предават към таблото за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*. Комуникацията

между пултовете и таблото е подсигурена, чрез механичното куплиране на мъжки куплунг (14) с метална основа (13) към крака на металната кутия на операторския пулт. Към мъжкия куплунг на операторския пулт се свърза женски куплунг (12) с метална основа (11), които чрез щуцер (2) и кабел (1) осигурява комуникацията с управляващите сигнали между таблото и операторския пулт за управление на робота. Връзките са показани на *фиг. 199 г*.



Фиг. 199 Операторски и ръчен пулт за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150* (номерацията на позициите, отговаря на номерацията на позициите в таблица 24)

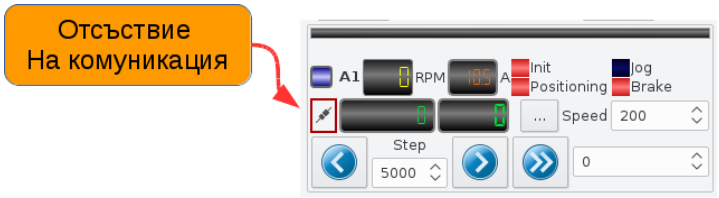
а) ръчен пулт б)операторски пулт за управление в) асемблиране на основните компоненти на операторския пулт: *PLC* контролер, разширителен модул за *PLC* контролер и *„touchscreen“* дисплей *ELO ET-1541L* г) свързване на операторския пулт с таблото за управление на робота

Тестване на функционалността на софтуера

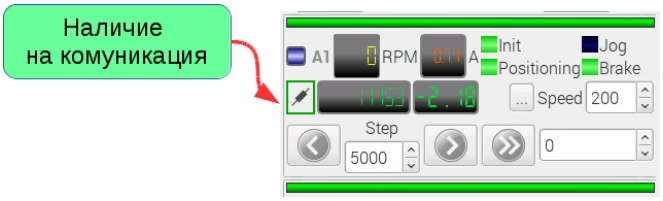
Тестването на функционалността на програмното осигуряване е разделено на два основни етапа – тестване на базовите програмни модули и тестване на потребителските програми за движение на робота в пространството, и на ставите на робота в декартовото пространство, както и изпълнението на базовата машинна логика.

И двата етапа са успешно реализирани, а реализацията на дейността с тестването на отделните модули е описана в по-долните редове.

- *Модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на индустриалния робот* –тестването на този модул се осъществява посредством инженерния потребителски интерфейс, като в него е предвидена функционалност, индикираща състоянието на комуникацията със сервозадвижванията. На *фиг. 200* и *фиг. 201* са показани състоянията на индикаторите, съответно при отсъствие (*фиг. 200*) и наличие на надеждна комуникация (*фиг. 201*).

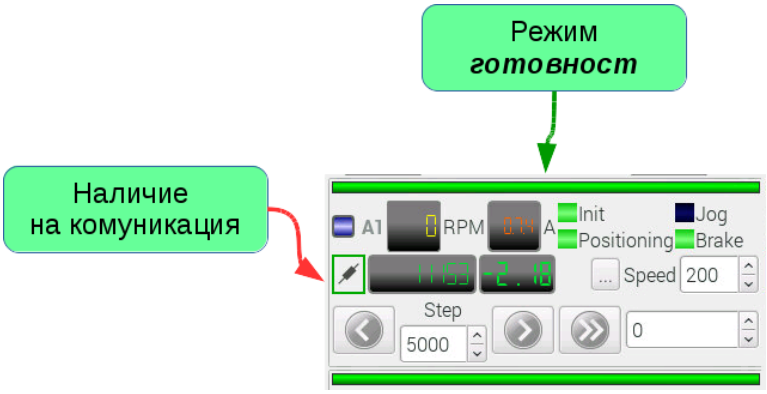


Фиг. 200 Състояние на индикаторите при отсъствие на надеждна комуникация



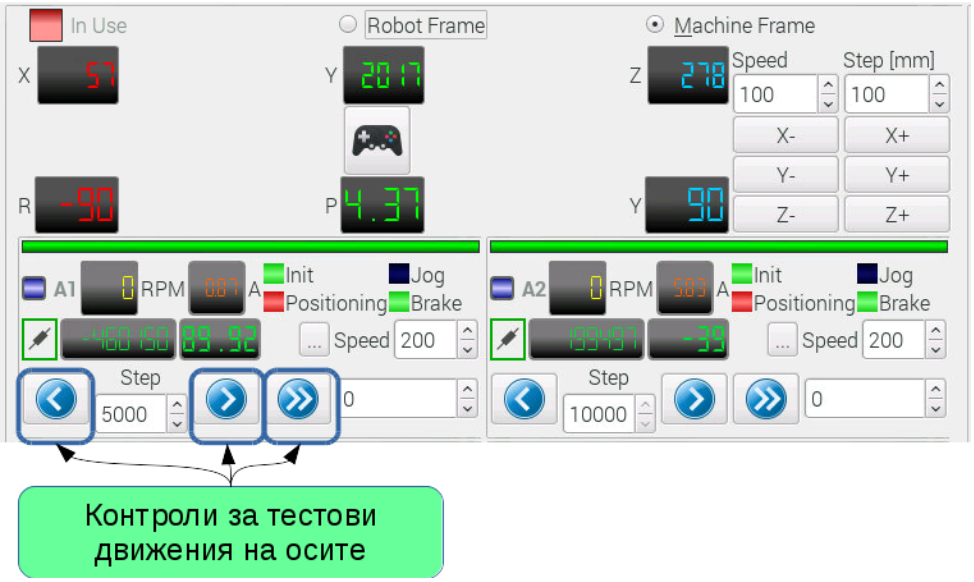
Фиг. 201 Състояние на индикаторите при наличие на надеждна комуникация

След установяване на надеждна комуникация със сервозадвижванията се издава команда за преминаване в режим ***готовност*** на избраните оси. Запазването на надеждната комуникация в този режим говори за правилното функциониране на модула за комуникация със сервозадвижванията (*фиг. 202*).



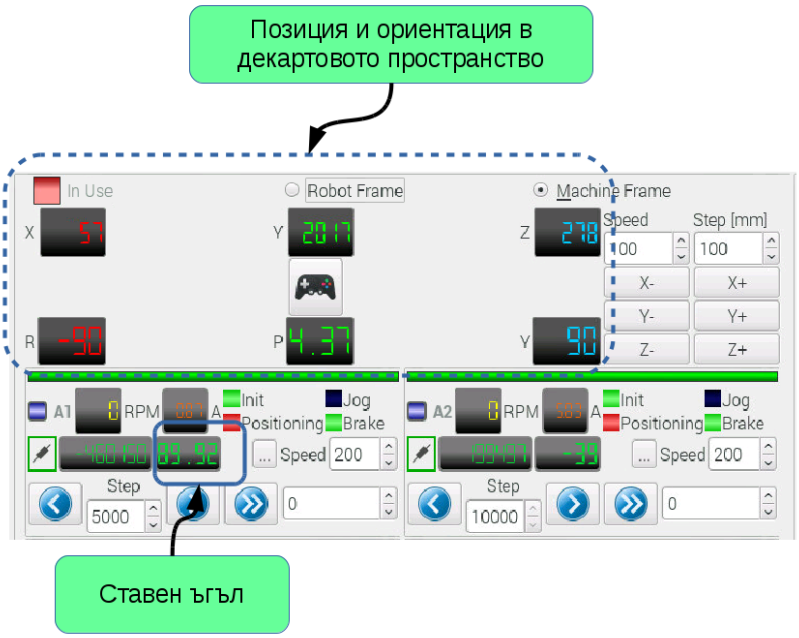
Фиг. 202 Издаване на команда за преминаване в режим *готовност*

- *Модул за синтез на задание за движението на осите* - тестването на този модул се осъществява посредством инженерния потребителски интерфейс, като в него са предвидени специални компоненти за задаване на премествания индивидуално към всяка ос, с програмирана стъпка или към зададена координата в пространството на ставите на робота, и със зададена средна скорост на движение на задвижващия електродвигател (*фиг. 203*).



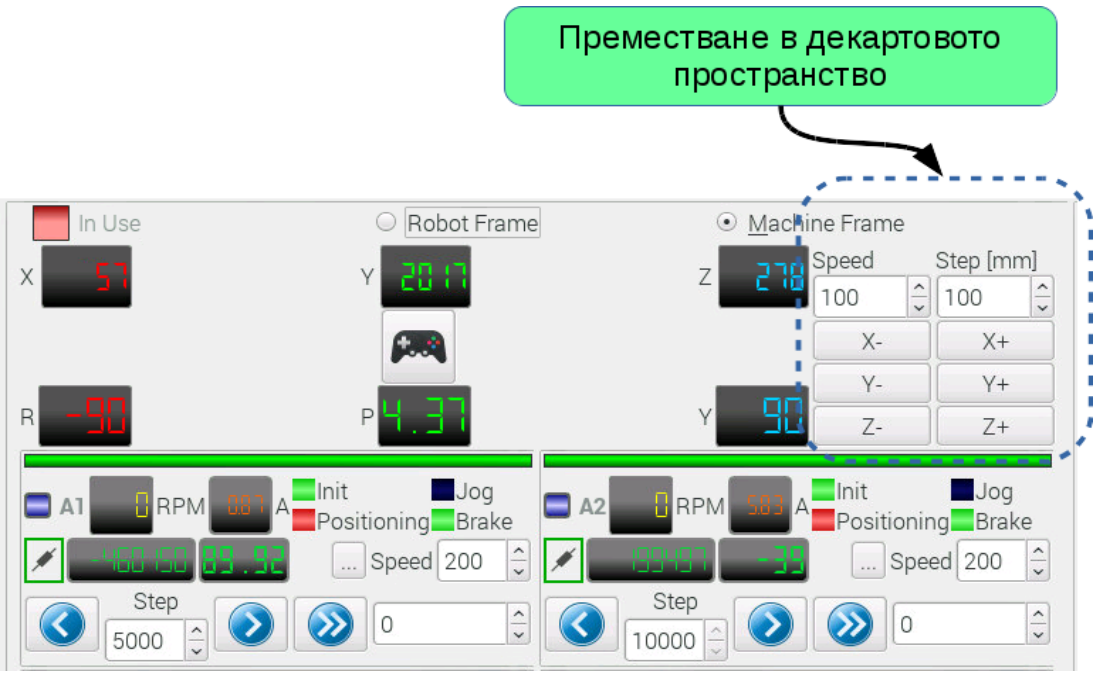
Фиг. 203 Тестване на модул за синтез на задание за движението на осите

При тестването се наблюдава съответна промяна в ъгъла на завъртане на ставата, както и съответна промяна на положението в декартовото пространство (*фиг. 174*).



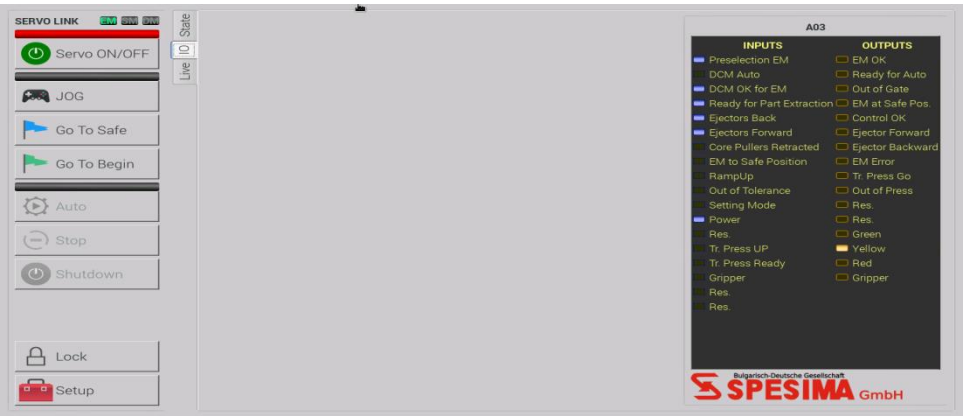
Фиг. 204 Позиция и ориентация в декартовото пространство на ставата на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

- *Модул за кинематично моделиране на робота (права и обратна кинематична задача) и модул за синтез на движения в декартовото пространство* – тези два модула са взаимно свързани и се тестват в обща процедура. Съответните тестове се извършват в средата на инженерния потребителски интерфейс, където за целта са предвидени компоненти за задаване на единични праволинейни премествания на крайния ефектор на робота в декартовото пространство, с определена скорост (*фиг. 205*).



Фиг. 205 Задаване на единични праволинейни премествания на крайния ефектор на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150* в декартовото пространство, с определена скорост

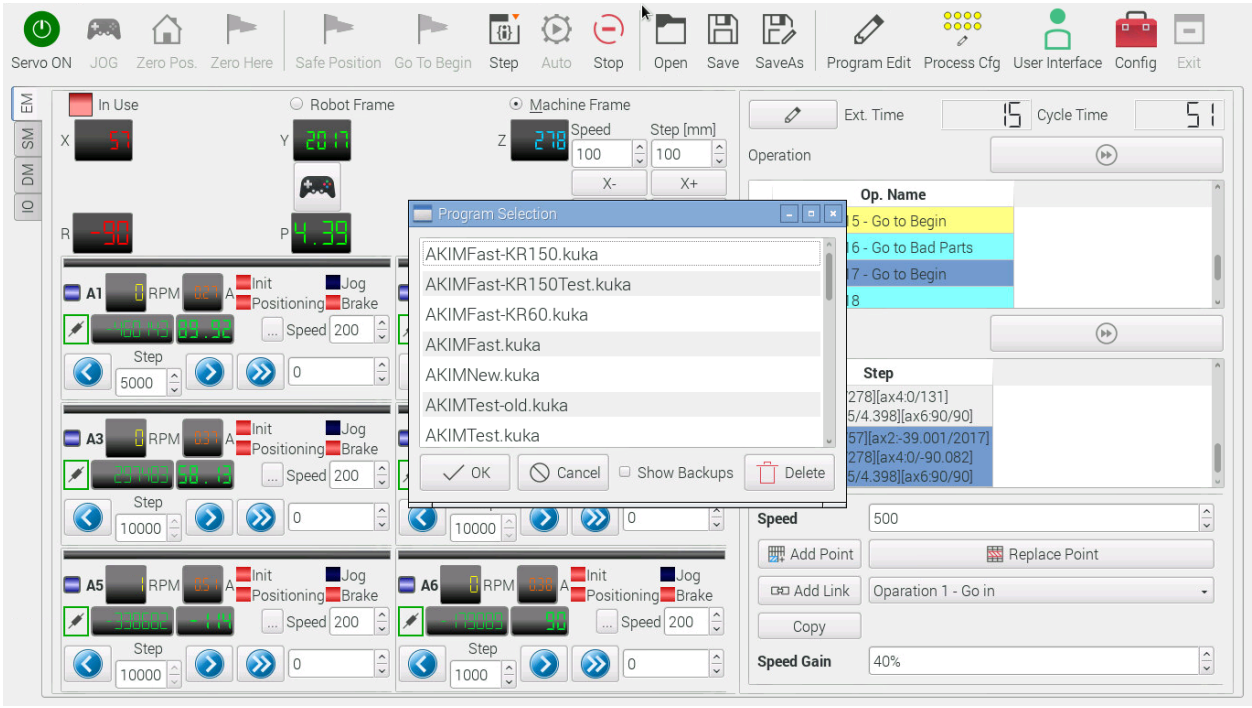
- *Модул за обработване на спомагателните входно-изходни сигнали* – тестовете се извършват в потребителския интерфейс на оператора или в инженерния потребителски интерфейс (*фиг. 206*).



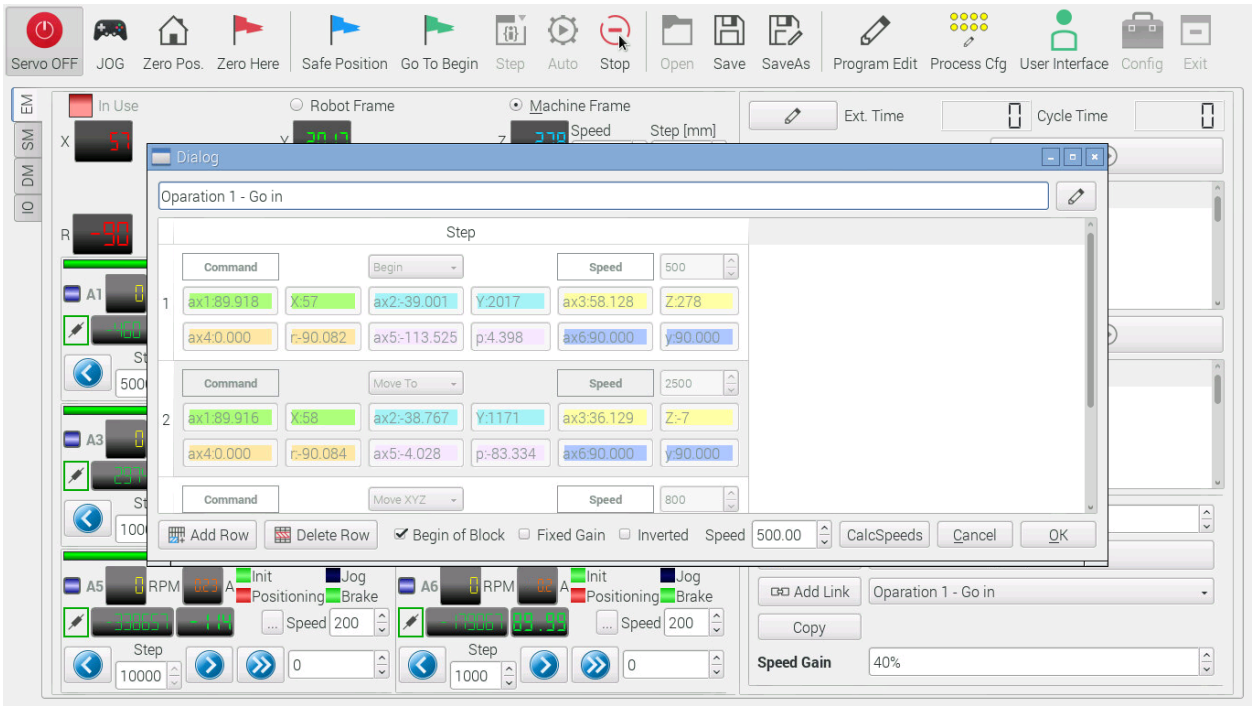
Фиг. 206 Модул за обработване на спомагателните входно-изходни сигнали

При тестовете се наблюдава съответствие между реално активираните входно-изходни канали и изобразяването им, посредством програмното осигуряване.

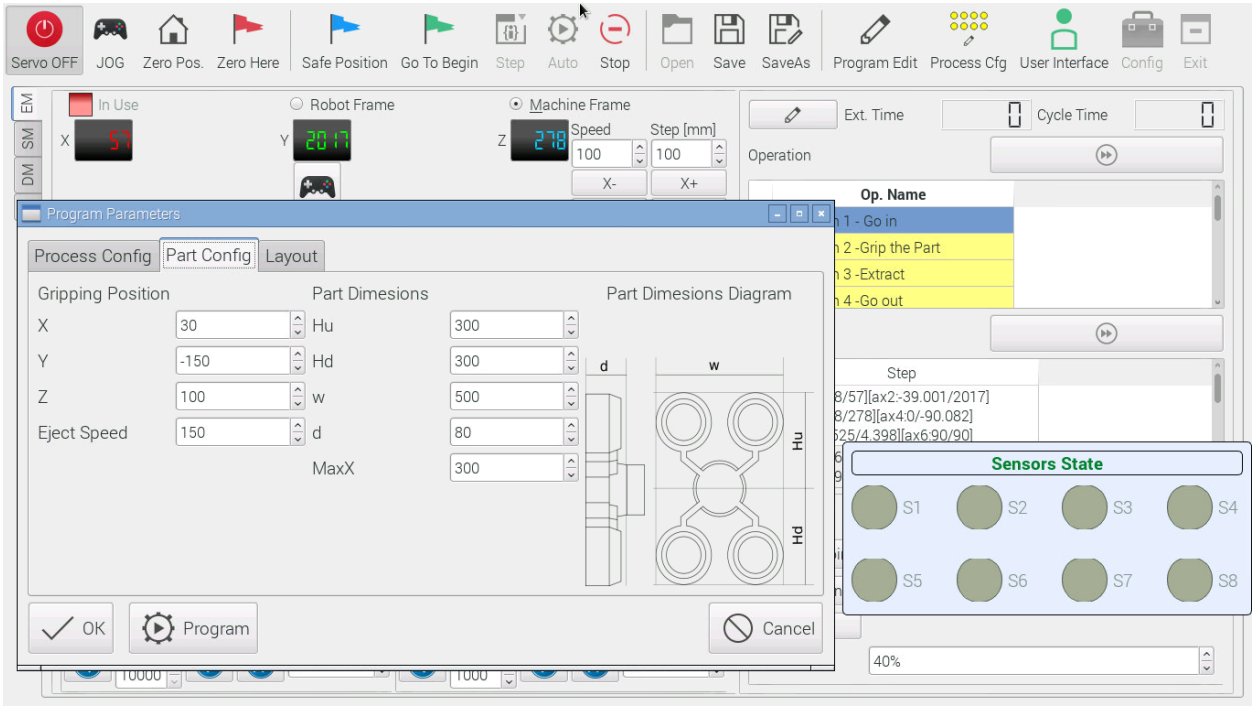
- *Модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения* – тестовете се извършват в инженерния потребителски интерфейс. Извършва се последователност от зареждане на програма за движение, модификация, съхранение и ново зареждане. Направените промени са запазени след процедурата (*фиг. 207, фиг. 208, фиг. 209, фиг. 210, фиг. 211, фиг. 212*).



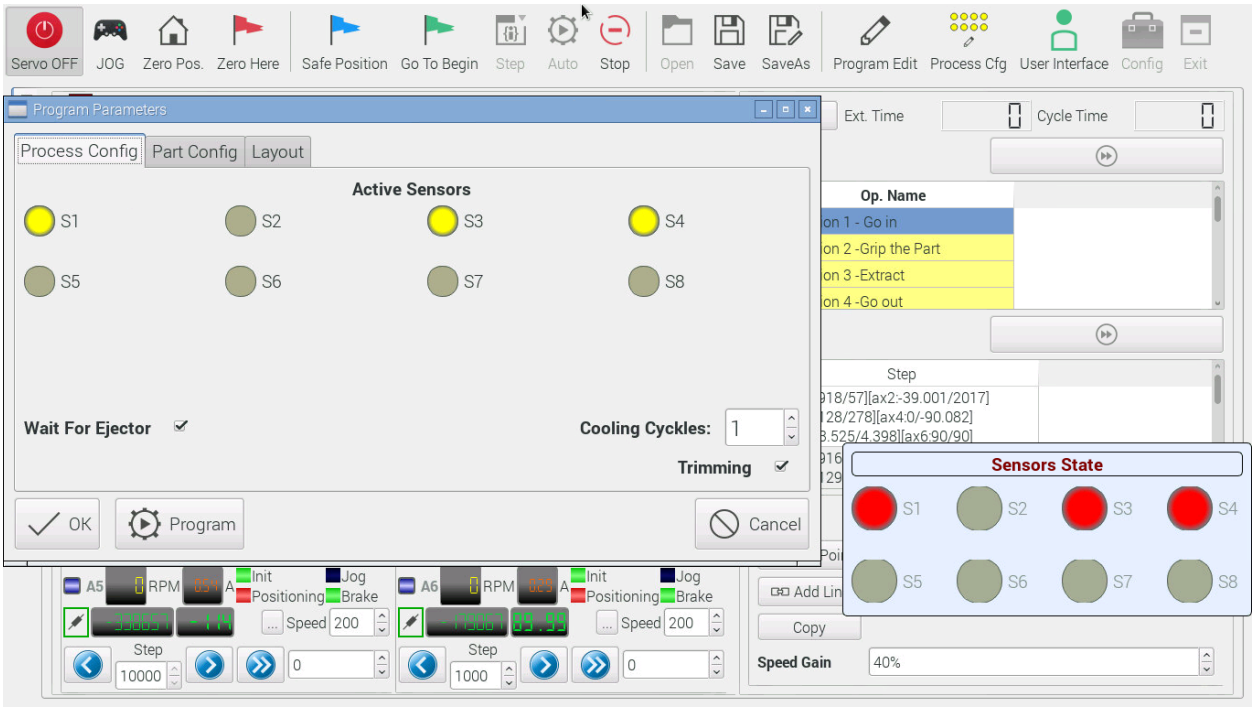
Фиг. 207 Зареждане на програма за движение в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения



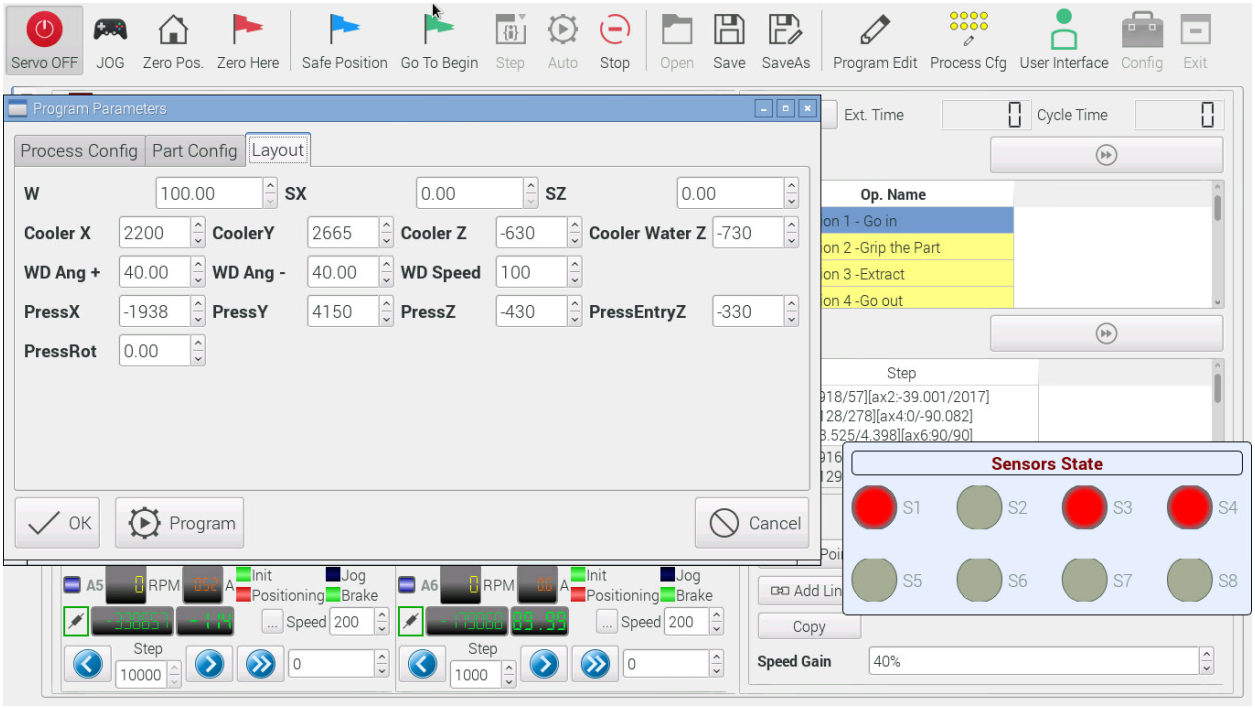
Фиг. 208 Модификация на програма за движение в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения



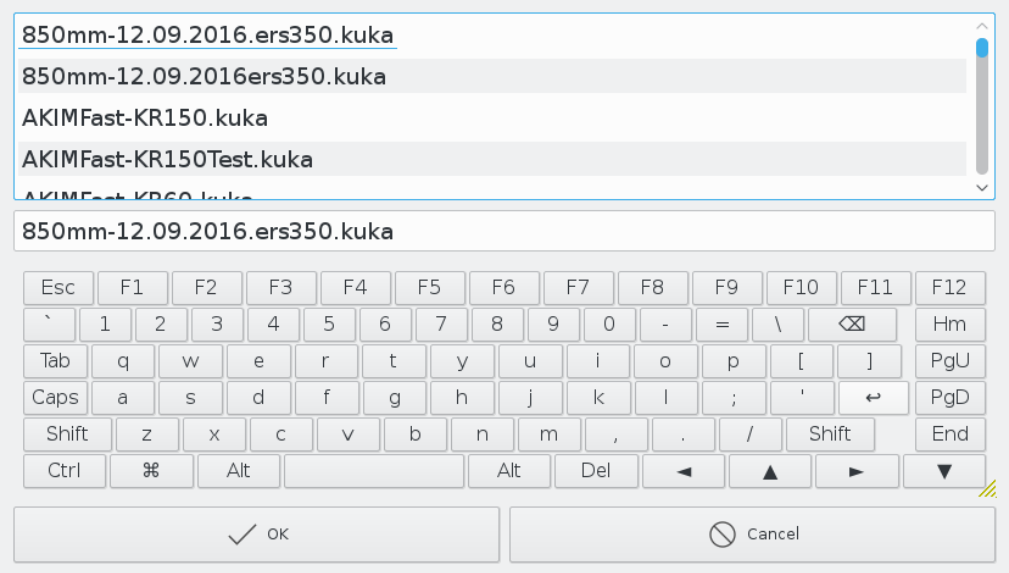
Фиг. 209 Задаване на програмни параметри в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения



Фиг. 210 Следене на сензори в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения

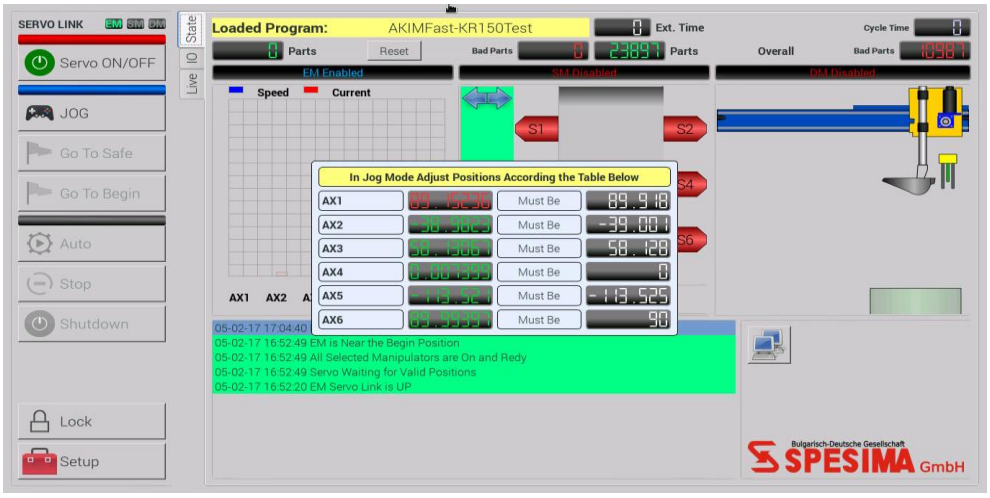


Фиг. 211 Визуализация на данните за разположението на машината в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения



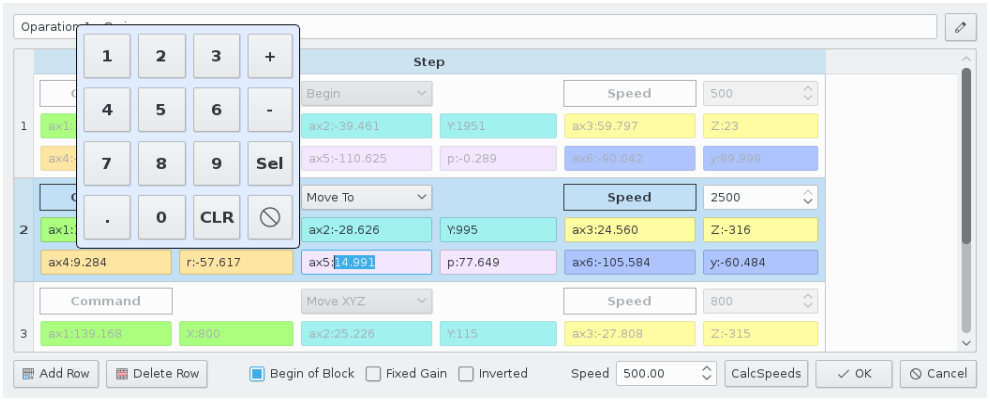
Фиг. 212 Съхранение на данните в модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения

- *Модул ръчно управление* - тестовете се извършват в потребителския интерфейс на оператора или в инженерния потребителски интерфейс. Роботът се установява в ръчен режим (*JOG*) и посредством безжичния пулт за дистанционно управление се тестват движенията на всяка ос, както и движенията в декартовото пространство (*фиг. 213*).

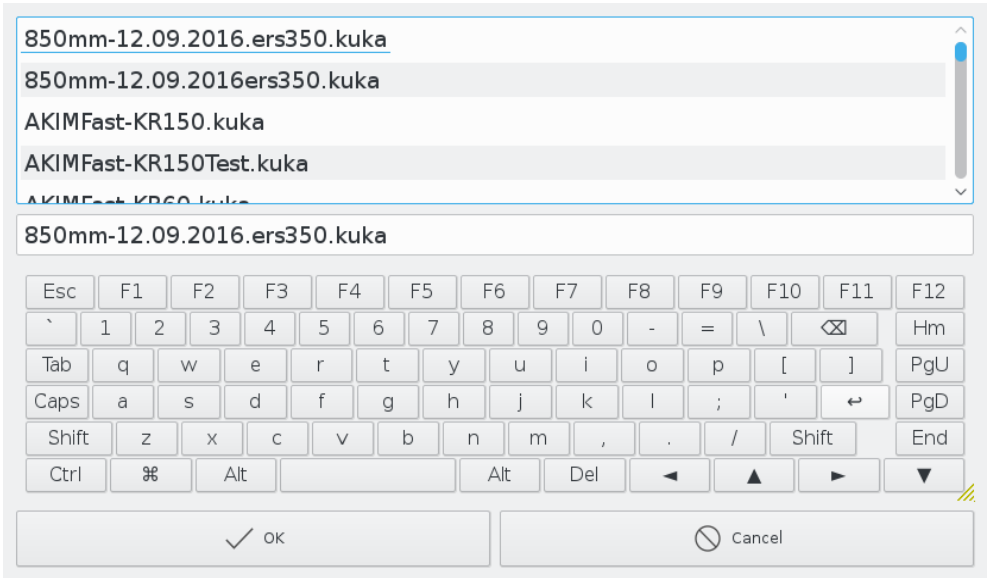


Фиг. 213 Установяване в ръчен режим (*JOG*) в модул ръчно управление

- *Модул за графичен потребителски интерфейс* - тестовете се извършват в потребителския интерфейс на оператора и в инженерния потребителски интерфейс. Проверяват се действието на визуалните компоненти и правилното функциониране на виртуалните екранни клавиатури (*фиг. 214* и *фиг. 215*).

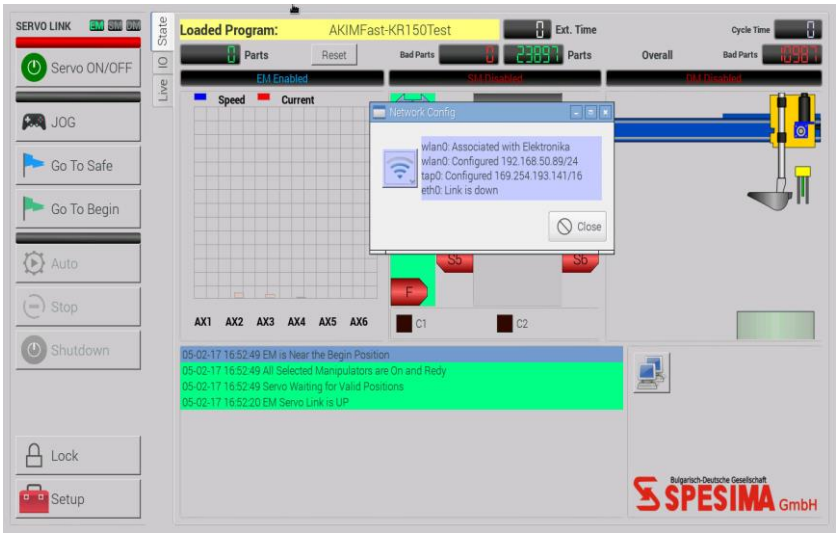


Фиг. 214 Проверяване на действието на визуалните компоненти и правилното функциониране на виртуалните екранни клавиатури



Фиг. 215 Проверяване на компоненти в модула за графичен потребителски интерфейс

- *Модул спомагателни функции* - тестовете се извършват в потребителския интерфейс на оператора. Тук се проверява възможността за настройка на мрежовите интерфейси. Установява се правилното функциониране на конфигурираната връзка (*фиг. 216*).

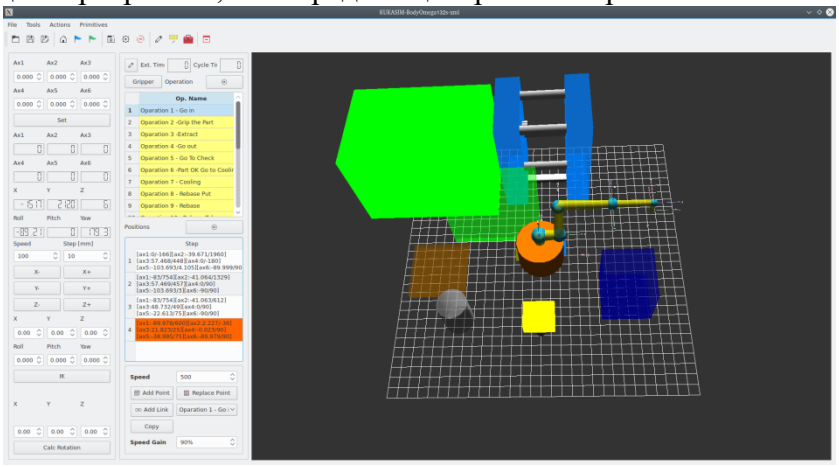


Фиг. 216 Установяване на правилното функциониране на конфигурираната връзка в модула за спомагателни функции

4.4.Тестване на потребителските програми за движение на робота в пространството на ставите на робота и в декартовото пространство, както и изпълнението на базовата машинна логика

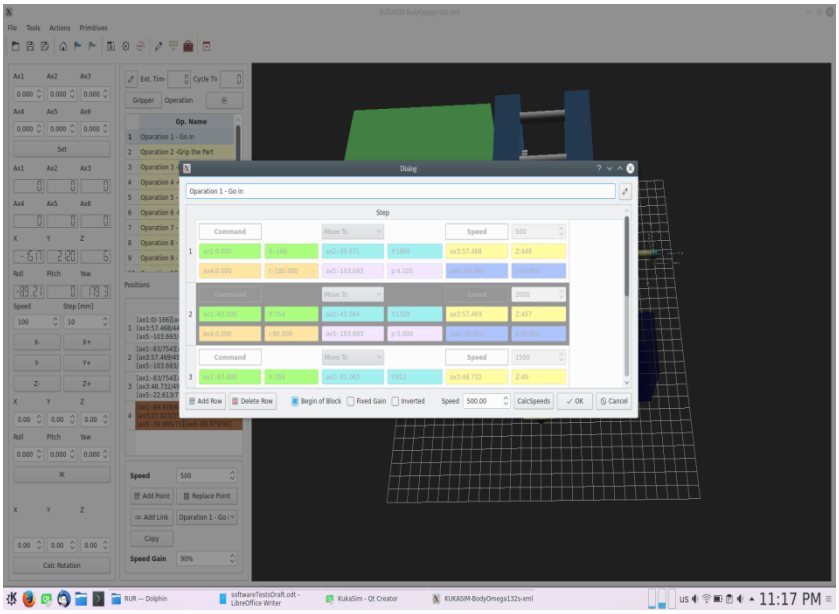
За целите на разработкатата, освен основното програмно осигуряване е разработен и симулационен програмен пакет за проектиране и предварително тестване на потребителските програми, както и за тестване на плъгините за машинна логика с работно наименование ***KukaSim***. Разработения пакет предоставя инструменти за изграждане на виртуална *3D среда*, в която могат да се пресъздават с максимална близост до реалността всички движения на робота в пространството на неговите стави, а така също и в декартовото пространство. Голямо преимущество е, че създадените плъг-ини се зареждат без никаква допълнителна модификация, което гарантира приложението им в реални задачи след провеждане на тестове във виртуалната среда на симулатора.

Общ изглед на програмата, със зареден сценарий и обкръжение е показан на *фиг. 217*.

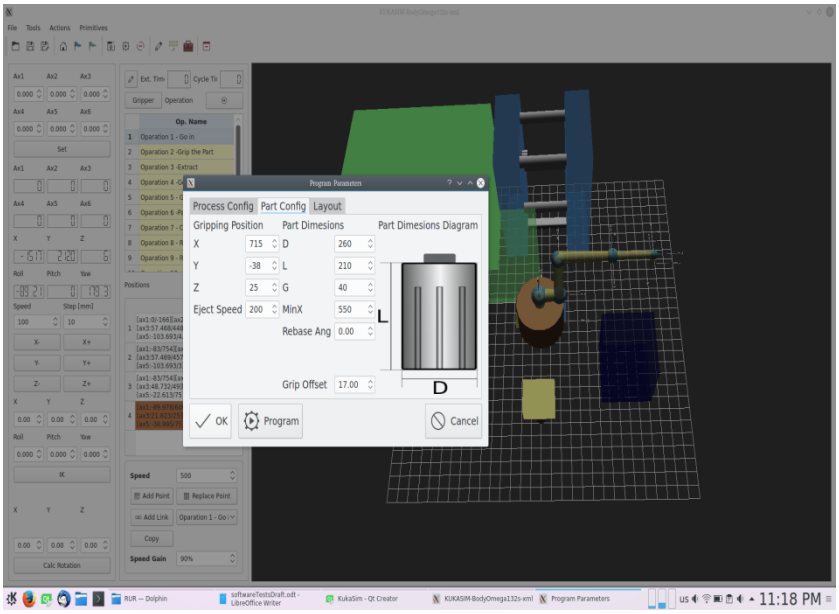


Фиг. 217 Общ изглед на програмата, със зареден сценарий и обкръжение

На *фиг. 218* и *фиг. 219* са показани изгледи от процедурите за редактиране на програмата за движение и параметрите на плъгина за реализация на машинната логика.



Фиг. 218 Изглед от процедура за редактиране на програмата за движение

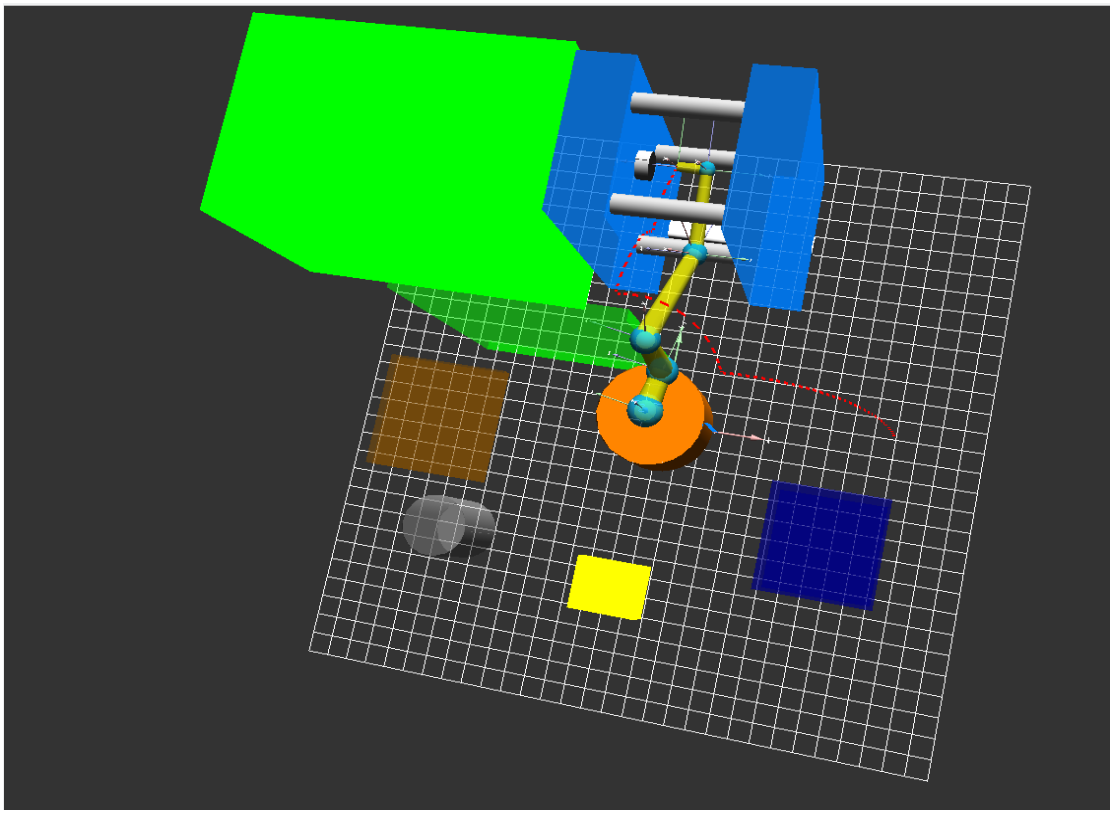


Фиг. 219 Параметри на плъгина за реализация на машинната логика

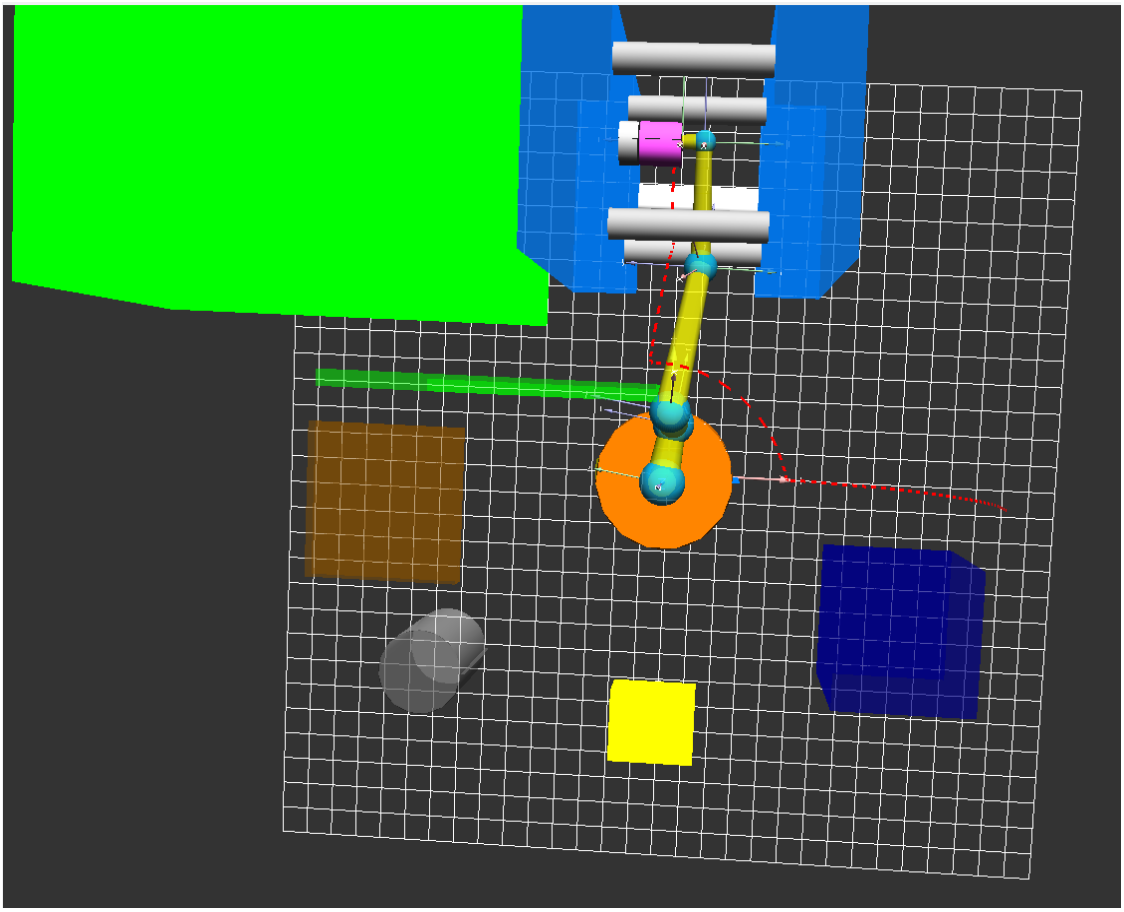
Както се вижда от фигурите, симулаторът предоставя подобни на основното програмно осигуряване компоненти за управление, въвеждане и редактиране на потребителската програма, конфигурация и параметризиране на машинната логика и т.н. С негова помощ могат да се тестват блокове от движения в пространството на ставите и декартовото пространство.

На *фиг. 220* е показан блок от комбинирани движения, изпълнен в средата на симулатора. За нагледно представяне, изпълнената траектория се трасира с червен цвят.

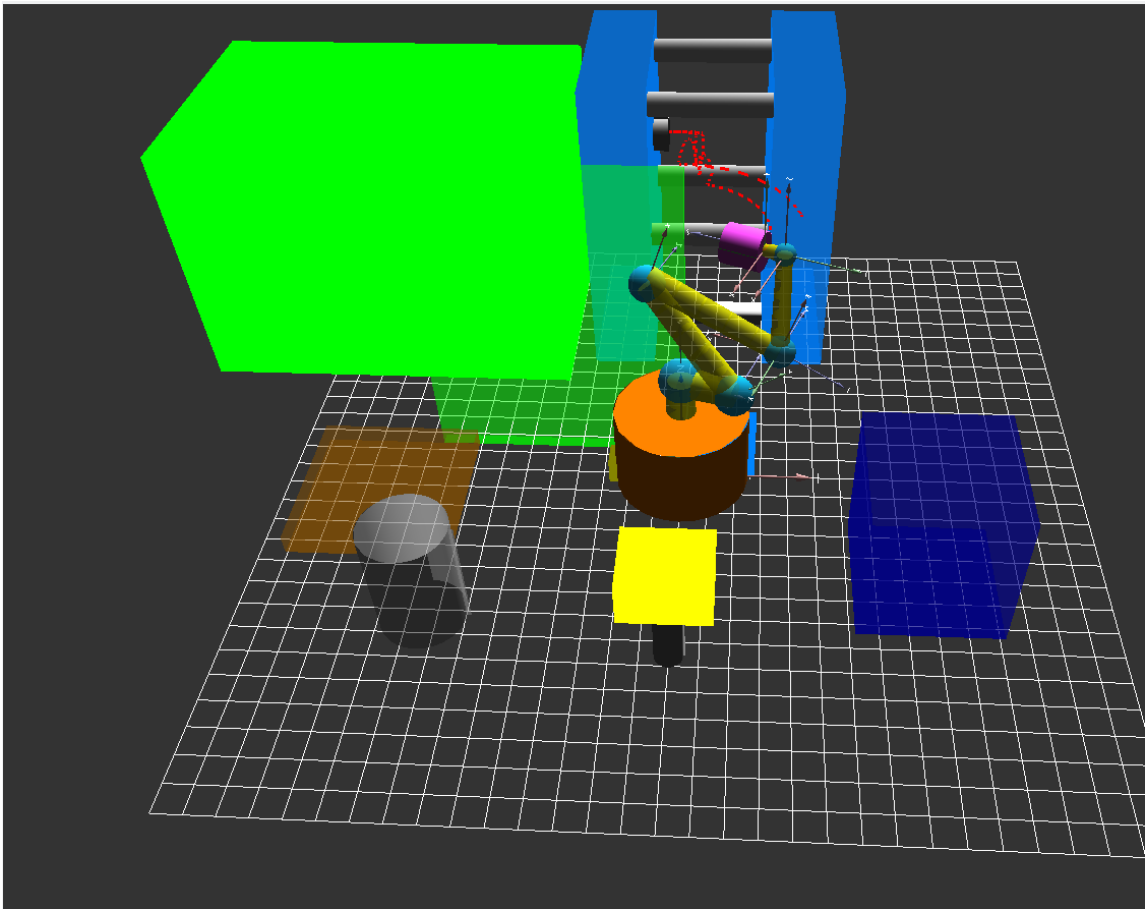
По аналогичен начин се тества цялостната потребителска програма и машинна логика. От *фиг. 221* до *фиг. 229* е показан реален сценарий за работа на роботизирана клетка към машина за леене на алуминиеви детайли със студена камера.



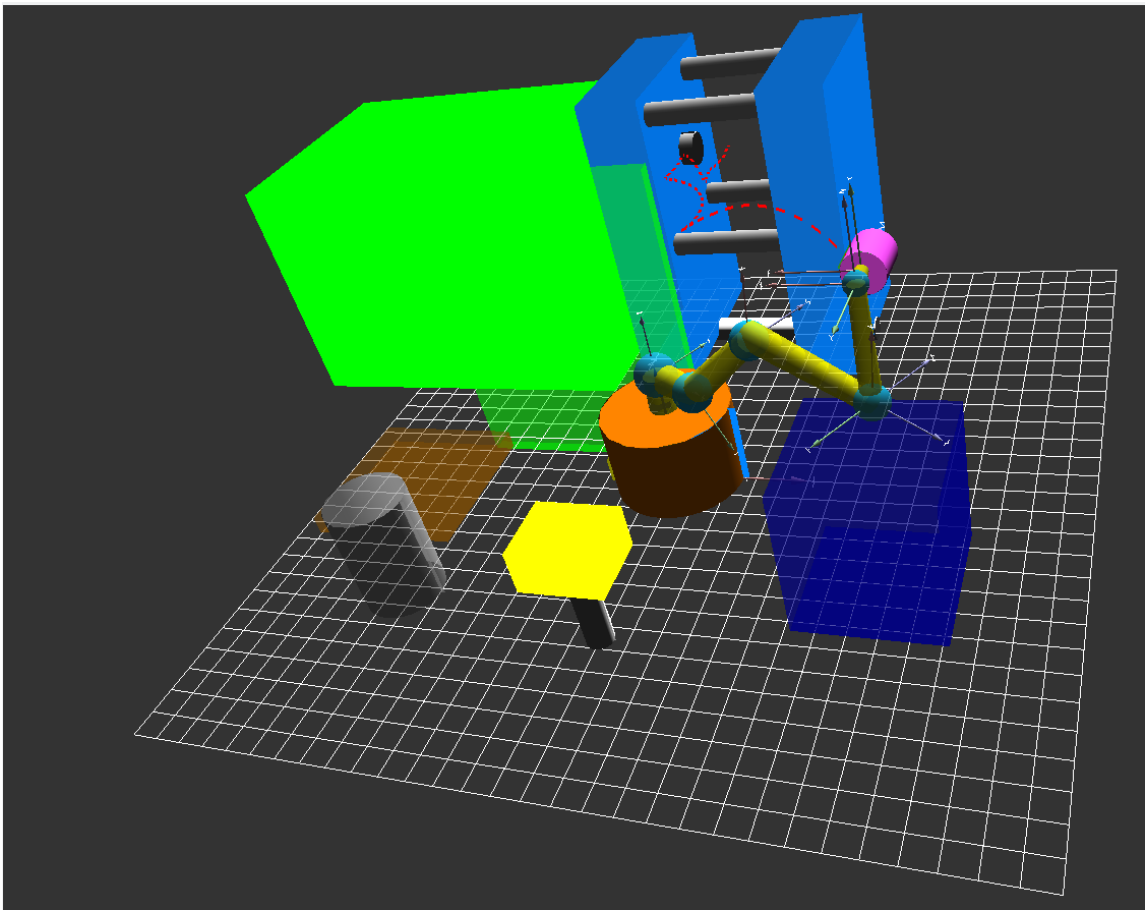
Фиг. 220 Блок от комбинирани движения, изпълнен в средата на симулатора



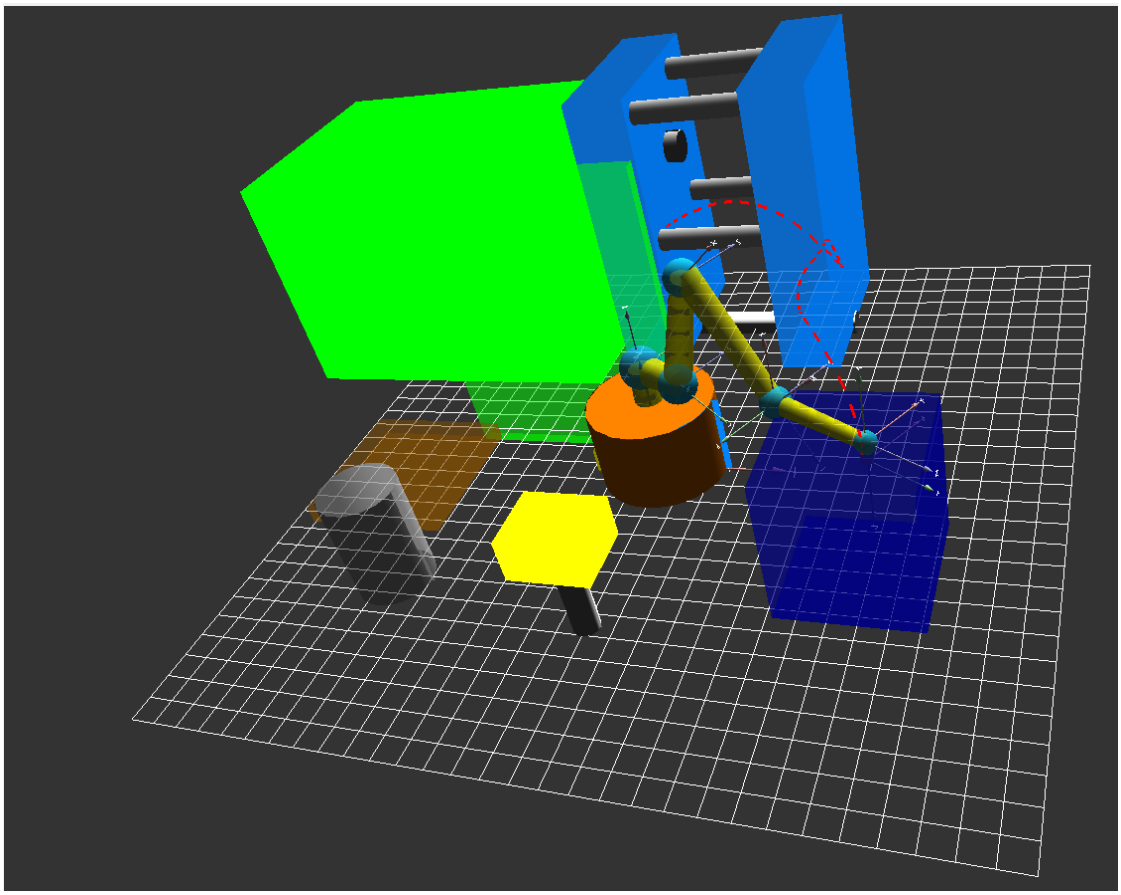
Фиг. 221 Фаза - изваждане на детайл



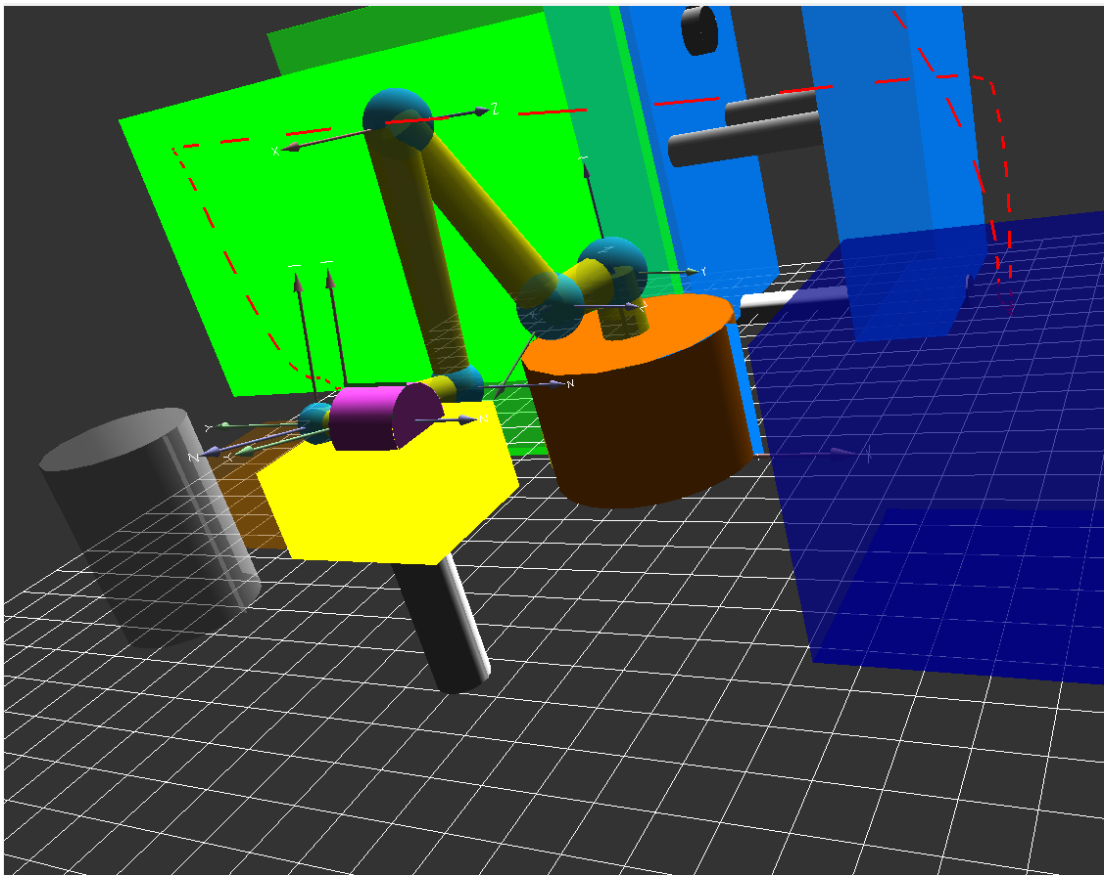
Фиг. 222 Фаза - изход от работната зона на машината



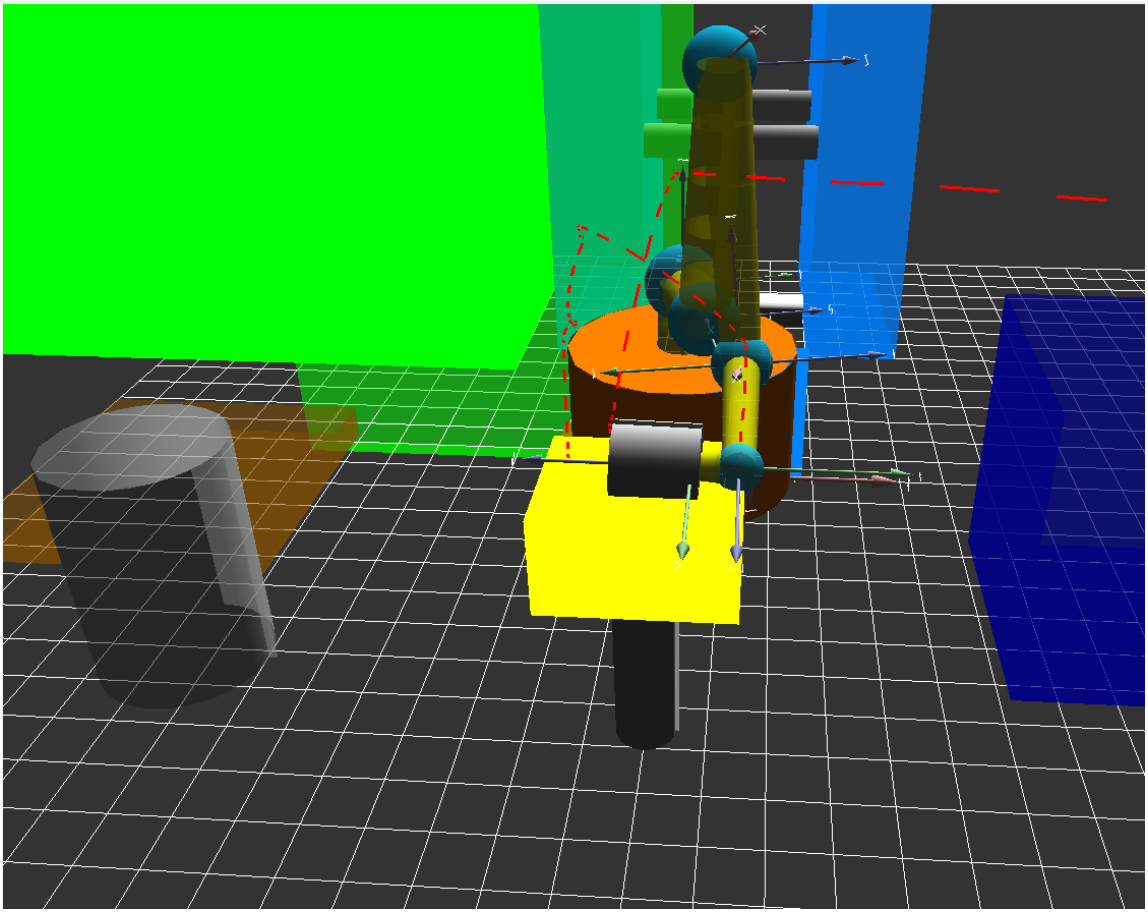
Фиг. 223 Фаза - проверка на детайл



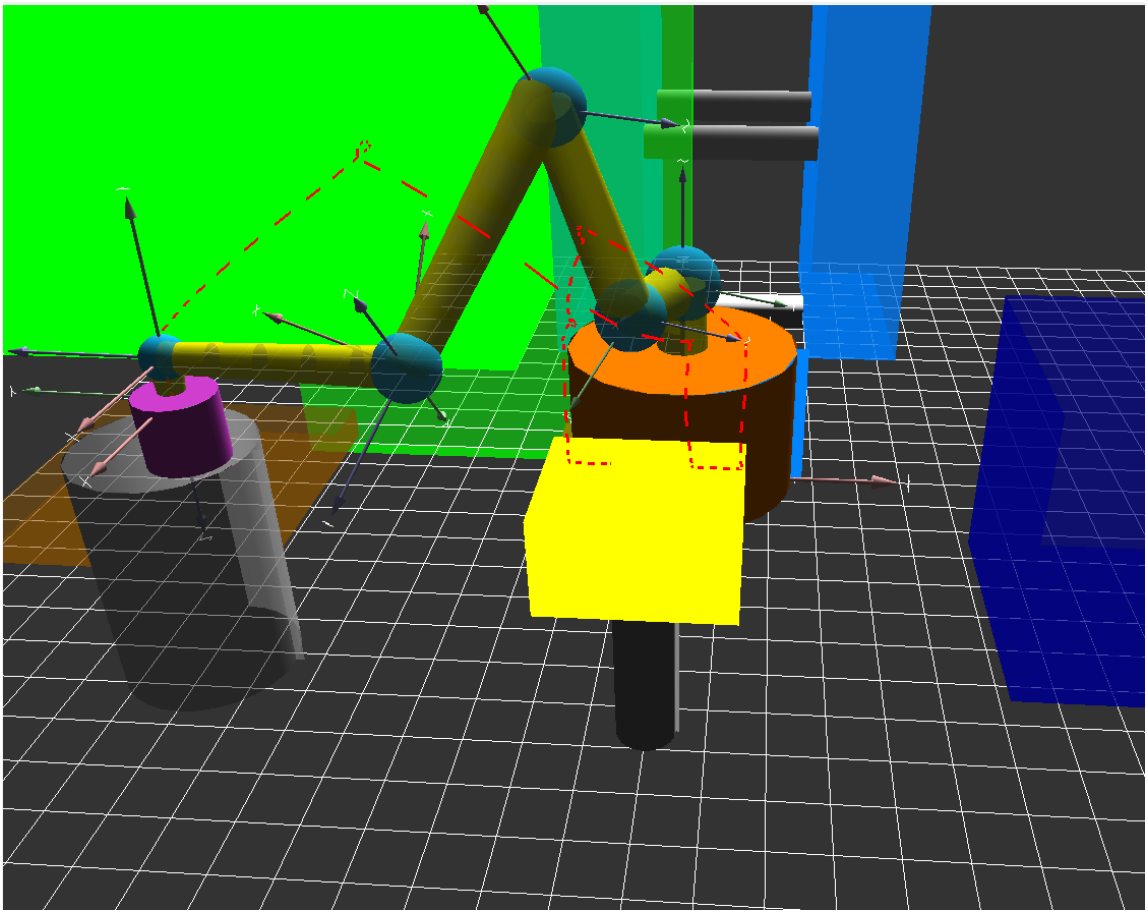
Фиг. 224 Фаза - охлаждане



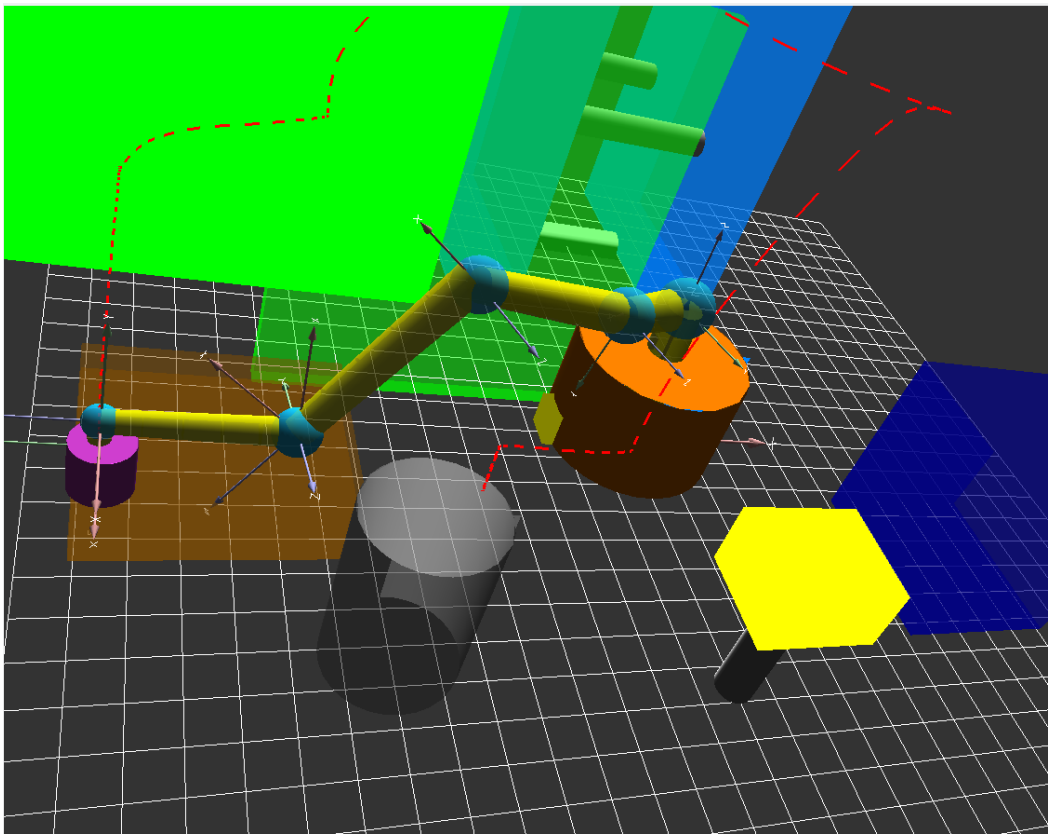
Фиг. 225 Фаза - ребазиране 1



Фиг. 226 Фаза - ребазиране 2

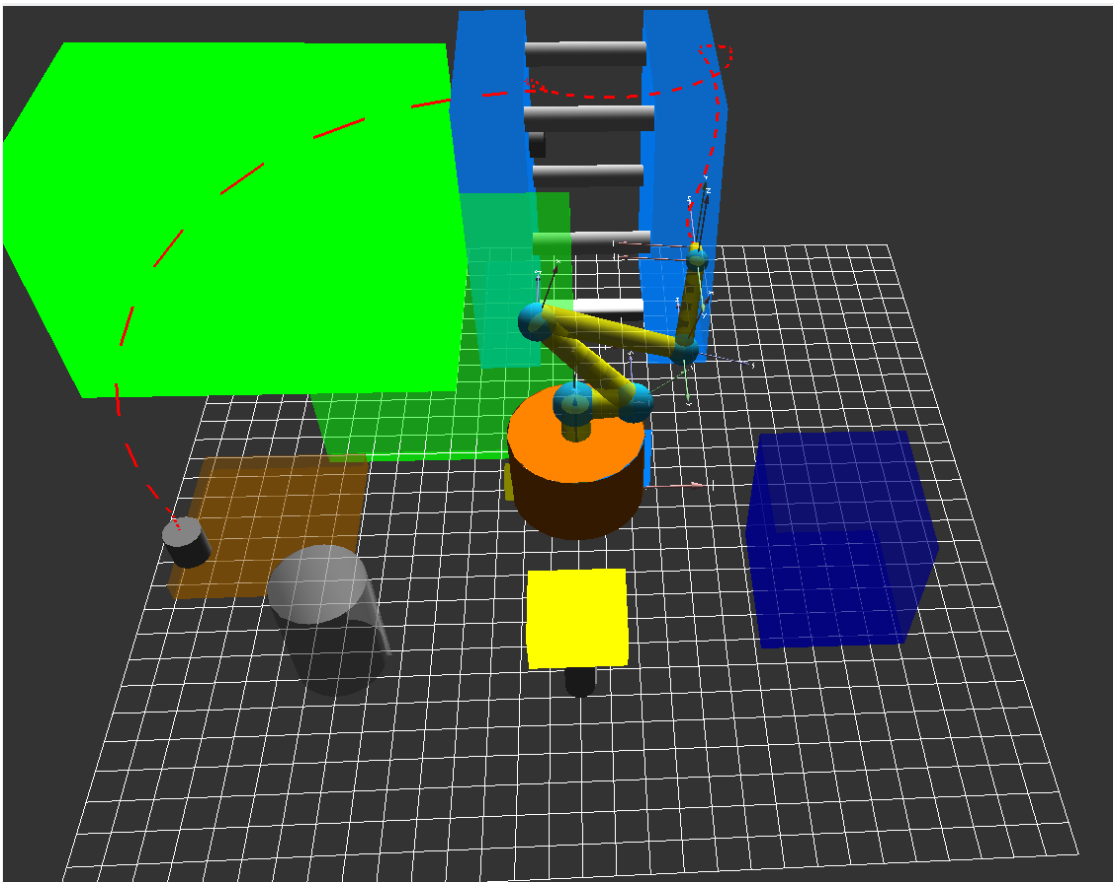


Фиг. 227 Фаза - щанцоване



Фиг. 228 Фаза - подреждане готова продукция

След преминаването на симулационните тестове на движенията, потребителската програма и машинната логика, са извършени и тестове на реално функциониращия опитен образец.



Фиг. 229 Тест на реално функциониращия опитен образец

4.5. Изследване на механичната конструкция на избрания типопредставител на ИУР вследствие на извършения реинженеринг

Планираното ново индустриално приложение на разработвания функционален лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР*, след успешното му завършване е като манипулатор-екстрактор, в работната зона на леярска машина за хоризонтално леене под налягане на алуминиеви отливки.

За извършения качествен реинженеринг на създадения функционален лабораторен модел се наложи създаването, верифицирането и адаптирането за новото му индустриално приложение на методики за инспекции на механичната конструкция, хардуера и софтуера. Оптимален и високоефективен подход е приложен за реинженеринг на тези роботи, при който се запазиха годните, главно механични компоненти и се извърши модернизация на хардуерната и софтуерната част на тези мехатронни изделия.

По същество механичната конструкция на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* не е променяна.

Позиционен анализ

Позиционният анализ е необходим за по-нататъшното планиране на управлението на движенията на робота. За реализирането на ефективно управление е необходимо да се мине през всички етапи на кинематичния анализ, който е твърде комплициран при съвременните *ИУР*. При ранните версии управлението на роботите се ограничаваше до управление поотделно на всяка ос, докато при съвременните *УР* се предпочита така наречения *„task level control“*, който осигурява синхронното движение на всички оси на робота.

За изграждане на математическите модели, необходими за планиране на работните движения на *ИУР*, са решени следните задачи:

- определяне на релативното положение на различните звена на робота и на обектите в пространството, спрямо базовата координатна система на *ИУР*;
- предаване на информация за състоянието и ориентацията на обектите, намиращи се в работната зона на *ИУР*.

Четирите параметъра (*D-H параметри*) за изследвания тук функционално действащ лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* са показани в *табл. 44*, като са добавени параметрите на крайния ефектор, предназначен за новото индустриално приложение на робота.

Таблица 44 *D-H параметри* на *KUKA KR 150*

Става	***θi,* °**	***αi,* °**	***ai, мм***	***di, мм***
база	0	0	0	0
1	$\theta_1 = 0$	$\alpha_1 = 0$	$a_1 = 0$	$d_1 = 1045$
2	$\theta_2 = 0$	$\alpha_2 = -90$	$a_2 = 500$	$d_2 = 0$
3	$\theta_3 = -90$	$\alpha_3 = 0$	$a_3 = 1300$	$d_3 = 0$
4	$\theta_4 = 0$	$\alpha_4 = -90$	$a_4 = -55$	$d_4 = 1025$
5	$\theta_5 = 0$	$\alpha_5 = 90$	$a_5 = 0$	$d_5 = 0$
6	$\theta_6 = 180$	$\alpha_6 = -90$	$a_6 = 0$	$d_6 = 753$
7	$\theta_7 = 0$	$\alpha_7 = 90$	$a_6 = 0$	$d_6 = 262$

Пълното описание на математическия модел на избрания типопредставител *KUKA KR 150* беше представено с решаването на т. нар. права и обратна задача в кинематиката. Описанието и реализацията са представени в следващите редове.

Права задача в кинематиката за изследвания реинженериран робот

При правата кинематична задача се изчислява позицията и ориентацията на крайния ефектор, в зависимост от зададените ъгли на ставите на робота.

Използвани са *D-H параметрите* за съставяне на математичния модел, Тези параметри описват четири операции – две ротации и две транслации, които са достатъчни за

пресмятането на трансформационната матрица за релативното положение на ставата K_{i-1} към K_i, в рамките на кинематичната верига на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот в настоящия проект:

$$^{i-1}_{i}T = Rot(z,\theta_i)Trans(0,0,d_i)Trans(a_i,0,0)Rot(x,\alpha_i) =$$

$$\begin{bmatrix} cos\theta_i & -sin\theta_i cos\alpha_i & sin\theta_i sin\alpha_i & a_i cos\theta_i \\ sin\theta_i & cos\theta_i cos\alpha_i & -cos\theta_i sin\alpha_i & a_i sin\theta_i \\ 0 & sin\alpha_i & cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

За цялата поредица от *N кинематични връзки (стави)*, цялостната трансформация между първото звено K_0 и последното K_N се представя от матрично умножение на всички трансформационни матрици с *D-H параметрите* на всяка става:

$$^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T \cdots {}^{N-1}_{N}T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{l} & \vec{m} & \vec{n} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \vec{p} \\ \vec{0}^T & 1 \end{bmatrix},$$

където R - е *3x3* матрица (ротационна матрица), представяща ротацията, а с $\vec{p}$ е обозначена *3x1* матрица (вектор), представяща транслацията (релативното отместване).

По този начин за „антропоморфен“ робот с шест степени на свобода от типа на избрания тук функционално действащ лабораторен модел на реинженерирания робот, типопредставител на *ИУР - KUKA KR 150*, цялостната трансформация ще бъде:

$$^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T\,{}^{5}_{6}T = \begin{bmatrix} l_x & m_x & n_x & p_x \\ l_y & m_y & n_y & p_y \\ l_z & m_z & n_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Трансформацията описва позицията и ориентацията на последното звено (инструмента, крайният ефектор) спрямо основата на индустриалния робот.

Ако роботът има допълнителен инструмент или базовата координатна система не съвпада с базовата на робота, се извършват допълнителни умножения на трансформационната матрица $^{0}_{6}T$ с трансформационната матрица на инструмента и/или с тази на основата на робота.

Трансформационните матрици на робота с шест степени на свобода от типа на изследвания *KUKA KR 150* са следните:

$$^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & -sin\theta_1 & a_1 cos\theta_1 \\ sin\theta_1 & 0 & cos\theta_i & a_1 sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} cos\theta_2 & -sin\theta_2 & 0 & a_2 cos\theta_2 \\ sin\theta_2 & cos\theta_2 & 0 & a_2 sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} cos\theta_3 & 0 & -sin\theta_3 & a_3 cos\theta_3 \\ sin\theta_3 & 0 & cos\theta_3 & a_3 sin\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} cos\theta_4 & 0 & sin\theta_4 & 0 \\ sin\theta_4 & 0 & -cos\theta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} cos\theta_5 & 0 & -sin\theta_5 & 0 \\ sin\theta_5 & 0 & cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{5}_{6}T = \begin{bmatrix} cos\theta_6 & -sin\theta_6 & 0 & 0 \\ sin\theta_6 & cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Пресмятайки цялостната трансформационна матрица се получава:

$$l_x = s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) + c_1\big(-s_{23}s_5c_6 + c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6)\big)$$
$$l_y = -c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) + s_1\big(-s_{23}s_5c_6 + c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6)\big)$$
$$l_z = -c_6(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5) + s_{23}s_5s_6$$
$$m_x = c_6(s_1c_4 - c_1c_{23}s_4) - s_6\big(s_1s_4c_5 + c_1(c_{23}c_4c_5 - s_{23}s_5)\big)$$
$$m_y = c_1(-c_4c_6 + c_5s_4s_6) - s_1\big(-s_{23}s_5s_6 + c_{23}(s_4c_6 + c_4c_5s_6)\big)$$
$$m_z = s_{23}s_4c_6 + s_6(s_{23}c_4c_5 + c_{23}s_5)$$

$$n_x = -s_1 s_4 s_5 - c_1(s_{23} c_5 + c_{23} c_4 s_5)$$
$$n_y = -s_1 s_{23} c_5 + s_5(-s_1 c_{23} c_4 + c_1 s_4)$$
$$n_z = -c_{23} c_5 + c_4 s_{23} s_5$$
$$p_x = -d_6 s_1 s_4 s_5 + c_1\big(a_1 + a_2 c_2 - s_{23}(d_4 + d_6 c_5) + c_{23}(a_3 - d_6 c_4 s_5)\big)$$
$$p_y = d_6 c_1 s_4 s_5 + s_1\big(a_1 + a_2 c_2 - s_{23}(d_4 + d_6 c_5) + c_{23}(a_3 - d_6 c_4 s_5)\big)$$
$$p_z = d_1 - c_{23}(d_4 + d_6 c_5) - a_2 s_2 + s_{23}(-a_3 + d_6 c_4 s_5)$$

където $s_i = sin\theta_i$, $c_i = cos\theta_i$, $s_{23} = sin(\theta_2 + \theta_3)$, $c_{23} = cos(\theta_2 + \theta_3)$

За преобразуването на ротационната матрица към *ойлерови ъгли* (*RPY ъгли*) се използват следните зависимости:

$$R_{RPY}(\gamma, \beta, \alpha) = R_z(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_x(\gamma) =$$
$$= \begin{bmatrix} cos\alpha cos\beta & cos\alpha sin\beta sin\gamma - sin\alpha cos\gamma & cos\alpha sin\beta cos\gamma + sin\alpha sin\gamma \\ sin\alpha cos\beta & sin\alpha sin\beta sin\gamma + cos\alpha cos\gamma & sin\alpha sin\beta cos\gamma - cos\alpha ain\gamma \\ -sin\beta & cos\beta sin\gamma & cos\beta cos\gamma \end{bmatrix} =$$
$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}.$$

От ротационната матрица се извеждат следните уравнения за *ойлеровите ъгли*:

$$\beta = Atan2\Big(-r_{31}, \sqrt{{r_{11}}^2 + {r_{21}}^2}\Big),\ \alpha = Atan2(r_{21}, r_{11}),\ \gamma = Atan2(r_{32}, r_{33})$$

Обратна задача в кинематиката за изследвания реинженериран робот

Тази задача е обратна на правата задача - изчисляват се ставните ъгли на робота в зависимост от позицията и ориентацията на крайния ефектор.

В случай, че роботът има допълнителен инструмент или основната координатна система не съвпада с базовата на робота, се извършват изчисления в две стъпки – първо се намира трансформационната матрица, показваща релативната връзка между основната координатна система и базовата на робота, а впоследствие се извършват изчисленията необходими за решаването на обратната задача.

За разлика от правата задача, в обратната решението е съпътствано с намирането на много възможни варианти, поради което е целесъобразно да се приложи геометричен подход. За роботите от типа на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR 150* е използван именно такъв подход, поради липса на възможност да се определят ъглите на ставите по друг начин.

Всички *D-H параметри* на изследвания робот, които се използват в изчисленията, са показани в *табл. 47*.

В геометричния метод за решаването на обратната задача за реинженерирания робот - ъглите на трансформация на отделните стави се пресмятат в следната последователност: θ_1, θ_3, θ_2, θ_5, θ_4, θ_6.

От проекцията на K_4 върху равнината X_0-Y_0 на основната координатна система K_0 се изчислява ъгълът θ_1. За целта първо се определя разположението на K_4. Кинематичната схема на изследвания робот е разработена с три въртящи двоици, които не променят позицията, а само ориентацията на съседните звена – K_1, K_4 и K_6 (*A1*, *A4* и *A6*). От това следва, че ъгловото положение на K_6 ориентира крайния ефектор, без да оказва влияние върху позицията му. Използвайки векторната репрезентация за геометричното разположение на звената K_4 и K_6, получаваме:

$$\vec{p}_{46} = d_6 \cdot \vec{n}.$$

Векторът $\vec{n}$ насочен към *ос z* на K_6, замества ротационната матрица в третата колона на трансформационната матрица ${}^0_6T$:

$$\vec{p}_{04} = \vec{p} - \vec{p}_{46} = \vec{p} - d_6 \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} p_{04_x} \\ p_{04_y} \\ p_{04_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 n_x \\ p_y - d_6 n_y \\ p_z - d_6 n_z \end{bmatrix}.$$

Използвайки тази зависимост се изчислява θ_1 с формулата:

$$\theta_1 = Atan2\left(p_{04_y}, p_{04_x}\right) + \pi n,$$

където $n = -1, 0, 1$.

Изчисляваме Векторът $\vec{p}_{14}$ се изчислява по същия модел. Позицията на вектора $\vec{p}_{01}$ се взима от транслационната част на трансформационната матрица ${}^0_1T$:

$$\vec{p}_{14} = \vec{p}_{04} - \vec{p}_{01} = \begin{bmatrix} p_x - d_6 n_x \\ p_y - d_6 n_y \\ p_z - d_6 n_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_1 \cos\theta_1 \\ a_1 \sin\theta_1 \\ d_1 \end{bmatrix}$$

Тъй като сумата от ъглите на триъгълника $K_2K_3K_4$ е равна на $180°$, се получава:

$a)\ \gamma = 180° - \omega - (180° - \varphi) = \varphi - \omega,$

$b)\ \gamma = \varphi + \omega.$

Изчислява се ъгълът φ от косинусовата теорема:

$$\varphi = Acos(\frac{{a_2}^2 + {l_4}^2 - |\vec{p}_{14}|^2}{2a_2 l_4}).$$

Изчислява се ъгълът ω по следната зависимост:

$$\omega = Atan2(a_3, d_4).$$

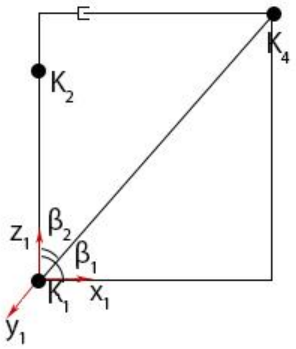
Според стойността на γ се получават две възможни решения за θ_3:

1) $\theta_3 = n(180° - (\varphi - \omega))$,

2) $\theta_3 = n(180° - (\varphi + \omega))$,

където $n = -1, 1$.

За определянето на ъгъла θ_2 се използват ъглите β_1 и β_2, които се получават от вектора $\vec{p}_{14}$ (*фиг. 230*).



Фиг. 230 Изчисляване на θ_2

Изчисляването на θ_2 се извършва чрез трансформация на $\vec{p}_{14}$ от K_0 до K_1, използвайки инверсията на ротационната матрица ${}^0_1\boldsymbol{R}$, част от трансформационната матрица ${}^0_1T$.

$$\vec{p}^{(1)}_{14} = ({}^0_1\boldsymbol{R})^{-1} \cdot \vec{p}_{14}.$$

Ротационната матрица ${}^0_1\boldsymbol{R}$ е ортогонална, следователно:

$$({}^0_1\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_1\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \rightarrow ({}^0_1\boldsymbol{R})^{-1} = ({}^0_1\boldsymbol{R})^T.$$

За β_1 и β_2 имаме:

$$\beta_1 = Atan2(\vec{p}^{(1)}_{14\ y}, \vec{p}^{(1)}_{14\ x}),$$

$$\beta_2 = Acos(\frac{{a_2}^2 + |\vec{p}_{14}|^2 - {l_4}^2}{2a_2|\vec{p}_{14}|}).$$

След извършените изчисления се получават две възможности за θ_2:

1) $\theta_2 = n(\beta_1 + \beta_2)$,

2) $\theta_2 = n(\beta_1 - \beta_2)$,

където $n = -1, 1$.

Определянето на θ_5 се извършва, чрез скаларното произведение на ненулевите вектори $\vec{n}$ и $\vec{z}_3$.

$$\vec{z}_3 \cdot \vec{n} = |\vec{z}_3| \cdot |\vec{n}| \cdot \cos\theta_5,$$

$$\theta_5 = Acos(\vec{z}_3 \cdot \vec{n}).$$

Ориентацията на вектора $\vec{z}_3$ се взима от ротационната матрица, част от трансформационната матрица ${}^0_4T$, която се изчислява от ъглите θ_1, θ_2 и θ_3. Векторът $\vec{z}_3$ се получава от третата колона на матрицата ${}^0_4\boldsymbol{R}$.

За ъгъла θ_5 се получават следните възможни решения:

1) $\theta_5 = z_{3_x}n_x + z_{3_y}n_y + z_{3_z}n_z$,

2) $\theta_5 = -(z_{3_x}n_x + z_{3_y}n_y + z_{3_z}n_z)$.

За пълната ротация се изчислява:

${}^0_6\boldsymbol{R} = {}^0_3\boldsymbol{R} \cdot {}^3_6\boldsymbol{R} \rightarrow {}^3_6\boldsymbol{R} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^{-1} \cdot {}^0_6\boldsymbol{R}$.

Матрицата $\boldsymbol{R}$ е ортогонална, съответно:

$({}^0_3\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_3\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \rightarrow ({}^0_3\boldsymbol{R})^{-1} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^T$.

От изведените зависимости получаваме:

$$ {}^3_6\boldsymbol{R} = ({}^0_3\boldsymbol{R})^T \cdot {}^0_6\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -s_4c_6 - c_4c_5s_6 & -c_4s_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4s_6 & c_4c_6 - s_4c_5s_6 & -s_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, $$

където $s_i = \sin\theta_i$, $c_i = \cos\theta_i$.

За ротационната матрица ${}^3_6\boldsymbol{R}$ се изчисляват следните уравнения:

$$\begin{cases} -s_4s_5 = r_{23} \\ -c_4s_5 = r_{13}, \end{cases}$$

откъдето получаваме:

$$\tan\theta_4 = \frac{r_{23}}{r_{13}}$$

Стойността на θ_4 се изчислява от:

$$\theta_4 = Atan2(r_{23}, r_{13}) + \pi n,$$

където $n = -2, -1, 0, 1, 2$.

Идентично като θ_4 се намира решението за θ_6:

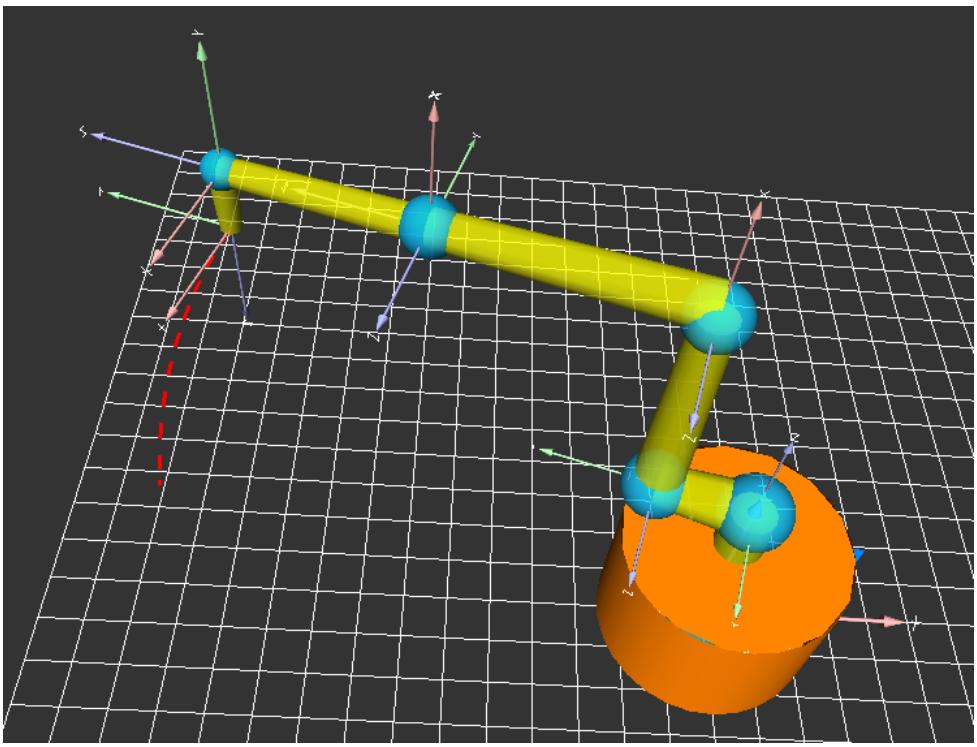
$$\tan\theta_6 = \frac{-r_{32}}{r_{31}}$$

За ъгъл θ_6 се получава:

$$\theta_6 = Atan2(-r_{32}, r_{31}) + \pi n$$

където $n = -2, -1, 0, 1, 2$.

За проектиране на работните движения е изготвен параметричен модел на функционално действащия лабораторен модел на реинженерания робот *KUKA KR 150* (*фиг. 231*), използвайки *D-H параметрите* от *табл. 44* за описване на формата и разположението на отделните звена и връзки. Движенията на изследвания робот могат да бъдат описани, чрез векторно-матрични методи с транслационни, ротационни и трансформационни матрици, постигайки визуализация на трансформацията на релативно свързаните координатни системи на съответните звена на робота, използвайки *D-H параметрите* за количествен израз на отделните премествания.



Фиг. 231 Параметричен модел с *D-H параметри* на схемата на функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

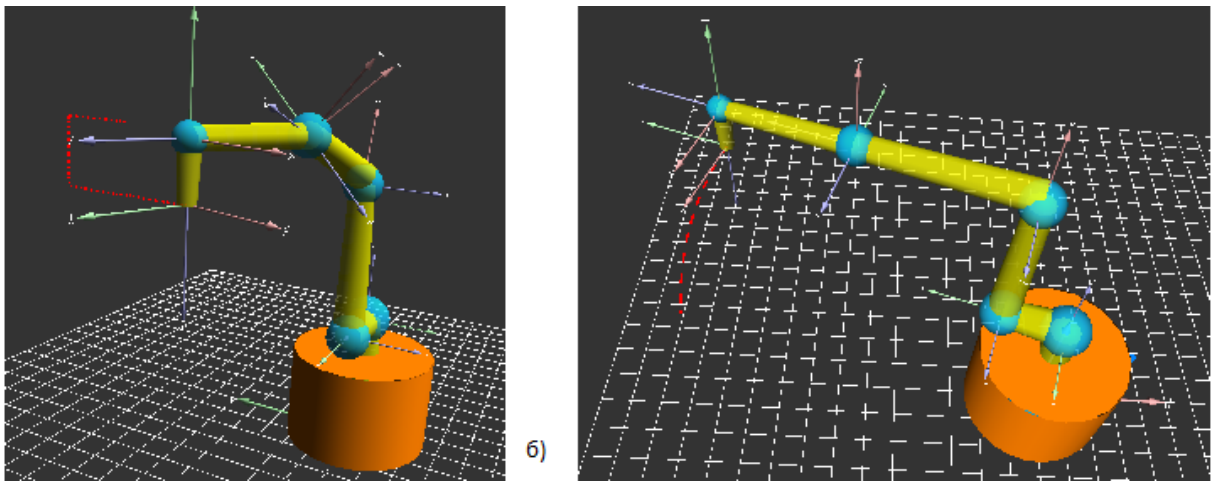
Проверка на кинематичните параметри на реинженирания робот

При проверката на кинематичните параметри на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR 150*, са апробирани следните методи за управление на движенията на крайния ефектор:

- управление по зададени реперни точки от траекторията - този класически метод за целево движение при задаване на краен брой реперни точки, е апробиран в два варианта – линеен (*фиг. 232а*) и нелинеен (*фиг. 232б*). Въвеждането и запаметяването на координатите в пространството на реперните точки става ръчно, след като операторът е придвижил робота до желаната позиция;
- управление по програмирана траектория - при това управление контролерът изчислява траекторията по зададени две крайни точки и допълнителни рестрикции. При изчисляването на траекторията се определят скоростта и посоката на въртене на всеки двигател, така че двигателите въртят едновременно от стартирането на движението до достигането до целта, т. е. необходимото движение по всяка от осите се извършва за едно и също време.

При проверката са направени следните изводи:

- управлението от точка до точка е по-лесно за програмиране и е достатъчно ефективно при реализиране на сравнително прости движения на крайния ефектор в пространството при малък брой точки, каквито са повечето от предвидените движения на робота;
- траекторното управление е значително по-трудно за програмиране и бе постигнато при по-голяма изчислителна мощност на контролера и при по-голямо бързодействие на задвижващата система на робота в реално време.



Фиг. 232 Управление от точка до точка на функционално действащия лабораторен модел на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*
а) линеен вариант б) нелинеен вариант

Планиране на закони на движение по всяка една от задвижваните оси или координати на крайния ефектор

При управление на различни мехатронни устройства, в частност на промишлени роботи, какъвто е функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания в настоящия проект робот *KUKA KR 150*, една от основните задачи за правилното им функциониране е подборът на подходящи закони за движение на работните им органи, респективно на математични функции, които да описват такива закони на движение по всяка една от осите или координатите на крайния ефектор, които да удовлетворяват желани кинематични характеристики на целевото движение.

Характерни математични функции се използват за синтез на законите на движение на задвижваните оси или координати на крайните ефектори на роботите [40]. Изследвани са различни степенни [50] и тригонометрични полиноми [40].

Във връзка с настоящите изследвания бяха съставени степенно-тригонометрични полиноми [41] с оглед на използването им при планиране на закони на движение по всяка една от осите на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR 150*. Фамилията от степенни, тригонометрични и степенно-тригонометрични полиноми дава възможността да подбере най-целесъобразния за конкретния случай полином, по който да опише закон на движение с желани геометрични, кинематични и динамични характеристики. Специално внимание се отделя на движения, при които едно от задължителните условия е анулирането на скоростите и ускоренията в началото и в края на преместването на крайния ефектор на механичната система.

Нормирани степенно-тригонометрични полиноми

Нека фамилия от степенно-тригонометрични полиноми се представи като сума от степенни и синусоидални функции:

$$u(\xi)=\sum_i a_i\xi^i+\sum_j b_j\sin(j\pi\xi+\alpha)\ , \tag{1}$$

с аргумент $\xi\in[0;1]$, като i и j са положителни цели или нецели числа.

Полиномът (1) и неговите производни:

$$u'(\xi)=\sum_i ia_i\xi^{i-1}+\pi\sum_j jb_j\cos(j\pi\xi+\alpha)\,, \tag{2}$$

$$u''(\xi)=\sum_i i(i-1)a_i\xi^{i-2}-\pi^2\sum_j j^2b_j\sin(j\pi\xi+\alpha)\,, \tag{3}$$

(4) $$u'''(\xi)=\sum_i i(i-1)(i-2)a_i\xi^{i-3}-\pi^3\sum_j j^3 b_j\cos(j\pi\xi+\alpha),$$

при $i=1$, $j=2$ и $\alpha=0$ добиват вида

(5) $$u(\xi)=a_1\xi+b_2\sin(2\pi\xi),$$

(6) $$u'(\xi)=a_1+2\pi b_2\cos(2\pi\xi),$$

(7) $$u''(\xi)=-4\pi^2 b_2\sin(2\pi\xi),$$

(8) $$u'''(\xi)=-8\pi^3 b_2\sin(2\pi\xi),$$

откъдето при гранични условия $u=u'=u''=0$ при $\xi=0$ и $u=1$, $u'=u'''=0$ при $\xi=1$ се получава $a_1=1, b_2=-(2\pi)^{-1}$ и съответни нормирани функции (*фиг. 233*):

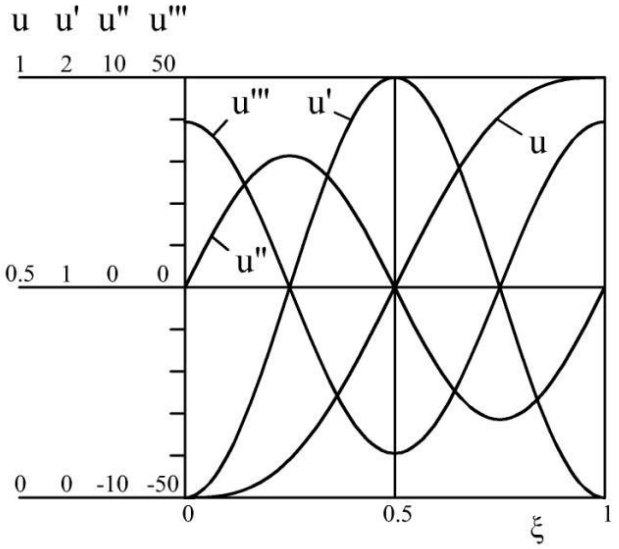
(9) $$u(\xi)=\xi-\frac{1}{2\pi}\sin(2\pi\xi),$$

(10) $$u'(\xi)=1-\cos(2\pi\xi),$$

(11) $$u''(\xi)=2\pi\sin(2\pi\xi),$$

(12) $$u'''(\xi)=4\pi^2\cos(2\pi\xi),$$

от които (9) представлява ***наклонена синусоида***, известна още като ***циклоиден закон.***



Фиг. 233 Графика със зависимостите от функциите (9), (10), (11) и (12)

Максималната стойност $u'_{\max}=2$ се получава при $\xi=0.5$, а екстремните стойности $u''_{ex}=\pm 2\pi$ на втората производна - съответно при $\xi=0.25$ и $\xi=0.75$. Екстремните стойности $u'''_{ex}=\pm 39.4784$ на третата производна се получават при $\xi=0;\ 0.5;\ 1$.

Същите функции (9) и (10) ще се получат, ако се зададе една от най-използваните синусоидални функции (11) за втората производна, известна като аналог на ускоренията, след което (11) се интегрира два пъти с отчитане на граничните условия $u=u'=0$ при $\xi=0$ и $u=1, u'=0$ при $\xi=1$.

Характерно за $u''(\xi)=2\pi\sin(2\pi\xi)$ са нулевите стойности в началото и в края на нормирания интервал на аргумента $\xi\in[0;1]$, което е благоприятно по отношение на инерционното натоварване, тъй като производната (11) кореспондира с целевото ускорение.

Функциите (9), (10), (11) и (12) заемат междинни стойности в сравнение със съответни степенни полиноми [4] при $j=3;\ 4;\ 5$ и $j=4;\ 5;\ 6;\ 7$, но само при последния се нулира

третата производна u''' (аналог на вторите ускорения) за границите на $\xi \in [0;1]$, което обуславя още по-добри динамични характеристики на целевото движение.

Споменатият благоприятен ефект, който допуска използването на висококоростно целево движение, може да се постигне, ако в полином (1) се положи $i=1$, $j=2;4$ и $\alpha=0$:

(13) $$u(\xi)=a_1\xi+b_2\sin(2\pi\xi)+b_4\sin(4\pi\xi),$$

(14) $$u'(\xi)=a_1+2\pi b_2\cos(2\pi\xi)+4\pi b_4\cos(4\pi\xi),$$

(15) $$u''(\xi)=-4\pi^2 b_2\sin(2\pi\xi)-16\pi^2 b_4\sin(4\pi\xi),$$

(16) $$u'''(\xi)=-8\pi^3 b_2\cos(2\pi\xi)-64\pi^3 b_4\cos(4\pi\xi).$$

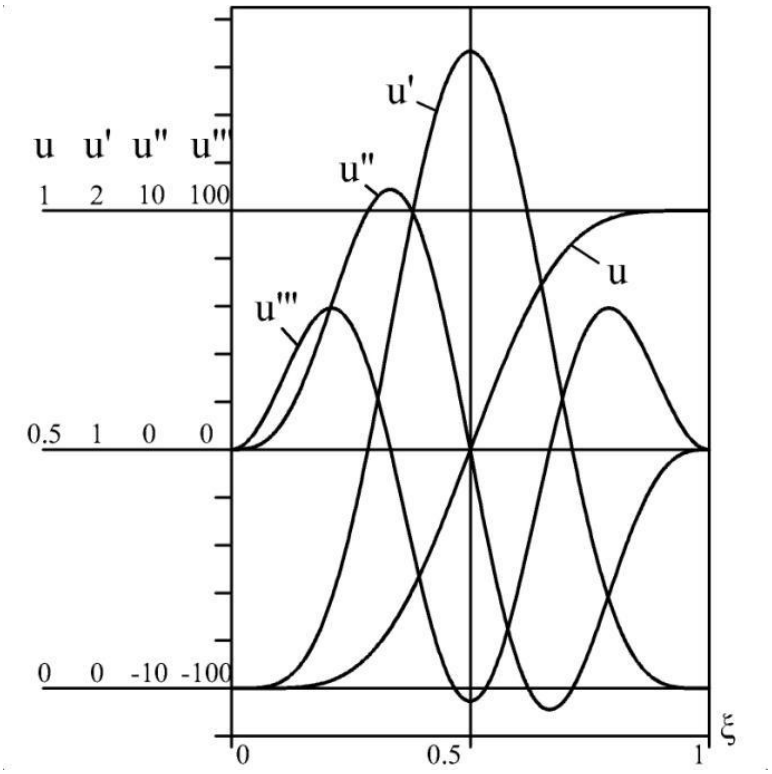
При гранични условия $u=u'=u''=u'''=0$ при $\xi=0$ и $u'=u''=u''=0$ при $\xi=1$ се получава $a_1=1, b_2=-\frac{2}{3\pi}, b_4=\frac{1}{12\pi}$ и съответни нормирани функции (*фиг. 234*):

(17) $$u(\xi)=\xi-\frac{2}{3\pi}\sin(2\pi\xi)+\frac{1}{12\pi}\sin(4\pi\xi),$$

(18) $$u'(\xi)=1-\frac{1}{3}[4\cos(2\pi\xi)-\cos(4\pi\xi)],$$

(19) $$u''(\xi)=\frac{4\pi}{3}[2\sin(2\pi\xi)-\sin(4\pi\xi)],$$

(20) $$u'''(\xi)=\frac{16\pi^2}{3}[\cos(2\pi\xi)-\cos(4\pi\xi)].$$



Фиг. 234 Графика със зависимостите от функциите (17), (18) (19) и (20)

Максималната стойност $u'_{\max}=2.667$ се получава при $\xi=0.5$, а екстремните стойности $u''_{ex}=\pm 10,8827$ на втората производна - съответно при $\xi=1/3$ и $\xi=2/3$. Максимална стойност $u'''_{\max}=59.2175$ на третата производна се получава при $\xi=0.20978;\ 0.79022$, а минимална стойност $u'''_{\min}=-105.250$ - при $\xi=0.5$.

Спазването на закон на движение, базиран на функция (17) и нейните производни, води до изключително плавно потегляне и спиране на крайния ефектор, поради факта, че дори четвъртата производна:

$$u^{(4)}(\xi)=\frac{32\pi^3}{3}[2\sin(4\pi\xi)-\sin(2\pi\xi)]$$

се анулира за границите на интервала $\xi\in[0;1]$.

Един от обикновените степенни нормирани полиноми

(21) $u(\xi)=3\xi^2-2\xi^3$

има производни:

(22) $u'(\xi)=6\xi-6\xi^2$,

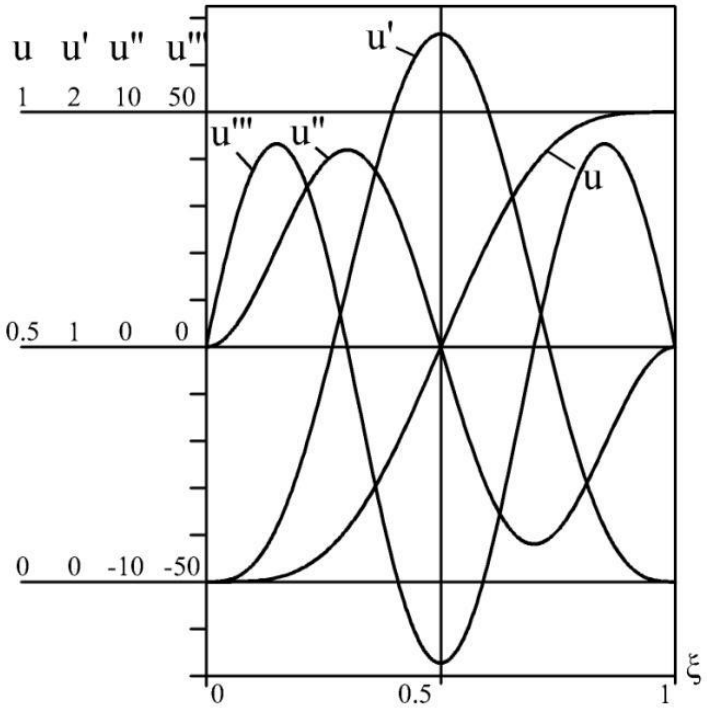
(23) $u''(\xi)=6-12\xi$ $(u'''=-12)$,

които кореспондират с целевата скорост и ускорение. Използването му за съставяне на закон на движение при високи скорости на крайния ефектор не се препоръчва, тъй като за границите на $\xi\in[0;1]$ $u''=\pm 6$, т.е. налице е краен скок на ускорението, респективно на инерционното натоварване. Този скок, както и безкрайният скок на u''' за границите на $\xi\in[0;1]$ могат да се избегнат, ако към (23) се внесе тригонометричната функция $b\sin(j\pi\xi+\alpha)$. Получава се:

(24) $u''(\xi)=6-12\xi+b\sin(j\pi\xi+\alpha)$

с производна:

(25) $u'''(\xi)=-12+bj\pi\cos(j\pi\xi+\alpha)$.



Фиг. 235 Графика със зависимостите от функциите (24), (25), (26) и (27) при $b=6.1476$, $j=2.8606$ **и** $\alpha=-77.453°$

След двукратно интегриране на (22) при гранични условия $u=u'=0$ при $\xi=0$ и $u'=0;\ u=1$ при $\xi=1$ се получава:

(26) $u'(\xi)=6\xi(1-\xi)+\frac{b}{\pi j}[\cos\alpha-\cos(j\pi\xi+\alpha)]$,

(27) $$u(\xi)=\xi^2(3-2\xi)-\frac{b}{(\pi j)^2}[\sin(j\pi\xi+\alpha)-\sin\alpha]+\frac{b\cos\alpha}{\pi j}\xi\,.$$

От системата трансцендентни уравнения:

(28) $u''(\xi=0)=6+b\sin\alpha=0$,

(29) $u''(\xi=0.5)=-b\sin(j\pi/2+\alpha)=0$,

(30) $u'''(\xi=0)=-12+bj\pi\cos\alpha=0$.

се определят неизвестните $b=6.1476$, $j=2.8606$ и $\alpha=-77.453°$. Заместени в (24), (25), (26) и (27) се получават резултати, представени на *фиг. 235*.

Максималната стойност $u'_{\max}=2.3327$ се получава при $\xi=0.5$, а екстремните стойности $u''_{ex}=\pm 8,3898$ на втората производна - съответно при $\xi=0.30085$ и $\xi=0.69915$. Максималната стойност $u'''_{\max}=43.2475$ на третата производна се получава при $\xi=0.15042;\ 0.84958$, а минималната стойност $u'''_{\min}=-67.2475$ - при $\xi=0.5$.

Сравнение на характерни стойности на производните на функциите (9), (17) и (27) може е показано в *табл. 45*:

Таблица 45 Сравнение на характерни стойности на производните на функциите (9), (17) и (27)

Функции	**(9)**	**(17)**	**(27)**
u'_{max}	2	2.667	2.333
$u''_{\max}$	2π	10.882	8.390
$u''_{\min}$	-2π	-10.882	-8.390
$u'''_{\max}$	39.478	59.217	43.248
$u'''_{\min}$	-39.478	-105.250	-67.248

Степенно-тригонометрични закони на движение

Всяка входна или изходна координата η може да се опише като сума от начална стойност η_0 и нормиран полином $u(\xi)$, умножен по множител, равен на максималната промяна $\Delta\eta_{\max}$ на η:

(31) $$\eta=\eta_0+\Delta\eta_{\max}.u(\xi)\,,$$

Аргументът ξ се замества с отношението $\xi=t/T$, където t е текущо време в интервала на периода T за реализиране на $\Delta\eta_{\max}$. Скоростта $\dot\eta$, ускорението $\ddot\eta$ и второто ускорение (пулса) $\dddot\eta$ по координата η кореспондират съответно на производните u', u'', u''':

(32) $$\dot\eta=\frac{\Delta\eta_{\max}}{T}.u'(\xi)\,,$$

(33) $$\ddot\eta=\frac{\Delta\eta_{\max}}{T^2}.u''(\xi)\,,$$

(34) $$\dddot\eta=\frac{\Delta\eta_{\max}}{T^3}.u'''(\xi)\,.$$

Очевидно кинематичните характеристики се различават от геометричните производни само с един множител $\Delta\eta_{\max}/T^n$, при който $n=1,\ 2,\ 3$ се определя от реда на производната.

При избор на нормиран полином за описване на движението по определена координата се изхожда от условия за анулиране на производни на полинома $u(\xi)$ за границите на интервала $\xi \in [0;\ 1]$.

Производните u', u'', u''' на синтезираните степенно-тригонометрични полиноми и на съответните кинематични характеристики се анулират за границите на интервала $\xi \in [0;\ 1]$ с изключение на третата производна (12) на функцията (9). Полиномите (17) и (27) гарантират не само анулиране на инерционното натоварване, но и на промяната на инерционното натоварване (без скок) за границите на ξ. Това снижава трептенията на механичната система. Допълнително снижаване може да се получи при закон на движение (17), тъй като се анулира и четвъртата му производна за границите на интервала $\xi \in [0;\ 1]$.

Примерна апробация

Определен е законът на движение по координатата η при следните данни: $T = 3\,s$ и условия за анулиране на $\dot{\eta} = \ddot{\eta} = \dddot{\eta} = 0$ за границите на зададения интервал $\eta \in [\eta_0 = 0;\ 1350\ mm]$.

Така поставените условия удовлетворяват полиномите (17) и (27). Последният има предимство пред полином (17) по отношение на екстремните стойности на първите три производни (*табл. 48*), свързани линейно, съответно с целеви кинематични характеристики - скорост, ускорение и неговата производна.

При зададеното условие и определените стойности на параметрите $j = 2.8606,\ b = 6.1476$ и $\alpha = -77.453°$ на функциите (24) и (27), кинематичните характеристики (31), (32), (33) и (34) се конкретизират във вида:

(31a) $\eta = 1350\left\{\xi^2(3-2\xi) - 0.0761[\sin(514.908°\xi - 77.453°) + 0.9761] + 0.1486\xi\right\}$,

(32a) $\dot{\eta} = 450\left\{6\xi(1-\xi) + 0.6847[\cos 77.453° - \cos(514.908°\xi - 77.453°)]\right\}$,

(33a) $\ddot{\eta} = 150[6 - 12\xi + 6.1476\sin(514.908°\xi - 77.453°)]$,

(34a) $\dddot{\eta} = 50[-12 + 55.2475\cos(514.908°\xi - 77.453°)]$.

Очевидно за границите на интервала $t \in [0;\ 3\ s]$ производните $\dot{\eta}$, $\ddot{\eta}$ и $\dddot{\eta}$ се анулират, с което условията на поставената задача са изпълнени.

Максималната стойност $\dot{\eta}_{\max} = 1.258\ m/s$ на скоростта се получава в средата на интервала $t \in [0;\ 3\ s]$ при $t = 1.5\,s$. Екстремните стойности $\ddot{\eta}_{ex} = \pm 1.258\ m/s^2$ на ускорението се получават съответно при $t = 0.9026\,s;\ 2.0974\ s$. Второто ускорение (пулса) има следните екстремни стойности: $\dddot{\eta}_{\max} = 2.162\,m/s^3$ при $t = 0.4513\,s;\ 2.5487\ s$ и $\dddot{\eta}_{\min} = -3.362\ m/s^3$ при $t = 1.5\,s$.

Въведената фамилия от степенно-тригонометрични полиноми разкри нови по-добри възможности за планиране на подходящи закони на движение на работните органи на механизми, машини и роботи:

1. Съставените степенно-тригонометрични полиноми дават възможност за анулиране на скоростите и ускоренията за границите на интервалите на преместване по всяка една от осите или координатите на крайния ефектор на робота, което води до снижаване на трептенията.
2. Сравнителният анализ на синтезираните степенно-тригонометрични полиноми по отношение на екстремните стойности на техните производни, съответно на скоростите и ускоренията, дава възможност за правилен избор на полином съобразно конкретната целева задача.

3. Посочената възможност за синтез на степенно-тригонометрични закони на движение, при които се анулират и третите производни за границите на интервалите на преместването по дадена координата на крайния ефектор, допълнително снижава трептенията на механичната система.

Апробираните възможности за използване на теоретично получените резултати дадоха очакваните резултати.

4.6. Проверка на динамичните характеристики на ИУР

Индустриалните роботизирани системи имат сложна динамика заради фактори като: гравитация, триене (сухо и вискозно), еластичност, хистерезис и други нелинейности в задвижването. Параметрите, които описват динамиката често са много трудни или невъзможни да се определят с необходимата точност. Динамичното поведение на роботизираните системи зависи от: правилното моделиране на роботите, точността на параметричната им идентификация, устойчивостта и оптималността на контролерите за управлението на роботизираната система. Не винаги прилагайки традиционните методи за моделиране, идентификация и управление, могат да се удовлетворят непрекъснато растящите изисквания за точност, бързина и енергийна ефективност. Дейностите по тези методи са взаимосвързани и трябва да се извършват паралелно, за да се намери оптимално решение за изразходването на труд, средства и време.

В текущата разработка е представено изследване на динамичен модел за манипулационни *РС*. Като типичен техен представител е разгледан избраният модел, изследван тук – универсален индустриален робот *KUKA KR 150* с шест степени на свобода. Основната функция на такива *РС* е да могат да преминават от една конфигурация в друга, затова от особена важност за тях е да могат да бъдат управлявани прецизно, по всяка една от осите, с помощта на децентрализирани контролери.

Съставени са структурите на почти пълни динамични модели, които бяха подходящи и за постигане на двете цели: точна идентификация на параметрите и оптимално проектиране на управлението. Описанието им е дадено в долните редове от настоящия отчет.

Структура на динамичния модел

Определен е набор от променливи *q*, които най-добре характеризират динамичните показатели на функционално действащия лабораторен модел на избрания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* в търсеното задание за движение. Променливите са независими една от друга, като броят им е равен на действителния брой на степените на свобода. За да се даде възможност на *ИУР* да изпълни необходимите задания за движение, съответните задвижващи усилия *u* (управленията), трябва да бъдат правилно определени.

Прилагайки формализма на Лагранж, динамичното поведение се описва, чрез следната система от диференциални уравнения:

(1) $M(q)\ddot{q}=F-v(q,\dot{q})-g(q)$,

където $M(q)$ *– инерционна матрица,* $v(q,\dot{q})$ *- центробежни и Кориолисови сили,* $g(q)$ *– гравитационни сили, F - вектор на задвижващите сили/моменти.*

В практиката се използва следният опростен модел за двигателите:

(2) $F_i = -m_i\ddot{q}_i - c_i\dot{q}_i + g_i u_i$, $i = 1...n$,

с коефициенти, определящи физическите характеристики на двигателите.

Според формализма на Лагранж и втория закон на Нютон при ротация се използва:

$$I\ddot{\theta} = T$$

За съставяне на статични и динамични уравнения за механични системи, се използва принципът на виртуалната работа. Принципът обхваща система от уравнения, равна като брой на степените на свобода на изследваната механична система, в случая антропоморфен шестосен *ИУР*, с основна цел да се опише със системен подход движенията на системата (робота). Прилагайки принципа на виртуалните работи, получаваме следната система от уравнения:

$\delta W_{ineriaforces} = \delta W_{appliedforces}$,

$r = r(q,t)$, q – *генерализирани координати* - за ъглите в ставите.

$$\delta W_{ineriaforces} = \int_V \rho \ddot{r}^T \delta r \, dV = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q} \delta q \, dV = (\int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q} dV)\delta q = Q^T_{inertiaforce} \delta q$$

$$Q^T_{inertiaforce} = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial r}{\partial q} dV = \int_V \rho \ddot{r}^T \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}} dV =$$

$$\int_V \rho \frac{d}{dt}(\dot{r}^T \frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}}) dV - \int_V \rho^T \dot{r}^T \frac{d}{dt}(\frac{\partial \dot{r}}{\partial \dot{q}}) dV =$$

$$\frac{d}{dt}(\int_V \rho \frac{\partial}{\partial \dot{q}}(\dot{r}^T \dot{r}) dV - \int_V \rho^T \dot{r}^T (\frac{\partial \dot{r}}{\partial q}) dV =$$

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}})^T - (\frac{\partial T}{\partial q})^T = Q^T_{activeforce},$$

$Q^T_{inertiaforce}, Q^T_{activeforce}$ - резултантни сили приложени в ставите

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}) - (\frac{\partial L}{\partial q}) = Q_{activeforce},$$

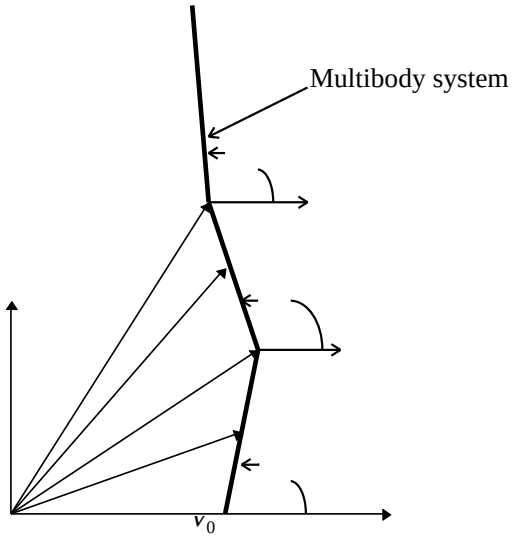
$L = T - U$,

$$A_i = \begin{bmatrix} \sin q_i & \cos q_i \\ -\cos q_i & \sin q_i \end{bmatrix},$$

$$\vec{r}_i = \vec{v}_{i-1} + A_i [0, r_i]^T,$$

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{i-1} + A_i [0, l_i]^T = \vec{v}_0 + \sum_{j=1}^{i} A_j [0, l_j]^T.$$

Пример за приложението на принципа на виртуалната работа за системата от взаимосвързаните второ и трето звено на *KUKA* е показан на *фиг. 236*.



Фиг. 236 Пример за приложението на принципа на виртуалната работа за системата от взаимосвързаните второ и трето звено на реинженерирания робот *KUKA KR-150*

За преместванията се използват уравенията:

$\vec{v}_0 = [x_0, y_0]^T$,

$\vec{r}_1 = [x_0 + r_1\cos q_1, y_0 + r_1\sin q_1]^T$, $\vec{v}_1 = [x_0 + l_1\cos q_1, y_0 + l_1\sin q_1]^T$,

$\vec{r}_2 = [x_0 + l_1\cos q_1 + r_2\cos q_2, y_0 + l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2]^T$,

откъдето след диференциране се получават следните уравнения за скоростите:

$\dot{\vec{r}}_1 = [-r_1\dot{q}_1\sin q_1, r_1\dot{q}_1\cos q_1]^T$,

$\dot{\vec{r}}_2 = [-l_1\dot{q}_1\sin q_1 - r_2\dot{q}_2\sin q_2, l_1\dot{q}_1\cos q_1 + r_2\dot{q}_2\cos q_2]^T$.

Прилагайки формализма на Лагранж се получава (*L=K–P)*:

$$L = 0.5m_1\{(r_1\dot{q}_1\sin q_1)^2 + (r_1\dot{q}_1\cos q_1)^2\} + 0.5I_1(\dot{q}_1)^2$$
$$+ 0.5m_2\{(l_1\dot{q}_1\sin q_1 + r_2\dot{q}_2\sin q_2)^2 + (l_1\dot{q}_1\cos q_1 + r_2\dot{q}_2\cos q_2)^2\} + 0.5I_2(\dot{q}_2)^2$$
$$- m_1 g r_1\sin q_1 - m_2 g(l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2),$$

$$L = 0.5m_1(r_1\dot{q}_1)^2 + 0.5I_1(\dot{q}_1)^2$$
$$+ 0.5m_2\{(l_1\dot{q}_1)^2 + (r_2\dot{q}_2)^2\} + m_2 l_1\dot{q}_1 r_2\dot{q}_2\cos(q_2 - q_1) + 0.5I_2(\dot{q}_2)^2$$
$$- m_1 g r_1\sin q_1 - m_2 g(l_1\sin q_1 + r_2\sin q_2).$$

Работата на външните сили W е:

$W = T_1 q_1 + T_2(q_2 - q_1)$.

С уравненията на Лагранж получаваме:

$$\frac{\partial}{\partial q_1}W = T_1 - T_2 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial\dot{q}_1}L\right) - \frac{\partial}{\partial q_1}L = \ddot{q}_1\{m_1(r_1)^2 + m_2(l_1)^2 + I_1\} + \ddot{q}_2 m_2 r_2 l_1\cos(q_2 - q_1)$$
$$- m_2 r_2 l_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_1)\dot{q}_2\sin(q_2 - q_1) + m_1 g r_1\cos q_1 + m_2 g l_1\cos q_1$$

$$\frac{\partial}{\partial q_2}W = T_2 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial}{\partial\dot{q}_2}L\right) - \frac{\partial}{\partial q_2}L = \ddot{q}_2\{m_2(r_2)^2 + I_2\} + \ddot{q}_1 m_2 r_2 l_1\cos(q_2 - q_1)$$
$$- m_2 r_2 l_1\dot{q}_1(\dot{q}_2 - \dot{q}_1)\sin(q_2 - q_1) + m_2 g r_2\cos q_2.$$

<u>Подход за идентификация на параметрите</u>

В настоящото изследване е използван детерминистичен подход за идентификация на параметрите. Процесът на идентифициране е по-прецизен и по-ефикасен, след оценка на параметрите стъпка по стъпка, в съответствие с реда на входно-изходните релации в изследвания *УР*: управляващ вход (напрежение или ток), задвижваща сила, ускорение, скорост и преместване. Така общото задание за идентификация се разделя на поредица от

няколко по-прости идентификационни задачи за динамичните модели *(1)* и *(2)*. Съответните процедури използват параметрите, определени в предходните стъпки и само един управляващ вход може да се прилага във всеки идентификационен тест. По този начин, номиналните модели се опростяват значително и грешките при идентификация могат да се намалят в максимална степен. Така предложеният подход позволява прецизно определяне на всички основни динамични параметри.

Особено важна роля в решаването на проблемите за оптимално проектиране на *УР* и тяхното управление играе предавателната матрица $A = M^{-1}$. Нейните елементи се определят от следните уравнения:

$$\begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ . \\ . \\ . \\ \ddot{q}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} \ldots A_{1k} \ldots A_{1n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ A_{n1} \ldots A_{nk} \ldots A_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ . \\ u_k \\ . \\ 0 \end{pmatrix}$$

Предлаганият подход за системна идентификация на *УР* е свързан с подход за директен синтез на управление, чрез самообучение при движения от точка до точка. Комбинацията между тези два подхода създава предпоставка за изграждане на методика за едновременно разглеждане на взаимосвързаните проблеми на динамичното моделиране, параметричната идентификация и оптималното управление.

4.7.Изследване на хардуерните решения на ИУР вследствие на извършения реинженеринг

В настоящата задача е изследван разработеният хардуер на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* което включваше изследване на динамичните характеристики на шестте оси на робота и неговия интерфейс и комуникационен модул.

За да бъдат достатъчно показателни и представителни в тези изследвания бяха включени характеристики на сервозадвижванията (серводвигателите комплект със сервоуправленията на фирма *„Електроинвент“ ЕООД*) на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, показващи тяхната работа при управлението на робота (резолвери вградени в серводвигателите и преобразуватели вградени в сервоуправлението). За целта беше удостоверено, че:

- сервозадвижванията осигуряват необходимата динамика, така че роботът да покрива всички изисквания към неговата функционалност;
- сервозадвижванията имат запас по максимален ток (възможност за по-голямо претоварване), което осигурява и гарантира постигането на високи динамични параметри при ускоряване и спиране, както и възможността за работа с по-голяма инерционна маса (по-голям товар);
- сервозадвижванията практически поддържат зададената позиция при промяна на натоварването и/или скоростта, което показва тяхната адекватна реакция, работейки с управление по позиция;
- е постигнато оптимално управление на шестте оси на робота, което позволява използването му за различни индустриални приложения.

Изследванията на сензорната система, комуникацията и интерфейсът на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* показаха, че функционират нормално и работят с достатъчно голяма за целта дискретност, точност и бързина.

Изследване на сервозадвижвания и сензори

Сервозадвижванията (серводвигателите комплект със сервоуправленията на фирма *„Електроинвент“ ЕООД*) бяха изследвани при работа на робота в реални условия. Реализирани са следните програми:

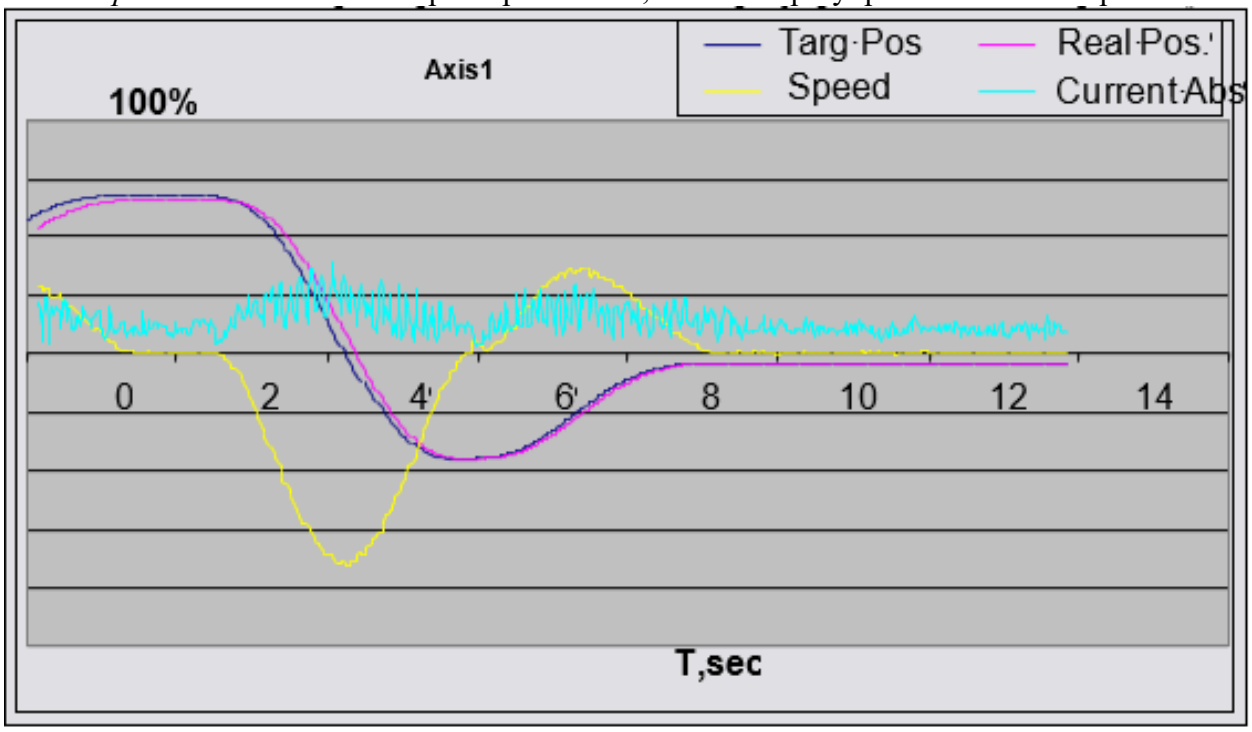
- управление (движение) на робота ос по ос;
- управление на всяка ос в режим на ускоряване и спиране при различни зададени скорости;
- реализиране на по-горе описания режим с различен темп на нарастване/намаляване на скоростта (различно ускорение);
- управление на всяка ос в режим на реверсиране (смяна посоката на въртене) при различни зададени скорости;
- режим на позициониране – движение на всяка ос до зададена позиция;
- режим на интерполация – движение на две или по-вече оси едновременно със зададени скорости и позиции;
- реализиране на S функция на скоростта, с промяна на настройките при нулева и зададена стойност на скоростта.

На фигурите по-долу са показани свалени графики за всяка от шестте оси на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150.*

Изобразените параметри на графиките и условията са:

- На всички графики са показани четири величини:
  - Зададена позиция в син цвят (Targ pos).
  - Реална позиция в лилав цвят (Real Pos).
  - Скорост на серводвигателя в жълт цвят (Speed).
  - Ток на серводвигателя в абсолютна стойност в светло син свят (Current Abs).
- По ос X е дефинирано времето, като всяко деление е 2 сек (T sec).
- Максимален размах по ос Y – 100% съответства на максимално допустимата стойност на съответната величина.

На *фиг. 237* са показани характеристиките, свалени при управлението на първа ос.



Фиг. 237 Характеристики на сервозадвижване по първа ос

От графиките на първа ос се вижда, че:

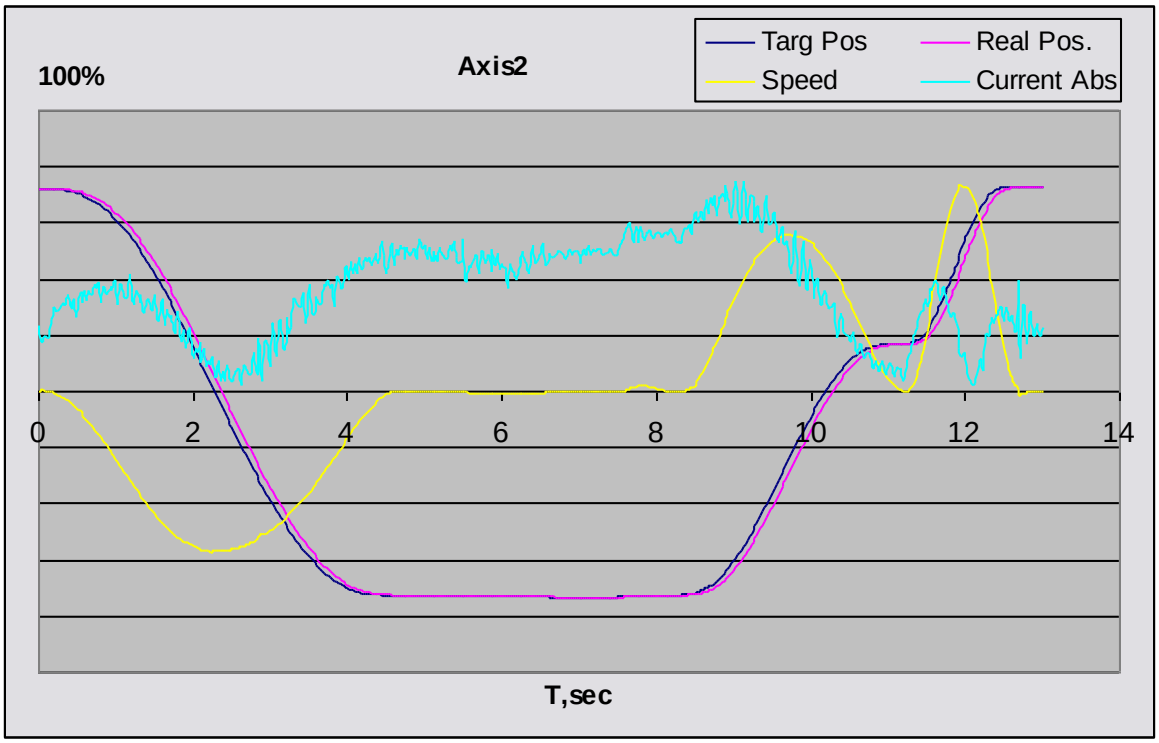
- при движение в посоката, в която товара реално натоварва първа ос, токът на двигателя е по-голям, а текущата позиция изостава от зададената позиция;
- при движение в посоката, в която товара реално съвпада с посоката на движението на оста, токът на двигателя е по-малък, а текущата позиция изпреварва зададената позиция;
- при постоянно движение (на много ниска скорост или на установена вече скорост), токът на серводвигателя е много малък (компенсират се механичните загуби), а зададената и текущата позиция практически съвпадат.

Изводи за сервоуправлението на първа ос:

- сервозадвижването по първа ос осигурява много добра динамика;
- има запас по ток на серводвигателя, което показва, че може още да се увеличи претоварването на двигателя в режимите на пускане и спиране, с цел постигане на по-висока динамика (ускорение);
- отклоненията на текущата от зададената позиции в динамични режими е пренебрежимо малка, а при нулева или близка до нулева скорост практически няма отклонения (текущата и зададената позиции съвпадат).

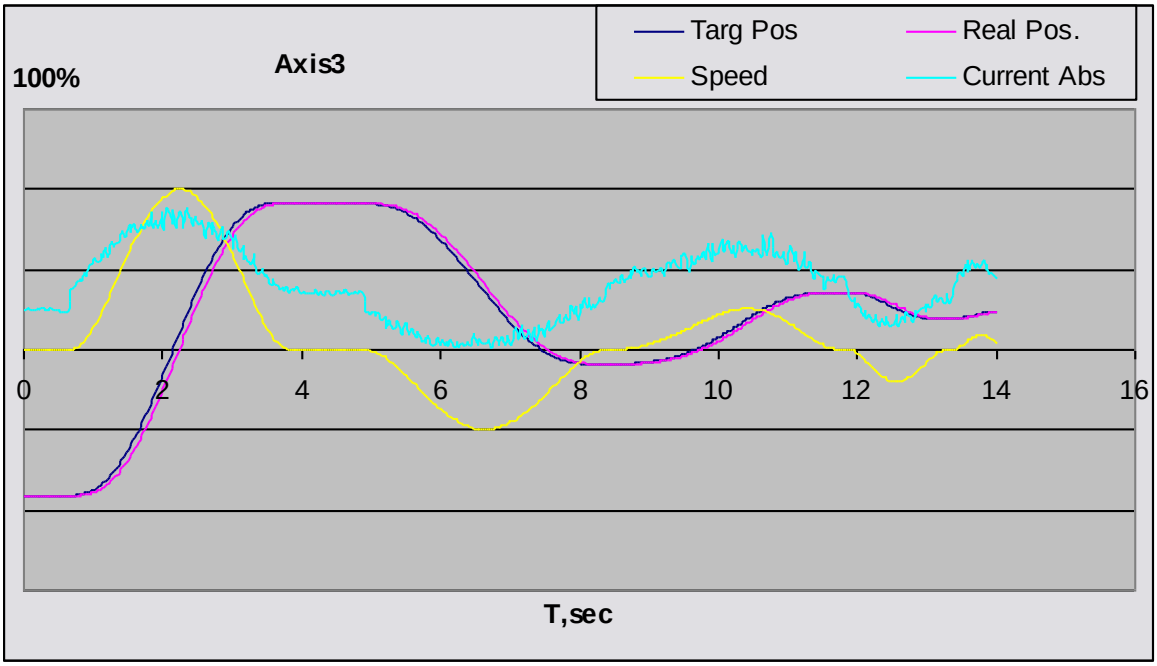
По-долу са показани характеристиките, показващи управлението на сервозадвижванията по втора, трета, четвърта, пета и шеста оси. Всички характеристики бяха свалени при аналогични условия, така че да могат да се оценят най-важните динамични и статични параметри, характеризиращи сервозадвижванията.

На *фиг. 238* са показани характеристиките свалени при управлението на втора ос.



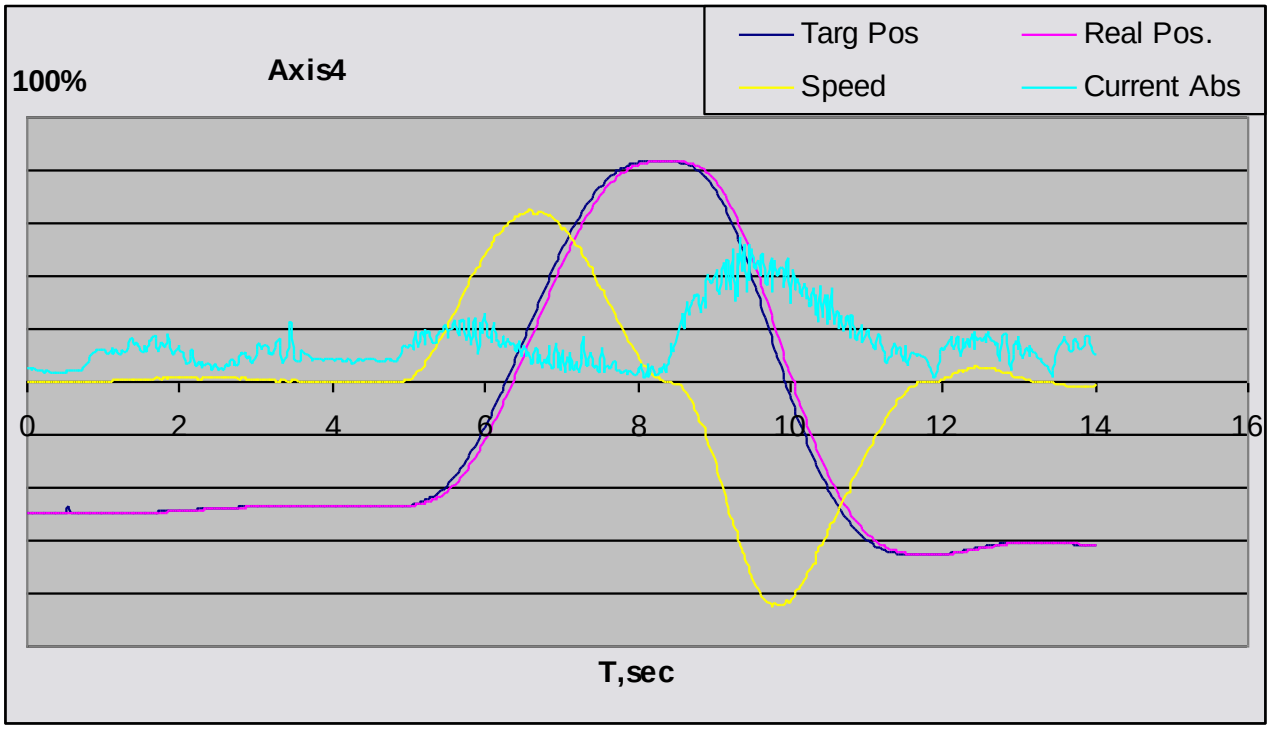
Фиг. 238 Характеристики на сервозадвижване по втора ос

На *фиг. 239* са показани характеристиките свалени при управлението на трета ос.



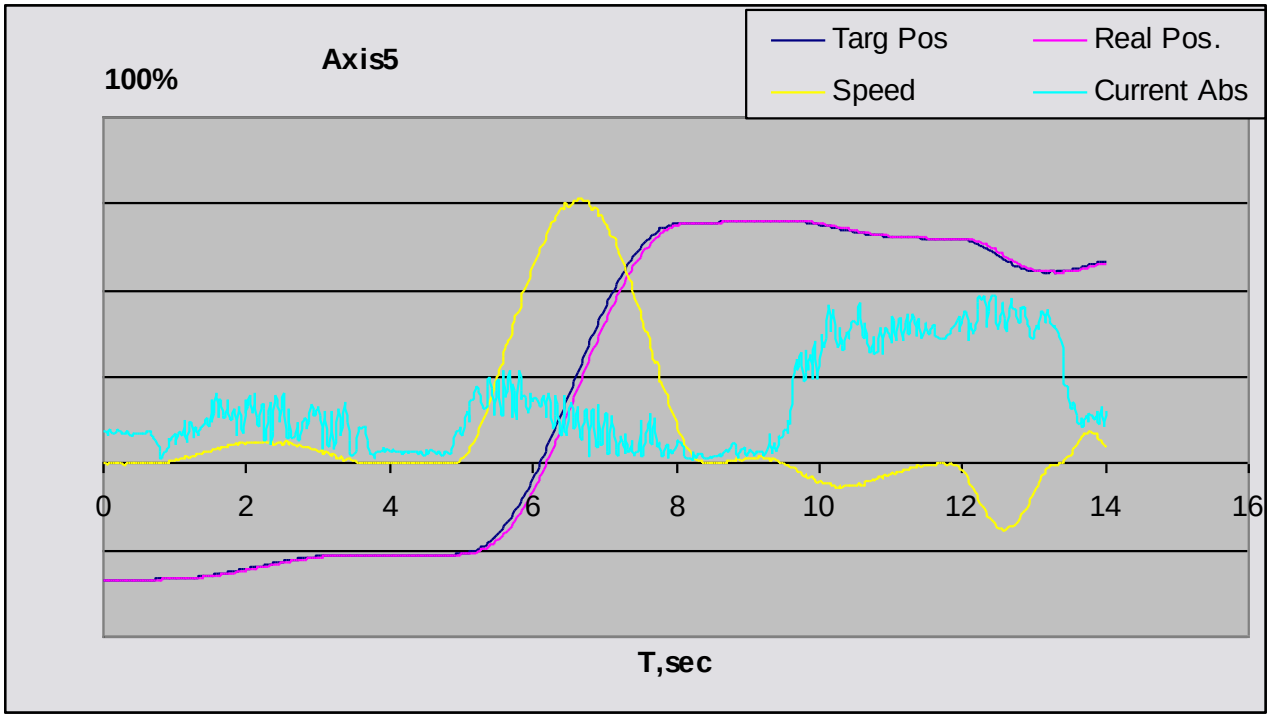
Фиг. 239 Характеристики на сервозадвижване по трета ос

На *фиг. 240* са показани характеристиките свалени при управлението на четвърта ос.



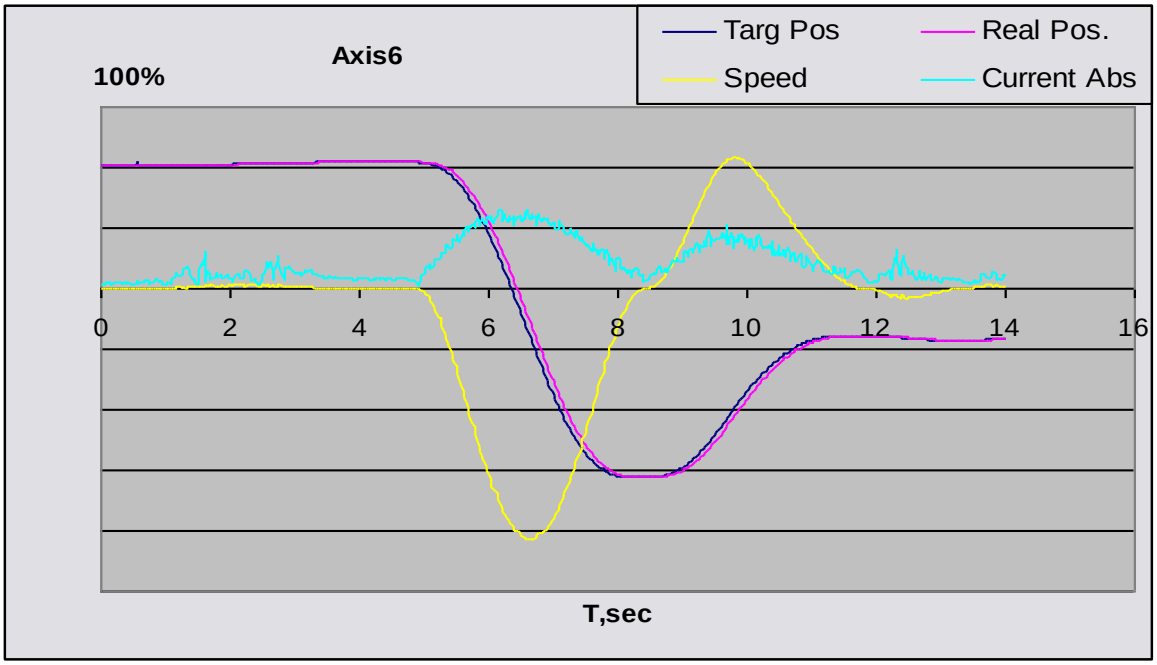
Фиг. 240 Характеристики на сервозадвижване по четвърта ос

На *фиг. 241* са показани характеристиките свалени при управлението на пета ос.



Фиг. 241 Характеристики на сервозадвижване по пета ос

На фиг. 241 са показани характеристиките свалени при управлението на шеста ос.



Фиг. 242 Характеристики на сервозадвижване по шеста ос

От направените изследвания за работата на сервозадвижванията (серводвигателите комплект със сервоуправленията на фирма *„Електроинвент“ ЕООД*) на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* и показаните характеристики, показващи работата на сервозадвижванията по шестте оси на робота, се направиха следните заключения относно сервозадвижванията и сензорите, използвани при управлението на робота (резолвери вградени в серводвигателите и преобразуватели вградени в сервоуправлението):

- сервозадвижванията осигуряват необходимата динамика, така че роботът да покрива всички изисквания към неговата функционалност;

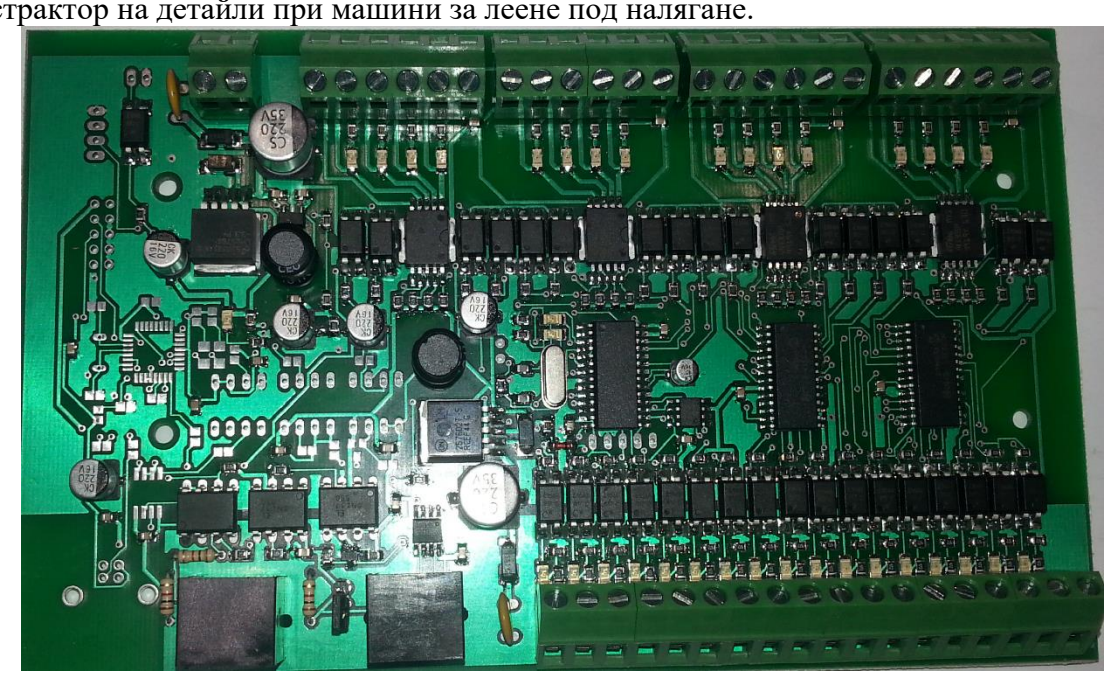
- сервозадвижванията имат запас по максимален ток (възможност за по-голямо претоварване), което осигурява и гарантира постигането на високи динамични параметри при ускоряване и спиране, както и възможността за работа с по-голяма инерционна маса (по-голям товар);
- сервозадвижванията практически поддържат зададената позиция при промяна на натоварването и/или скоростта, което показва тяхната адекватна реакция, работейки с управление по позиция;
- постигнато е оптимално управление на шестте оси на робота, което позволява използването му за различни индустриални приложения.

Сензорните системи реализирани, чрез вградените в серводвигателите резолвери и преобразуващата електроника (в сервоуправлението) осигуряват качествена и надежна работа на комплекта серводвигател – сервоуправление. Като се вземе предвид, че преобразуваният сигнал от резолверната система се използва като обратна връзка по скорост (от сервопреобразувателя) и се вземе информацията за системата за позициониране - с показаните резултати еднозначно се доказва, че резолверната система и нейното преобразуване функционират нормално и работят с достатъчно голяма за целта дискретност, точност и бързина. Направи се заключение, че системата за позициониране също изпълнява своята функционалност, като съществена роля имат резолверната система и преобразуването на сигнала за целите на сервозадвижването и позициониращата система. Работата на цялата система показва, че преобразуването на сигнала на резолверната система има висока степен на линейност, малки пулсации, голямо бързодействие и повтаряемост.

Изследване на интерфейса и комуникацията

Изключително важно условие за взаимодействие на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* с обкръжаващите го технологично необходими пасивни и активни уреди, манипулатори и машини, за осъществяване на процесите, е наличието на интерфейс за връзка с обкръжението.

За тази цел е предвиден входно-изходен цифров модул (*фиг. 243*), специално проектиран за реинженерирания робот и неговото ново индустриално предназначение, в ролята на екстрактор на детайли при машини за леене под налягане.



Фиг. 243 Входно-изходен цифров модул, предвиден за комуникация с периферни устройства

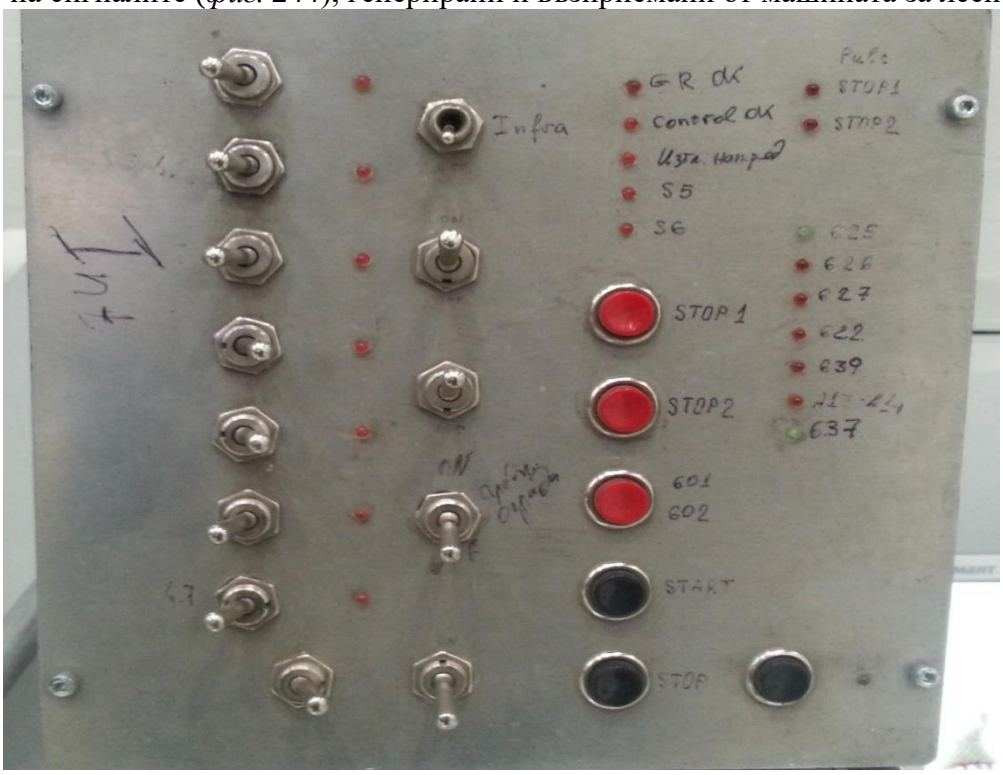
Специално за такова приложение съществува стандарт *DISPO 10* разработен от *VDMA*. Беше поставена задачата да се провери дали този интерфейс може да бъде заложен в реинженеринга на *ИУР* и ще бъде ли възможно неговото правилно функциониране.

Допълнително изискване при работа като екстрактор на робота е изискването за проверка на частите на изваждания детайл, чрез дифузни инфрачервени сензори. Поставено беше условие тези сензори да могат се контролират от *СУ* на реинженерирания робот.

Обикновено след изваждане на отливките/детайлите от машината за леене, трябва да се сепарират леяците и паразитните парчета и ципи от отлетите детайли. Тази функция се изпълнява от хидравлични преси снабдени със специални инструменти за сепариране. Тези преси също разполагат с интерфейс за взаимодействие с екстракторите, които поднасят отливките за сепариране. Обикновено интерфейса им е прост и се състои от максимално 2 цифрови входа и 2 цифрови изхода. Много често този интерфейс е ограничен до един цифров изход и един цифров вход.

За да се обоснове достатъчността на интерфейса на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* е използван стандарта за екстрактори на *VDMA*, който е даден на английски език, както е в оригинал. Стандартът определя куплунга, същността на сигналите, електрическа и времева характеристика и тяхната подредба по пера в куплунга на интерфейса.

За проверка на правилното интерпретиране и отработване на сигналите е разработен симулатор на сигналите (*фиг. 244*), генерирани и възприемани от машината за леене.



Фиг. 244 Симулатор на сигналите, генерирани и възприемани от машината за леене под налягане, която ще бъде обслужвана от функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, съгласно новото му индустриално приложение

Веднага, след излагането на стандарта, можеше да се определи, че изискванията по отношение на електрически изисквания бяха изпълнени. За осъществяване на галванично разделяне на интерфейса, в случая бяха възможни два подхода:

- специализираната входно-изходна платка за изграждане на интерфейси е реализирана с оптично развързани входове и изходи;
- изграждане на интерфейса посредством сухи контакти на интерфейсни релета.

Броят на цифровите входове и изходи на специализираната входно-изходна платка беше допълнен от заложените цифрови входове и изходи на използваните сервоуправления, производство на фирма *„Електроинверт“ ЕООД*.

В *табл. 46* са представени наличните входове и изходи за осъществяване на нужните технологични интерфейси.

Таблица 46 Входове и изходи за осъществяване на нужните технологични интерфейси

Модул с входове и/или изходи	**Налични I/O**	
	Цифрови входове	**Цифрови Изходи**
Входно изходна платка	**16**	**16**
Серво 1	**4**	**3**
Серво 2	**4**	**3**
Серво 3	**4**	**3**
Серво 4	**4**	**3**
Серво 5	**4**	**3**
Серво 6	**4**	**3**
Налични ОБЩО:	**40**	**34**

В *табл. 47* са представени необходимите входове и изходи за осъществяване на нужните технологични интерфейси на реинженерирания робот като екстрактор.

Таблица 47 Входове и изходи за осъществяване на нужните технологични интерфейси

Необходими входове и/или изходи за:	**Необходими I/O**	
	Цифрови входове	**Цифрови Изходи**
DISPO 10 интерфейс - основни сигнали	**8**	**9**
DISPO 10 интерфейс - опции	**11**	**4**
Инфрачервени сензори	**8**	
Сепарираща (трим) преса	**2**	**2**
Налични ОБЩО:	**29**	**15**

Количествено, ясно се вижда, че има достатъчен запас от входове и изходи за изграждане на интерфейси за технологичния процес.

Проведените експерименти с разработеното симулационно устройство доказват пълната работоспособност на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*, след извършения реинженеринг, за работа като екстрактор обслужващ машини за леене под налягане в комбинация с *ИР*, сензори и сепариращи преси.

4.8. Изследване на функционалността на новосъздадения софтуер

В настоящата задача е извършено изследване на функционалността на разработения софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*. Изследването показа действието и работата на базовите програмни модули и на потребителските програми за движение на робота. Разгледани са движенията на ставите на робота в пространството, а също и в декартовото пространство.

Разработеният софтуер и прилежащия към него потребителски интерфейс са ориентирани към една от целите на настоящата разработка – извършване на реинженеринг на избран типопредставител на *ИУР*, в случая *KUKA KR-150*, с цел ново индустриално приложения на реинженерирания робот.

Изследването на функционалността на програмното осигуряване е разделено на два основни етапа – изследване на базовите програмни модули и изследване на потребителските програми за движение на робота в пространството.

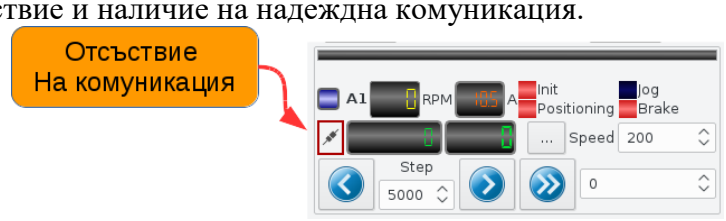
Изследването има за цел потвърждаване на изградената концепция за графичен потребителски интерфейс, ориентиран към система за интегрирано управление на индустриален робот и спомагателни манипулатори, което създаде възможност за ново индустриално приложения на реинженерирания робот, на база резултатите постигнати в рамките на разработката.

Изследване функционалността на софтуера

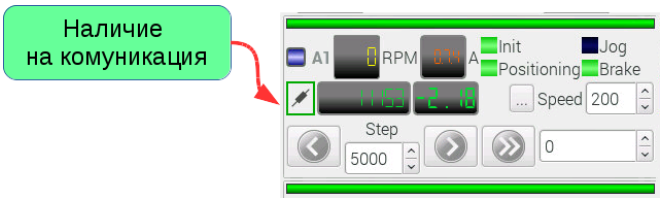
Изследването на функционалността на програмното осигуряване се раздели на два основни етапа – изследване на базовите програмни модули и изследване на потребителските програми за движение на робота в пространството на ставите на робота и в декартовото пространство. Описание на извършеното изследване е дадено по-долу.

Изследване на комуникацията със серво задвижванията на осите на индустриалния робот

Изследването се осъществи посредством инженерния потребителски интерфейс, като в него беше предвидена функционалност, индикираща състоянието на комуникацията със сервозадвижванията. На *фиг. 245* и *фиг. 246* са показани състоянията на индикаторите, съответно при отсъствие и наличие на надеждна комуникация.



Фиг. 245 Състояния на индикаторите при отсъствие на надеждна комуникация



Фиг. 246 Състояния на индикаторите при наличие на надеждна комуникация

За целите на изследването са предвидени специални трасиращи функции, които извеждат информация при загуба на комуникационни пакети. Сигнализирането при *CAN BUS* комуникацията е извършено на база отсъствие на отговор от някой от модулите за сервозадвижване в определен времеви прозорец.

Изследвана е честотата на появяване на такова събитие - отсъствие на пълен комплект отговори от всички сервооси при различни скорости на *CAN* интерфейса (*табл. 48*).

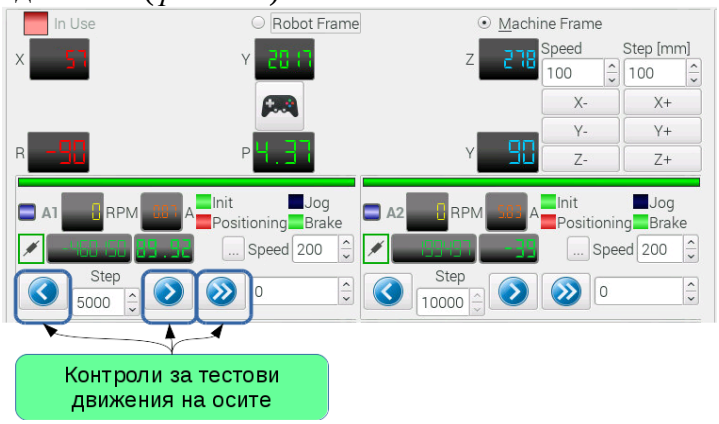
Таблица 48 Честота на отсъствие на пълен комплект отговори от всички сервооси при различни скорости на *CAN* интерфейса

Скорост на CAN интерфейса [Kbit/s]	Загубени пакети [%]
250	0.0006410
500	0.0041667
1000	2.3471242

От направеното изследване се видя, че логично с намаляване на скоростта на трансфер, надеждността на комуникацията нараства. От друга страна скорост на трансфер под *500 Kbit/*s води до недопустимо увеличаване на времето на работния такт, докато при скорост *1000 Kbit/s* се наблюдава недопустимо увеличаване на честотата на загуба на пакети. Избраната скорост на трансфер *500 Kbit/s* се явява оптимална и гарантира време на основния такт под *25 ms*.

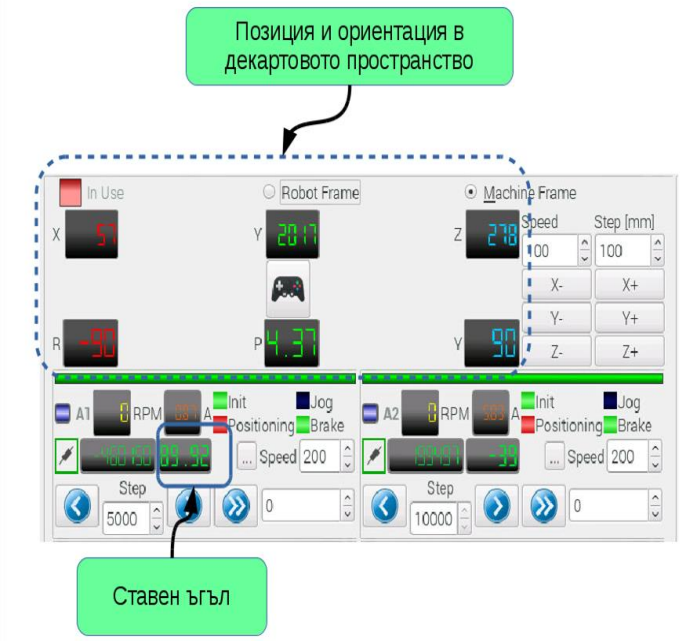
Изследване на движението на осите

Изследването на този модул е осъществено посредством инженерния потребителски интерфейс, като в него са предвидени специални компоненти за задаване на премествания индивидуално към всяка ос с програмирана стъпка или към зададена координата в пространството на ставите на робота, и със зададена средна скорост на движение на задвижващия електродвигател (*фиг. 247*).



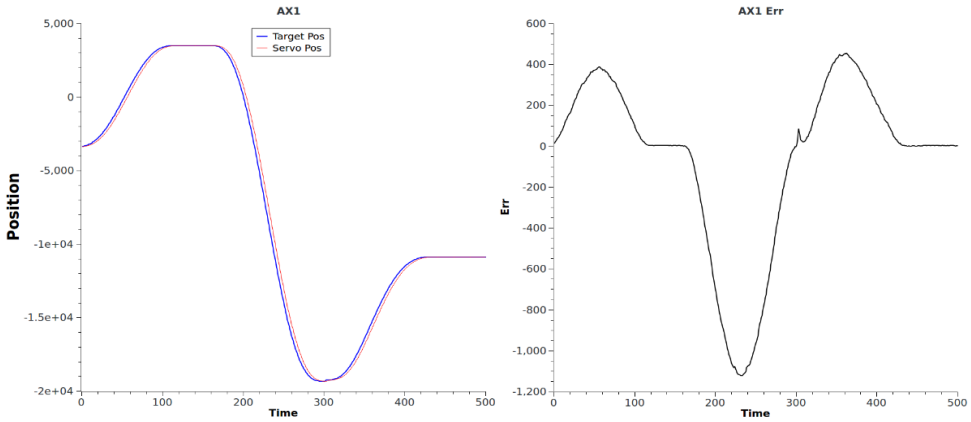
Фиг. 247 Инженерен потребителски интерфейс за задаване на премествания и стъпки по управляваните оси

При това се наблюдаваше съответна промяна в ъгъла на завъртане на ставата, както разбира се и промяна на положението в декартовото пространство (*фиг. 248*).

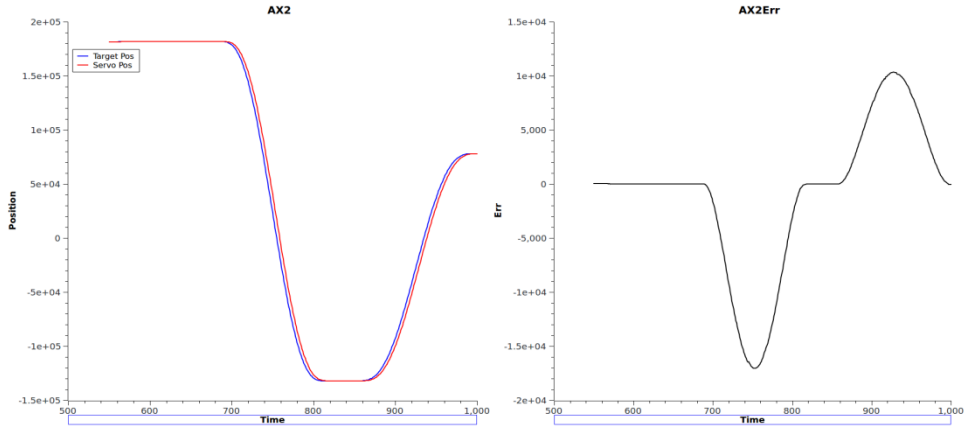


Фиг. 248 Промяна в ъгъла на завъртане на ставата в инженерния потребителски интерфейс

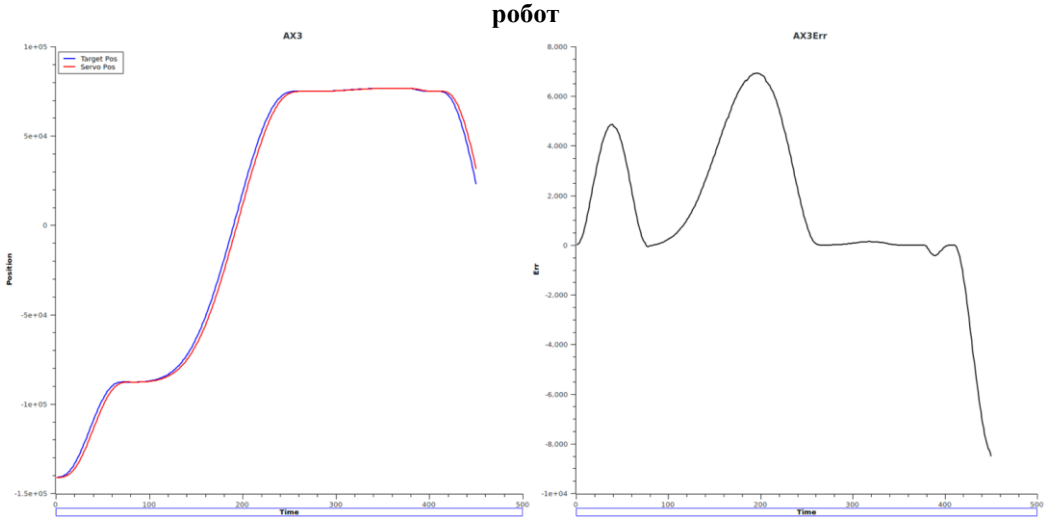
Изследвани са движенията на всички оси при изпълнение на траектория, интерполирана с полином от 5$^{-та}$ степен и грешките при следване и позициониране от *фиг. 249* до *фиг. 254*.



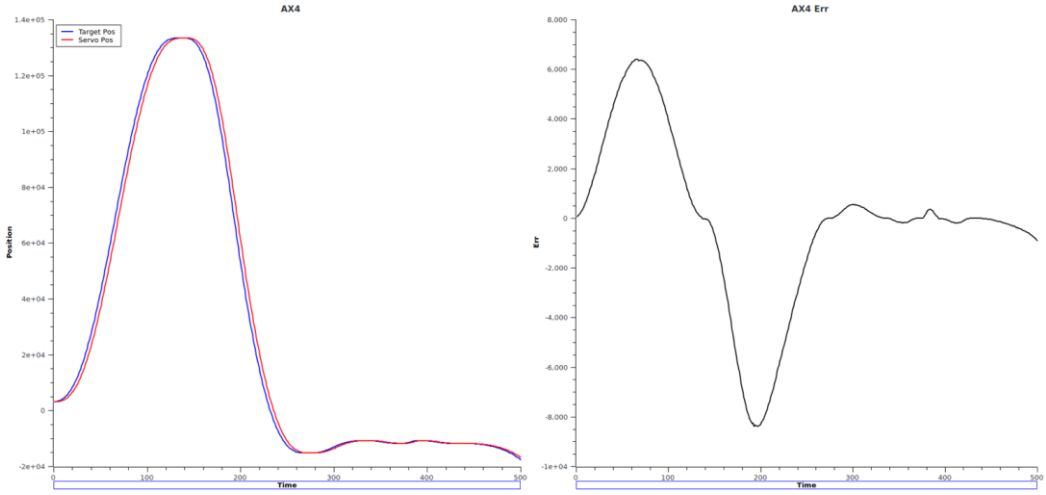
Фиг. 249 Изследване на първа ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот



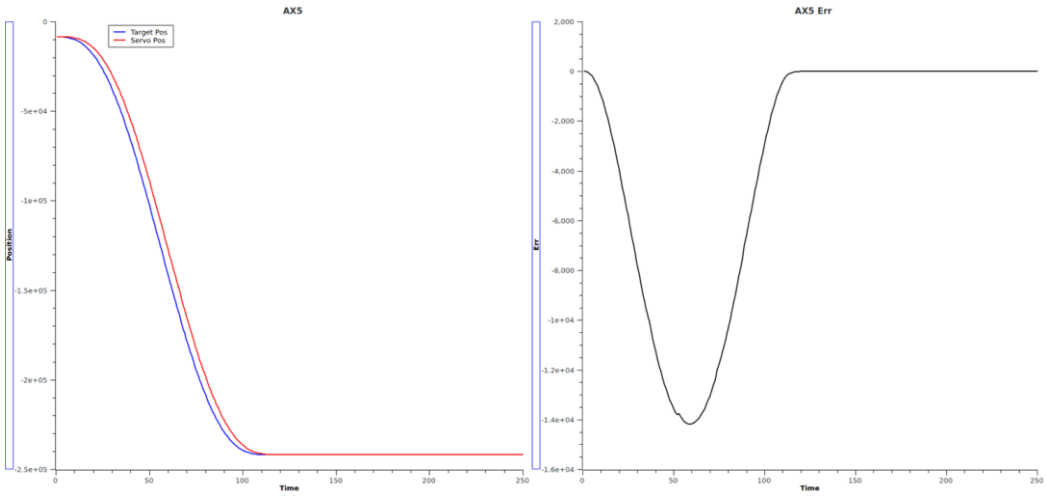
Фиг. 250 Изследване на втора ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот



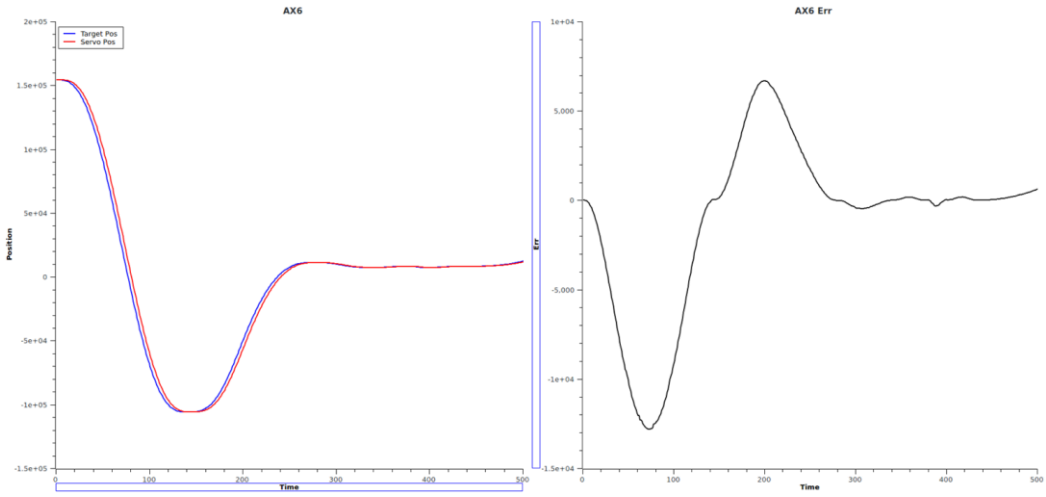
Фиг. 251 Изследване на трета ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот



Фиг. 252 Изследване на четвърта ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот



Фиг. 253 Изследване на пета ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот

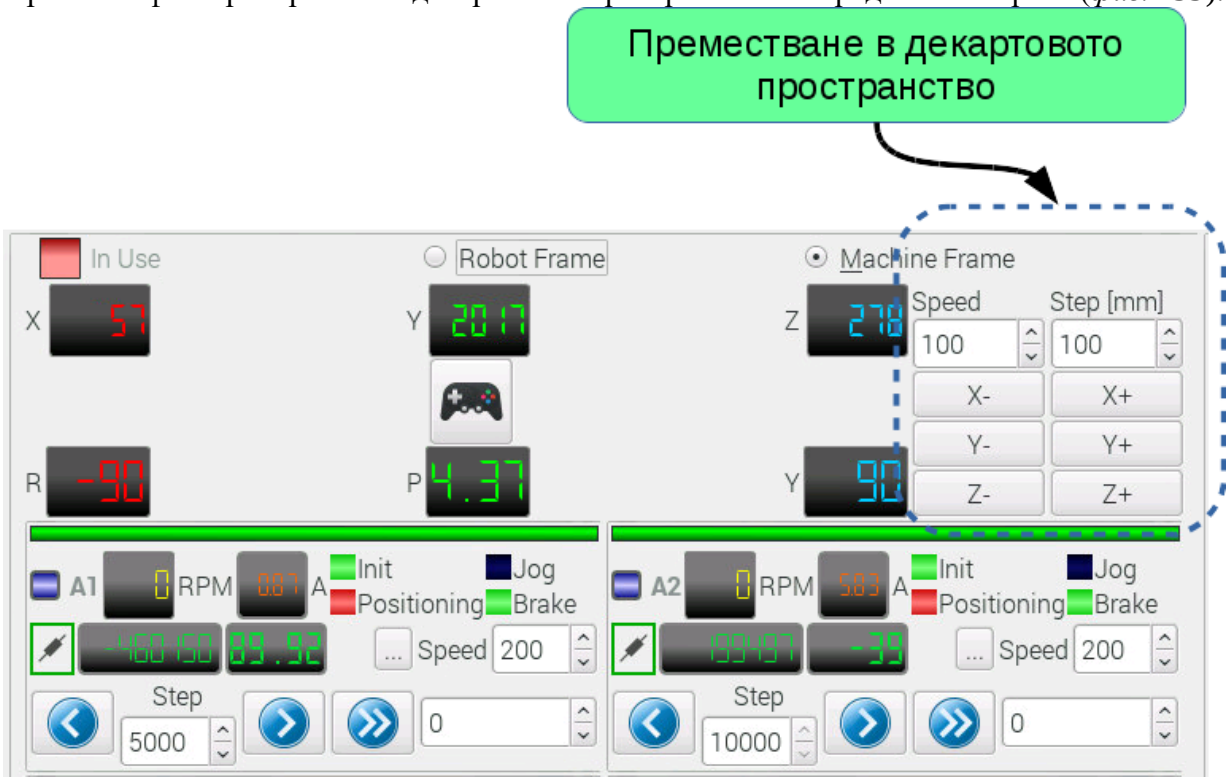


Фиг. 254 Изследване на шеста ос на функционално действащият лабораторен модел на реинженирания робот

От направеното изследване се видя, че грешката достига максимум един оборот на мотора, но това е фактически изместване във времето и реалната траектория следва зададената с голяма точност. Точността при позициониране практически клони към нула.

4.9. Изследване на кинематичното моделиране на робота (права и обратна кинематична задача) и синтез на движения в декартовото пространство

Изследването е извършено в средата на инженерния потребителски интерфейс, където за целта бяха предвидени компоненти за задаване на единични праволинейни премествания на крайния ефектор на робота в декартовото пространство с определена скорост (*фиг. 255*).



Фиг. *255* Изследване на компоненти за задаване на единични праволинейни премествания на крайния ефектор на робота в декартовото пространство с определена скорост в инженерния потребителски интерфейс

При това изследване беше анализирано отклонението на статичната координата (*X Y Z*), която трябваше да остане непроменена при премествания в другите две координати, както и запазването на ориентацията (***R**oll **P**itch **Y**aw*) на крайния ефектор, която трябваше да остане непроменена. Извършени бяха изследвания при различни средни скорости на преместването в декартовото пространство (*табл. 49*).

Таблица 49 Изследвания при различни средни скорости на преместването в декартовото пространство

Средна скорост [m/s]	Отклонение XYZ [mm]	Отклонение RPY [°]
0.1	0.31	0.01
0.3	0.55	0.013
0.5	0.98	0.32
0.7	1.48	0.44
1.0	2.12	0.78

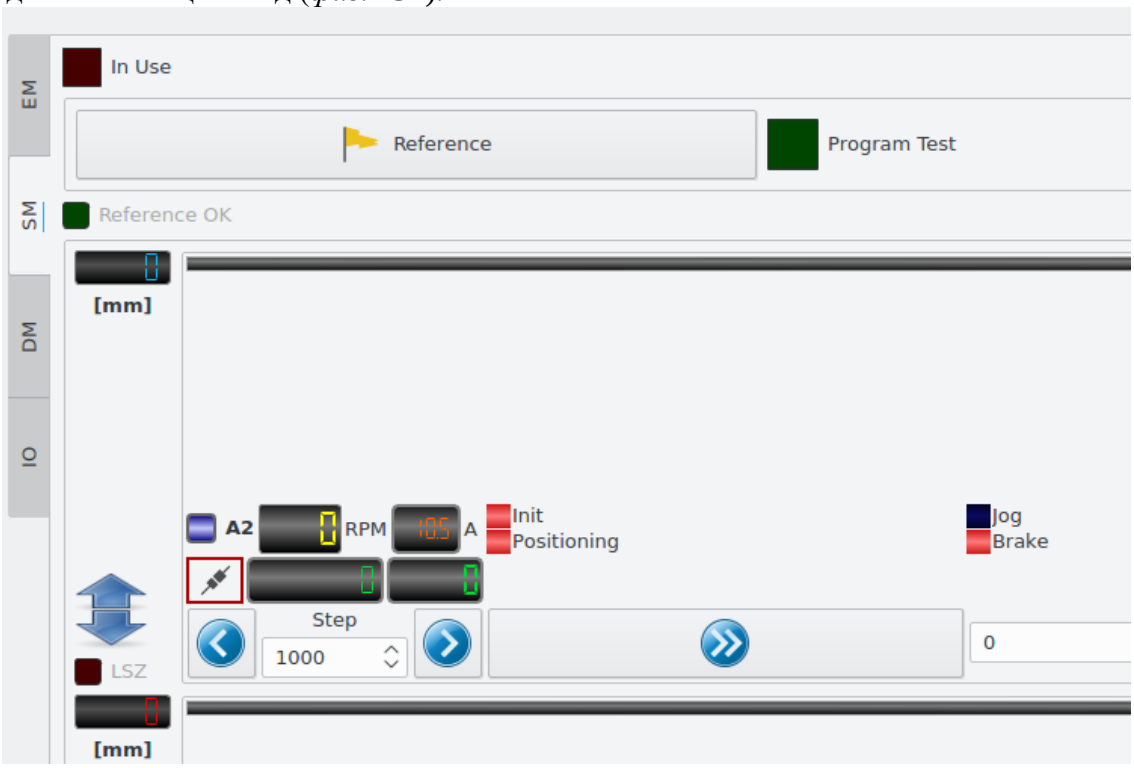
Изследване на потребителския интерфейс

Изследването на потребителския интерфейс е проведено от гледна точка на възможностите за разширяване на програмното осигуряване, с цел покриване на цялостната функционалност на един роботизиран комплекс за обслужване на машина за леене на алуминиеви детайли - тип „студена камера“.

Необходимото спомагателно оборудване, освен индустриалния робот, който служи за изваждане на готовия детайл от пресформата, проверка, охлаждане и други спомагателни

обработки, включва и дозиращ манипулатор, както и обмазващ манипулатор. Целта на проведеното изследване беше да се оформи концепция за включването на визуални компоненти и оформянето на единен потребителски интерфейс.

В средата на инженерния потребителски интерфейс съответните компоненти са групирани в отделни интерактивни страници, което дава пространство за пълно визуализиране на всички манипулатори, а от друга страна предоставя механизъм за бързо превключване между тях (*фиг. 256*). В средата на операторския интерфейс, манипулаторите са обединени в общ изглед (*фиг. 257*).

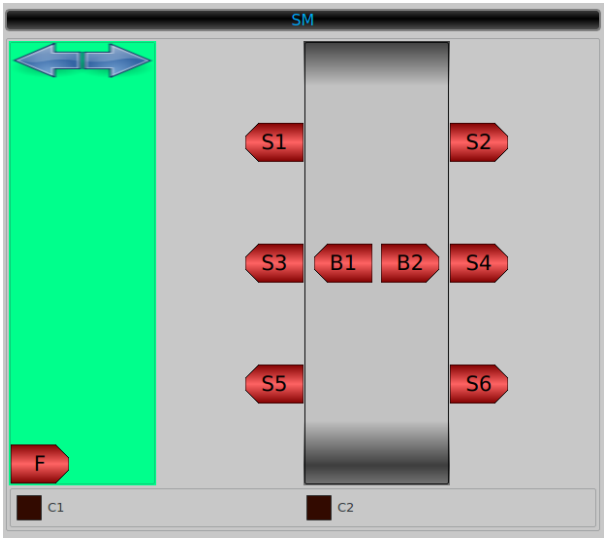


Фиг. 256 Превключване между отделните интерактивни страници на обслужващите манипулатори в средата на инженерния потребителски интерфейс на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

Фиг. 257 Общ изглед на обслужвашите манипулатори в операторския интерфейс на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

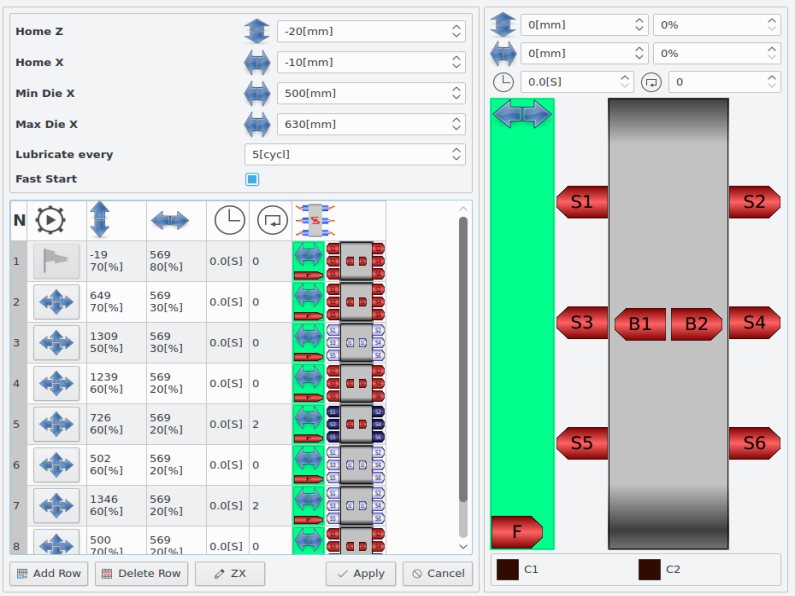
Изследване на концепция за потребителски интерфейс към обмазващ манипулатор (SM)

Изследването е фокусирано върху създаването на визуални компоненти за контрол и програмиране на манипулатора. На *фиг. 258* е показан визуалния компонент към операторския интерфейс.



Фиг. 258 Визуален компонент към операторския интерфейс

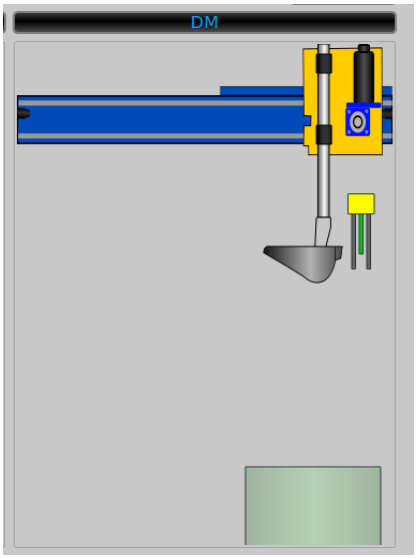
На *фиг. 259* е показана изследваната концепция за програмиране и контрол в средата на инженерния интерфейс.



Фиг. 259 Програмиране и контрол в средата на инженерния интерфейс

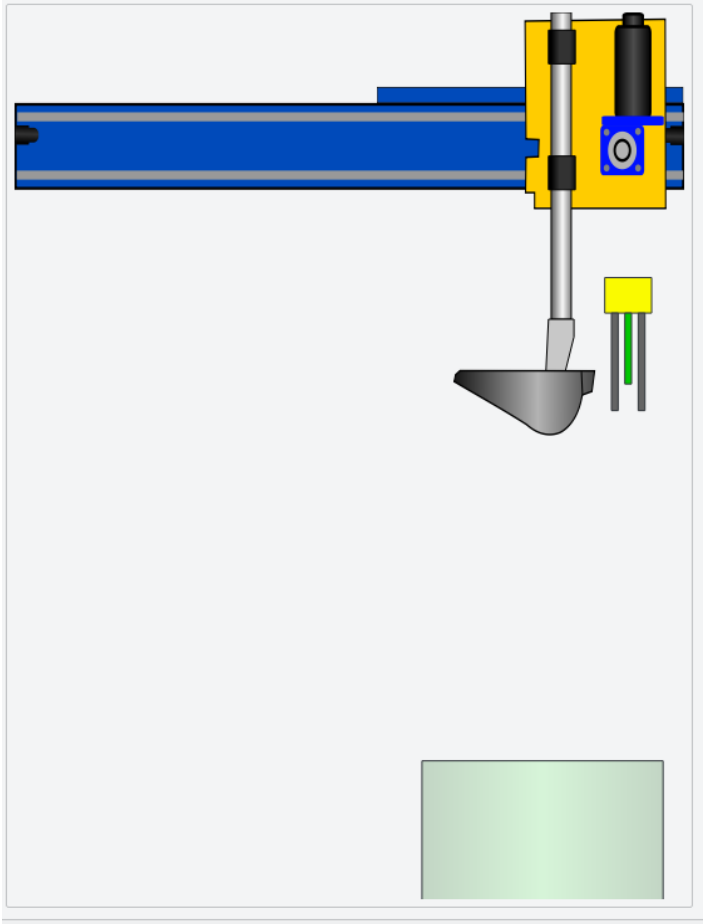
Изследване на концепция за потребителски интерфейс към дозиращ манипулатор (DM)

Изследването беше фокусирано върху създаването на визуални компоненти за контрол и програмиране на манипулатора. На *фиг. 260* е показан визуалният компонент към операторския интерфейс.



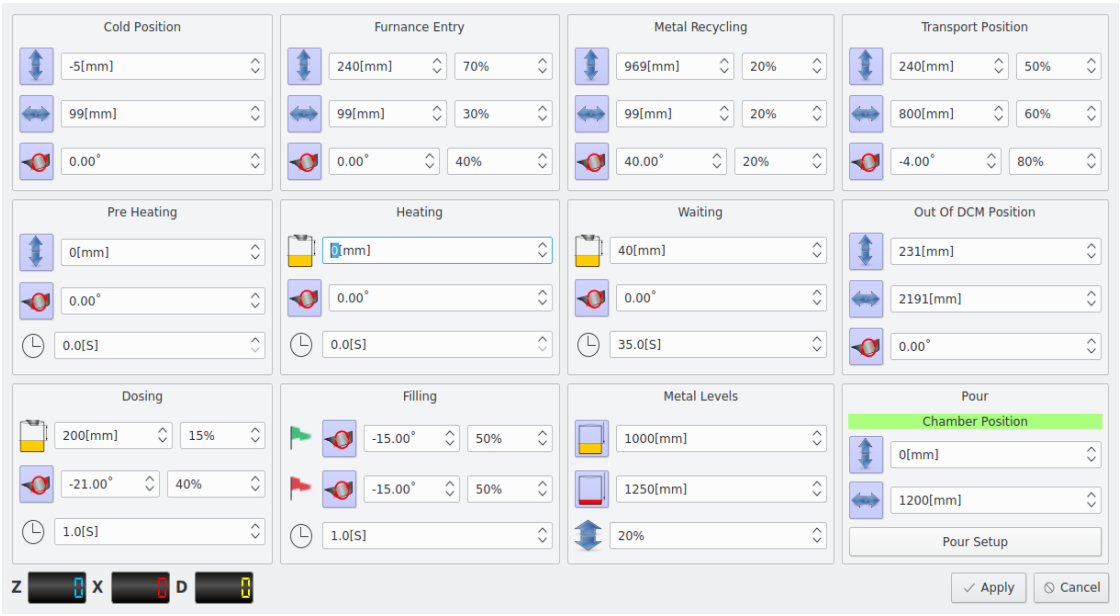
Фиг. 260 Визуален компонент към операторския интерфейс

Графичните компоненти към инженерния интерфейс са значително по-сложни, тъй като е необходимо визуализирането на контроли за параметризиране и програмиране на *DM*. На *фиг. 261* е показана основната визуализация, която е анимирана и съответства на реалното положение на манипулатора в пространството като включва интерактивно представяне състоянието на основните сензори.

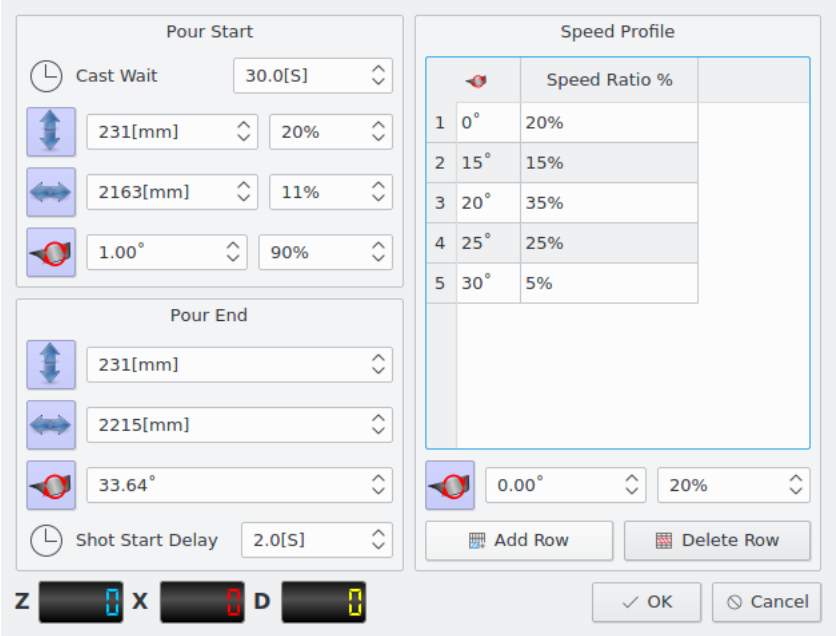


Фиг. 261 Основна визуализация на реалното положение на манипулатора в пространството

Достъп до конфигурационните екрани се осъществява с докосване на визуализиращия компонент (*фиг. 262* и фиг. *263*).



Фиг. 262 Достъп до конфигурационни екрани за позиции на черпака, вход в потата и обръщане на метала



Фиг. 253 Достъп до конфигурационни екрани за начало на изливане на метала и скоростите на движение

С така проведеното изследване беше изградена концепция за графичен потребителски интерфейс към система за интегрирано управление на индустриален робот и спомагателни манипулатори. Това отвори възможност за бъдещо развитие на резултатите постигнати в рамките на разработката.

5. Верификация на методиките за реинженеринг вследствие на извършените дейности

Като следствие на задачата за реинженеринг на универсални роботи (*РУР*) е синтезирана система за управление на *индустриален универсален робот* (ИУР), която се характеризира с висока степен на сложност. Изследването на такава сложна и комплексна система наложи разработването на методики за детайлно изследване на отделните възли, като крайната цел е удостоверяване на надеждно функциониране на цялата система. Такива методики са създадени по време на изследването на елементите, като сензорна система, сервозадвижвания, захранвания, интерфейс за връзка с външни устройства за осъществяване на взаимодействия с обкръжаващите машини и съоръжения, за осъществяване на необходимия производствен или друг процес. Детайлните методики, са насочени към елементарно, но сигурно тестване на определените модули или блокове. Те предоставят възможност за извършването на различни операции при начално пускане след производство или ремонт на системата за управление от по-ниско квалифициран технически персонал. В тази връзка е особено важно методиките да бъдат детайлно проверени и верифицирани. Извършени са проверки, по стъпките на създадените методики за окачествяване на възстановената механична конструкция и разработените хардуерна и софтуерна система за управление на *ИУР*, резултат от извършените изследвания, търсения и синтез за решаване на задачата за реинженеринг.

Верификацията е извършена на база:

- изработените методики за изследване на механичната конструкция, хардуера и софтуера на изследвания типопредставител на *ИУР*;
- извършените изследвания върху обновената механична конструкция и разработения хардуер и софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*.

5.1.Верификация на методиката за възстановяване на механичната конструкция

Основната цел на верификацията на методиката за възстановяване на механичната конструкция е да потвърди резултатите, постигнати при реинженеринга на робота и извършените дейности по възстановяването на конструкцията на робота. При тези дейности са взети под внимание следните основни съображения: моментно състояние на изследвания *УР*, обект на реинженеринг; възможността за оптимално използване на съществуващите в робота елементи, възли и сглобени единици; възможността за ефективна и икономически целесъобразна подмяна на износените и/или повредени части; съобразяване с областта на приложение, в която ще оперира робота. На база тези съображения и дейностите, които са извършени по тях, е извършена верификация на резултатите от възстановяването на механичните компоненти и конструкция на избрания за реинженеринг типопредставител на *ИУР*.

I. Визуална инспекция на механичните компоненти и структурната цялост на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот

В първия етап от верификацията реинженерираният робот е проверен за външни дефекти и нарушени основни функционални характеристики, които биха му нарушили работата за планираното ново индустриално приложение на робота като манипулатор-екстрактор в зоната на действие на леярска машина за хоризонтално леене под налягане.

Извършената проверка е верифицирана, съгласно *табл. 50* в следните стъпки:

Таблица 50 Верификация на визуалната инспекция на механичните компоненти и структурната цялост на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот

Вид на извършената проверка	Наличие	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**

1. Визуална инспекция за цялостност и здравина на корпусните детайли	√ (Няма наличие на дефекти или проблеми)	
2. Визуална проверка на всички двигатели за удари и наранявания по корпусите, фланците и куплунгите им, следствие от извършения реинженеринг	√ (Няма наличие на дефекти или проблеми)	
3. Визуална проверка на хидро-пневматичния механизъм за уравновесяване и отчитане на налягането на маслото при сгънато положение на механизма	√ (Няма наличие на дефекти или проблеми)	
4. Проверка на извършения монтаж на крайния ефектор към шеста ос на робота	√ (Няма наличие на дефекти или проблеми)	--

След извършената верификация е установено, че по реинженерирания робот няма визуално установено наличие на пукнатини или отчупени парчета на възлови места, нарушаващи целостта му или здравината на отделни негови детайли, което потвърждава готовността му да се използва за планираното му ново индустриално приложение.

II. Изследване на хлабините в редуциращите предавки и лагерните възли във всяка една от осите на робота

За да се докаже годността на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот за неговото ново приложение, е необходимо да се провери за наличие на хлабини в редуциращите предавки и лагерните възли за всяка една от шестте оси на робота. Извършената проверка е показана в *табл. 51*.

Таблица 51 Верификация на изследването на хлабините в редуциращите предавки и лагерните възли във всяка една от осите на робота на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот

Вид на извършената проверка	Наличие	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
1. Проверка на редуциращи предавки и лагерни възли	√ (Няма наличие на грешки)	
2. Отчитане на грешките при относителни премествания по трите главни оси и съответните ротации около тези оси	√ (Няма наличие на грешки)	Измерванията на стойностите са в допустимите граници
3. Измерване на повтаряемостта на позиционирането на осите на робота	√ (Няма наличие на грешки)	Измерванията на стойностите са в допустимите граници
4. Измервания върху множество точки от работното пространство на робота	√ (Няма наличие на грешки)	Измерванията на стойностите са в допустимите граници

Извършена е верификация на изследването на цялата конструкция за хлабини в редуциращите предавки и лагерните възли на всяка една от шестте оси. Хлабините в предавките по посока на въртене не бива да надвишават допустимите стойности от *±1°*, предвид бъдещото им приложение в леярската индустрия. Допустимите стойности са определени на база на дългогодишния опит на специалистите от фирмата-потребител *„Спесима“ ООД* в областта на специализираните системи за автоматизация на производството, в частност - решения за автоматизация на леярски технологични процеси. Проверката на лагерните възли (въртящите връзки) показва липса на хлабини във всяко едно от подвижните звена на кинематичната система.

Използван е *метод за изследване и измерване на хлабините в предавките* - измерването на хлабините в предавките се извършва, като се започне от *ос 1* и постепенно се стигне до *ос 6*, с монтирани двигатели и задействани спирачки, при което в идеалния случай (безхлабинни предавки) не би трябвало да има възможност звена от механизма, да се преместват едно спрямо друго. Принципът за измерване, който може да се приложи за всички оси е следният: едно от двете звена свързани със съответната ос на ротация се поставя така, че ако към него се приложи хоризонтална сила, то тя да предизвика максимален момент в тази ос по посока на движението й. При тази постановка се поставят два уреда за измерване на наклон с точност *±0,2°*, единият на едното звено, а другият на другото и се следят техните показания. С хоризонтално натискане на ръка в едната, а после и в другата посока се обират хлабините в предавките, в двете посоки. Отчитайки показанията на двата уреда, разликата в преместванията показва съответната хлабина в предавките.

При извършените изследвания не са установени завишени стойности на хлабините в нито една от осите и не е необходимо да се подменят съответните редуциращи предавки и/или лагери.

Използван е *метод за измерване на точността на позициониране на цел* - към фланеца на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот, предвиден за закрепване на крайния ефектор, се поставя специален прецизно изработен детайл с две сферични точки, които са достатъчно точно изработени и позиционирани една спрямо друга и спрямо координатната система на робота. С така монтирания измервателен детайл роботът се премества до определено зададена позиция в работното му пространство. В тази позиция върху корава стойка се поставят шест индикаторни часовници, с точност на отчитане *(0,01мм)*, като три от тях ще отчитат преместването на *една сферична точка,* в трите взаимноперпендикулярни направления на глобалната координатна система на *УР*. А другите три по същият начин ще следят *другата сферична точка* на измервателния детайл.

След нивелиране на *УР*, софтуерно му се задава да се премести в определена точка с координати в неговата координатна система и да ориентира измервателния детайл, успореден на една от осите от координатната система. Поставя се стойката с индикаторните часовници, които се нивелират, така че да измерват взаимното разположение на *двете сферични точки.*

При така сформираната постановка са направени редица измервания за точност:

а) *отчитане на грешките при относителни премествания по трите оси и съответните ротации около тези оси* – не се установиха грешки при реалното им изпълнение от робота;

б) *измерване на повтаряемостта на позиционирането* – зададе се на робота преместване по шестте оси на координатната система, след което се зададе връщане обратно в първоначална позиция, в която не се отчете грешка;

в) *измервания върху множество точки от работното пространство на робота* – извършени са множество измервания върху различни точки от работната зона на робота, след което резултатите се обработиха статистически. Измерването показа отсъствие на неточности при позициониране и ориентиране на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот в настоящия проект - *KUKA KR-150.*

III. Оценка на извършения реинженеринг на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот

Извод от извършената верификация на изследването на извършения реинженеринг върху функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150* – не съществуват отклонения в точността по-големи от желаните за съответния технологичен процес, в който реинженираният робот ще намери приложение.

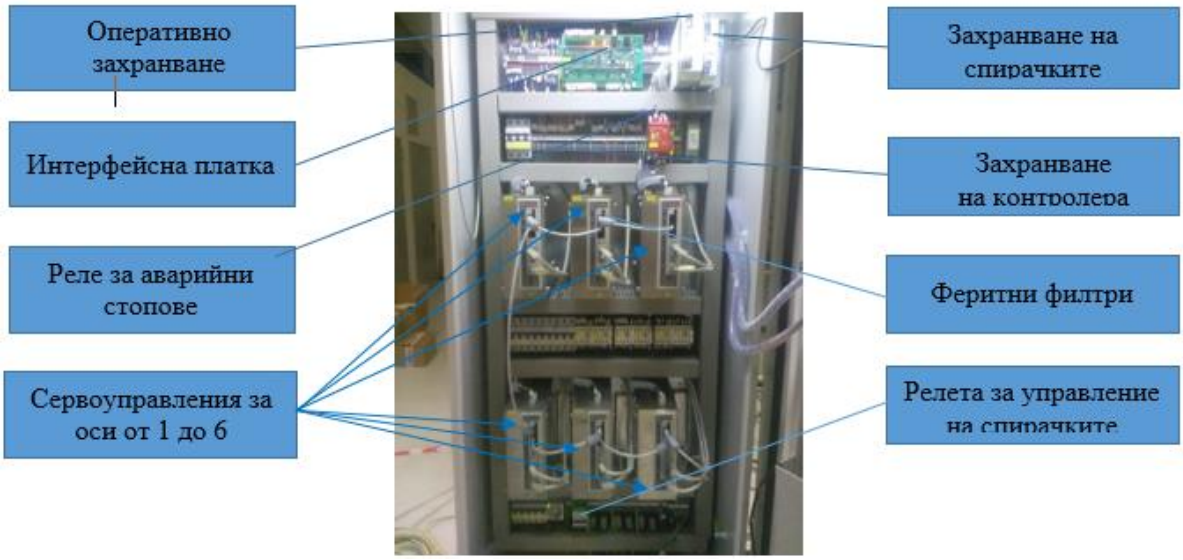
5.2. Верификация на методиката за оценка на хардуерната система за управление

Методиката за проверка на хардуерната система би трябвало да послужи като основно заключение или потвърждение на заложените параметри при синтезирането и изработката на самата система за управление (*СУ*) на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*. Тази верификация е необходима, но не е достатъчно условие, даващо сигурност при надграждането на *СУ* с интерфейса към технологичното обкръжение, а така също и за правилното функциониране на операционната система и нужния технологичен, приложен и специализиран софтуер. Базирайки се на тази верификация на хардуера е възможно да се приложат методиките за окачествяване на софтуерната част за пълноценното пълно функциониране на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*.

С цел избягване на повторения, методиките за изследване на хардуера, са представяни с предложените документи (протоколи, таблици, последователности) за попълване при тяхното прилагане.

I. Визуална инспекция на основни хардуерни компоненти на изследвания *ИУР*

На *фиг. 264* е представена силовата част на хардуерната управляваща система.



Фиг. *264* Табло за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

II. Визуалната инспекция

1. Проверка на механичния монтаж и закрепване на отделните елементи.
2. Проверка стабилността на връзките.
3. Проверка на надеждността на инсталиране на филтри за електромагнитните смущения. (В случай, че се открият липси – да се монтират)

Резултатите от проверката се попълват в *табл. 52*.

Таблица 52 Визуална инспекция на хардуерната система на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*

Вид на извършената проверка	**Наличие**	**Забележка (в случай, че има отклонение)**
1	**2**	**3**
1. Проверка на механичния монтаж на отделните елементи		
1.1. На захранванията		
24V за оперативно напрежение	√ (ДА)	--
24V за захранване на спирачките	√ (ДА)	--
12V за захранване на контролера и спирачките	√ (ДА)	--

1.2. На сервоулправленията		
Сервоуправление за сервоос 1	√ (ДА)	--
Сервоуправление за сервоос 2	√ (ДА)	--
Сервоуправление за севрвоос 3	√ (ДА)	--
Сервоуправление за сервоос 4	√ (ДА)	--
Сервоуправление за сервоос 5	√ (ДА)	--
Сервоуправление за севрвоос 6	√ (ДА)	--
1.3. На контакторите	√ (ДА)	--
1.4. На предпазителите	√ (ДА)	--
1.5. На релетата	√ (ДА)	--
1.6. Входно изходен модул за цифровите входове и изходи	√ (ДА)	--
1.7. Релетата за управление на спирачките на серводвигателите	√ (ДА)	--
1.8. Релета за безопасност и аварийни стопове	√ (ДА)	--
2. Проверка стабилността на връзките		
2.1. Проверка стабилността на закрепване на силовите куплунги;	√ (ДА)	--
2.2. Проверка надеждността на фиксиране на комуникационните кабели;	√ (ДА)	--
2.3. Проверка връзките в пружинните клеми;	√ (ДА)	--
2.4. Проверка за излишни и свободно (несвързани) кабели;	√ (ДА)	--
3. Проверка на надеждността на инсталиране на филтри за електромагнитните смущения. (В случай, че се открият липси – да се монтират)		
3.1. Проверка на магнитните филтри за погасяване на електромагнитните смущения в комуникационните вериги.	√ (ДА)	--
3.2. Проверка на феритните погасители на смущения от силовите моторни кабели	√ (ДА)	--

III. Проверка за къси съединения на основни захранващи модули

Проверката се извършва със специализиран измервателен уред – мегаомметър, при изключено захранване.

Измерват се веригите на трифазното и монофазно захранването на СУ на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150.*

Таблица 53 Измервания за отсъствие на къси съединения.

Измерване за наличие на къси съединения между:	R > 1 MΩ	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	2	3
Фаза L1 - Фаза L2	√(ДА)	--
Фаза L1 - Фаза L3	√	--
Фаза L2 - Фаза L3	√	--
Фаза L1 - N	√	--
Фаза L1 - PE	√	--
N – PE	√	--

Таблица 54 Измервания за отсъствие на къси съединения в захранващите блокове на управляващата система – оперативно напрежение 24 V DC, захранване на спирачките и захранване на контролера.

Измерване за наличие на къси съединения между:	R > 1 MΩ	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	2	3
Клема L - N	√(ДА)	--
Клема L - PE	√	--
Клема L - Клема -24VDC	√	--
Клема L - Клема +24VDC	√	--
Клема N - PE	√	--
Клема N - Клема -24VDC	√	--
Клема N - Клема +24VDC	√	--

IV. Проверка за съответствие на захранващото напрежение на таблото за управление

Таблица 55 Измерване на входно захранващо трифазно напрежение

Измерване на входното захранващо напрежение между:		Стандартна стойност [VAC]	Измерена стойност [VAC]	Допустим толеранс на измереното напрежение
Фаза L1	Фаза L2	400	403	+10% -15%
Фаза L1	Фаза L3	400	401	+10% -15%
Фаза L2	Фаза L3	400	399	+10% -15%
Фаза L1	N	230	223	+10% -15%
Фаза L2	N	230	219	+10% -15%
Фаза L3	N	230	221	+10% -15%

Таблица 56 Измерване на захранванията на инверторите за сервозадвижванията на изследвания робот

Измерване на входното захранващо напрежение между:	Напрежение [V]	Забележка (в случай, че има отклонение)
Серво 1/ Клема L - N	223	--
Серво 2/ Клема L - N	219	--
Серво 3/ Клема L - N	221	--
Серво 4/ Клема L - N	223	--
Серво 5/ Клема L - N	219	--
Серво 6/ Клема L - N	221	--

Таблица 57 Данни за проверката за сработването на електромагнитната спирачка на моторите на реинженерирания робот.

Проверка за сработването на електромагнитна спирачка за серво ос:	Сработване Да/не	Забележка (в случай, че има отклонение)
Серво ос А 1	√(ДА)	--
Серво ос А 2	√	--
Серво ос А 3	√	--
Серво ос А 4	√	--
Серво ос А 5	√	--
Серво ос А 6	√	--

V. Проверка на свързването и функционалността на серводвигателите на робота

Таблица 58 Проверка на посоката на въртене на серводвигателите, свързани със сервоуправленията

Проверка на посоката на въртене на серводвигателите за сервоос:	Положителна посока на въртене да / не	Забележка (в случай, че има отклонение)
Серво ос А 1	√(ДА)	--
Серво ос А 2	√	--
Серво ос А 3	√	--
Серво ос А 4	√	--
Серво ос А 5	√	--
Серво ос А 6	√	--

Извършването на всички тези проверки удостоверява изправността и работоспособността на хардуерната система, което от друга страна потвърждава пригодността - верификацията на предложената методика.

Последователността на извършване на методиките предоставя методологично предварително установяване на несъответствия, в резултат на погрешен монтаж или фабрични дефекти и спомага за тяхното навременно отстраняване.

В резултат може да се предостави проверен хардуер, на който да се базират последващи проверки за нужните функционалности на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*.

5.3. Верификация на методиката за оценка на софтуерното осигуряване

Верификацията на функционалността на програмното осигуряване може условно да се раздели на два основни етапа – тестване на базовите програмни модули и тестване на потребителските програми за движение на робота в пространството, и на ставите на робота в декартовото пространство, както и изпълнението на базовата машинна логика. Процесът по верифициране на софтуерното осигуряване се базира на тестването на софтуерното осигуряване.

I. Обща инспекция за функционалността на софтуерното и системното осигуряване

В *табл. 59* са показани резултатите от верификацията на общата функционалност на софтуерното осигуряване на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150*.

Таблица 59 Верификация на изследването на общата функционалност на софтуера

Вид на извършената проверка	Наличие	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
1. Начална проверка за функционалността и необходимостта от преинсталация на софтуера	√ (Няма наличие на грешки)	
2. Проверка на функционалността на софтуера за операторския пулт за управление	√ (Няма наличие на грешки)	
3. Проверка на началните конфигурационни параметри и настройки за стартиране на софтуера на реинженерирания робот	√ (Няма наличие на грешки)	
4. Проверка на извеждането на робота в нулева позиция	√ (Няма наличие на грешки)	Измерванията на стойностите са в допустимите граници

5. Проверка на функционалността „калибриране на работния инструмент“	√ (Няма наличие на грешки)	Измерванията на стойностите са в допустимите граници

Начална проверка за функционалността и необходимостта от преинсталация на софтуера – извършена е проверка за нормално стартиране на операционната система и общите софтуерни инструменти и библиотеки, необходими за управлението на реинженерания робот. Не са открити никакви проблеми с общата функционалност на софтуера.

Проверка на функционалността на софтуера за операторския пулт за управление – извършена е проверка на общата функционалност на софтуерните инструменти за работа с операторския пулт за управление и не са открити налични проблеми.

Проверка на началните конфигурационни параметри и настройки за стартиране на софтуера на изследвания робот – това са настройките и параметрите, необходими на системата за управление да стартира успешно и да зареди програмното и системното осигуряване на софтуера на реинженерания робот *KUKA KR 150*. Проверката премина успешно и не са открити грешки.

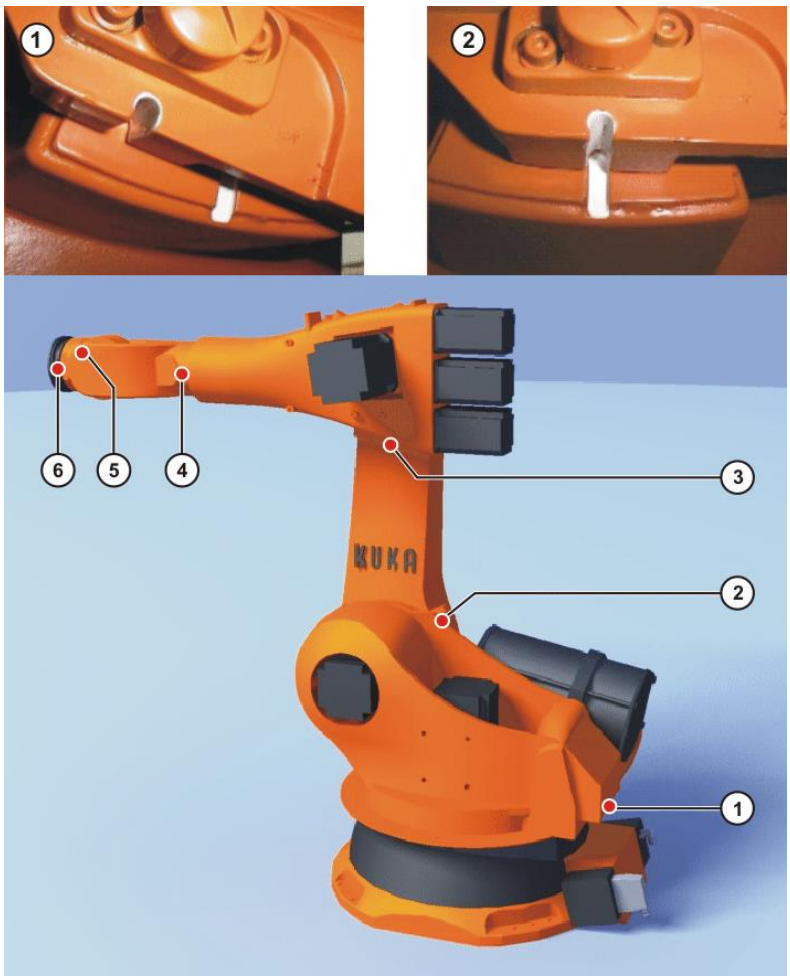
Извеждане на робота в нулева позиция (*home position, mastering, юстиране*) - за да бъде възможно и разпознаваемо от софтуера движението на всяко звено на робота в целия работен диапазон на определена става, е необходимо преди стартиране - роботът да бъде поставен в изходна (*home*) позиция. За целта се синхронизират софтуерната и механичната нула на робота за всяка една от осите (*фиг. 265*). Синхронизация между механиката и софтуерното осигуряване на изследвания робот е необходима всеки път, когато:

- роботът се пуска за пръв път в експлоатация;
- е проведена сервизна поддръжка и ремонт, при която роботът губи данните за своята нулева позиция (при смяна на сервомотор или друга част от задвижващата или актуаторната система);
- роботът е задвижен, без участието на контролерите от сервосистемата за управление;
- роботът е имал колизия с външни елементи или при рязко спиране след движения със скорости над *250 мм/с*;

Нулирането на осите е извършено успешно в рамките на извършвания процес по верификация и информацията е съхранена и може да се използва като изходна позиция за следващо стартиране и задвижване.

Верификация на функционалността „калибриране на работния инструмент“ – при калибрирането началото на координатната система на инструмента се присвоява към определена точка от него – връх на инструмента (*TCP – Tool Center Point*). Обикновено тази точка съвпада с пресечната точка на оста на симетрия на инструмента (крайния ефектор) и най-външната му работна повърхнина. Резултатите от извършената верификация показаха, че:

- работният инструмент (крайният ефектор) се движи по права линия, по оста си на симетрия (*ос Z*);
- инструментът извършва ротация около началото на координатната му система, без да се изменят координатите на самия връх на инструмента.



Фиг. 265 Механични нули на всяка ос за синхронизиране със софтуерната нула на програмното осигуряване, преди първоначално пускане на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

След извършване на всички стъпки по началната проверка за функционалността на софтуерното и системното осигуряване е установено, че няма налични проблеми или възникнали грешки.

II. Проверка на базовите програмни модули на разработения софтуер

За целите на изследването ще се извърши верификацията и проверка на базовите програмни модули на създадения софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150.*

Извършената проверка е показана в *табл. 60.*

Таблица 60 Верификация на функционалността на базовите програмни модули на софтуерното осигуряване на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания робот *KUKA KR-150*

Вид на извършената проверка	Наличие	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
1. Проверка на модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на индустриалния робот	√ (Няма наличие на грешки)	
2. Проверка на модул за синтез на задание за движението на осите	√ (Няма наличие на грешки)	
3. Проверка на модул за кинематично моделиране на робота (права и обратна кинематична задача) и модул за синтез на движения в декартовото пространство	√ (Няма наличие на грешки)	

4. Проверка на модул за обработване на спомагателните входно-изходни сигнали	√ (Няма наличие на грешки)	
5. Проверка на модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения	√ (Няма наличие на грешки)	
6. Проверка на модул ръчно управление	√ (Няма наличие на грешки)	
7. Проверка на модул за графичен потребителски интерфейс	√ (Няма наличие на грешки)	
8. Проверка модул спомагателни функции	√ (Няма наличие на грешки)	

Модул за комуникация със сервозадвижванията на осите на индустриалния робот – установена е надеждна комуникация със сервозадвижванията след издаване на команда за преминаване в режим ***готовност*** на избраните оси. Запазването на надеждната комуникация в този режим говори за правилното функциониране на модула за комуникация със сервозадвижванията

Модул за синтез на задание за движението на осите - при верификацията се установи съответна промяна в ъгъла на завъртане на ставата и промяна на положението в декартовото пространство, което говори за правилното функциониране на модула.

Модул за кинематично моделиране на робота (права и обратна кинематична задача) и модул за синтез на движения в декартовото пространство – тези два модула са взаимно свързани и се верифицират в обща процедура. При проверката се наблюдаваха промените на съответните координати (*X, Y, Z*), които отговаряха на зададените премествания, като съответно ориентацията (***R**oll **P**itch **Y**aw*) на крайния ефектор остана непроменена. Верификацията потвърди правилната работа на двата модула и съгласуването между тях.

Модул за обработване на спомагателните входно-изходни сигнали – проверките се извършиха в потребителския интерфейс на оператора и в инженерния потребителски интерфейс. При верификацията се наблюдаваше съответствие между реално активираните входно-изходни канали и изобразяването им, посредством програмното осигуряване.

Модул за синтез, съхранение и обработване на програмирани движения – направените проверки при верификацията на този модул установиха, че данните успешно се обработват и съхраняват, което говори за правилното функциониране на модула.

Модул ръчно управление - проверките се извършват в потребителския интерфейс на оператора или в инженерния потребителски интерфейс. Роботът се установи в ръчен режим (*JOG*) и посредством безжичния пулт за дистанционно управление се провериха движенията на всяка ос, както и движенията в декартовото пространство. Установи се, че роботът извършва плавно, контролируемо движение, съответстващо на скоростта задавана от оператора.

Модул за графичен потребителски интерфейс - проверено е действието на визуалните компоненти и правилното функциониране на виртуалните екранни клавиатури, които бяха според очакваните.

Модул спомагателни функции – проверена е възможността за настройка на мрежовите интерфейси. Установи се правилното функциониране на конфигурираната връзка.

III. Верификация на потребителските програми за движение на робота в пространството и на ставите на робота в декартовото пространство, както и на изпълнението на базовата машинна логика

Проверката на потребителските програми за движение на робота в пространството и на ставите на робота в декартовото пространство, както и на изпълнението на базовата машинна логика на създадения софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150* установява дали създаденият потребителски интерфейс е напълно функционален за работата на робота в новото му индустриално приложение. За целта е използван симулационен програмен пакет за проектиране и предварително тестване на потребителските програми и плъгини за машинна логика с работно наименование ***KukaSim***.

Извършената проверка е показана в *табл. 61*.

Таблица 64 Верификация на функционалността на потребителските програми за движение на робота в пространството и на ставите на робота в декартовото пространство, както и на изпълнението на базовата машинна логика на създадения софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот KUKA KR-150

Вид на извършената проверка	Наличие	Забележка (в случай, че има отклонение)
1	**2**	**3**
1. Проверка на процедурите за редактиране на програмата за движение и параметрите на плъгина за реализация на машинната логика	√ (Няма наличие на грешки)	
2. Проверка на цялостната потребителска програма и машинна логика	√ (Няма наличие на грешки)	
3. Проверка на работата на плъгините и програмата върху реално функциониращия лабораторен модел	√ (Няма наличие на грешки)	

IV. Верификация на математическия модел, имплементиран в софтуера, чрез експериментална проверка на правата и обратната задача на кинематиката

1. *Оценка на математическия модел за решаване на правата задача на кинематиката за изследвания робот* – по подобие на описаното изследване на типопредставителя на *ИУР* и сега е достигнато до следната формула за изчисляване на стандартното отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(f_{ai} - f_{ri})^2},$$

и е изведен усреднен резултат за стандартното отклонение:

$$\sigma_N = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i \approx 0.02.$$

1. *Оценка на математическия модел за решаване на обратната задача на кинематиката за изследвания робот*

За оптимално решение при избор на траектория на движение се счита това, с най-малка промяна на ъглите на трансформация на отделните звена на робота. Оценката на математическия модел за решаването на обратната задача, имплементиран в софтуерното осигуряване на избрания *УР*, е необходимо да се базира на проверката за избор на оптимално решение. Ако $\theta_i^{(0)}$ е минималната трансформация на ъглите на звената на робота за текущото му положение, то отклонението δ_i на всяко звено, може да се изчисли за всяко възможно решение и да се избере това с минималното отклонение.

$$\delta_i = \sum_{n=1}^{6}\omega_n\left|\theta_{n,i}^{(0)} - \theta_{n,i}\right|,$$

където $\omega_n = 6 - n$ е коефициент на тежест на звеното, което означава, че трансформацията на първата връзка, има по-голяма тежест от трансформацията на останалите.

Изчислената стойност по дадената зависимост се сравни, с реалното движение на реинженирания робот при едни и същи координати на крайната точка. Счита се, че полученото отклонение от оптималната стойност *до 2°* за ъглите на трансформация на отделните звена на робота е в допустимите стойности, които са определени на база на дългогодишния опит на специалистите от фирмата-потребител *„Спесима*“ *ООД* в областта на специализираните системи за автоматизация на производството, в частност - решения за автоматизация на леярски технологични процеси.

5.4. Изработване на концепция за комерсиализация на продукта

Във все по-динамично развиващия се индустриален свят конкуренцията на едно производство се определя от технологичните, организационни, процесни и продуктови иновации от една страна и от енергийната ефективност и екологичното въздействие от друга. Реиндустриализацията, която се наблюдава напоследък в Европа, е една възможност за възстановяване на индустриалната мощ на стария континент в конкурентната борба със САЩ, Япония и не на последно място с Азиатските икономики. Не случайно в приоритетите на настоящия програмен период на ЕС до 2020 година рециклирането, в частност реинженеринга на продукти и технологии за това, са изведени като важен елемент за повишаване на конкурентоспособността на европейската икономика.

Реинженерингът като подход представлява рационално модернизиране на вече създаден, но по една или друга причина неконкурентен продукт и пренасочването му към друго ефективно приложение. Индустриалния реинженеринг, в т.ч. и на универсални роботи е възможност за екологичен, енергоефективен и иновативен бизнес.

Според *IFR /Международна федерация по роботика/* през 2015 г. са произведени над 254 000 индустриални универсални роботи (*ИУР*). За 2016 се очаква продажбите да нарастнат до близо 300 000, а до 2019 над 400 000 робота.

Водещи световни производители на *ИУР* са фирмите: *FANUC, ABB, YASKAWA, KUKA, KAWASAKI, TOSHIBA* и други.

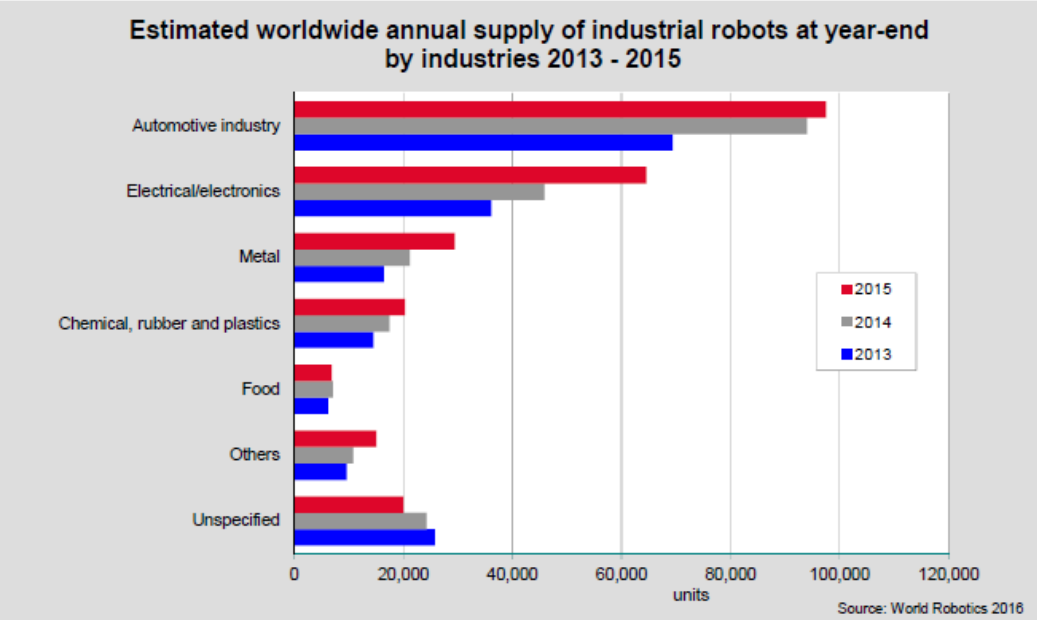
Основни направления, в които се използват индустриалните универсални роботи са автомобилната индустрия, електромеханична металообработка, химическа в т.ч. обработка на гуми и пластмаса, хранително-вкусова индустрии и други.

На *фиг. 266* се вижда, че близо 50% от произвежданите универсални роботи са внедрени в автомобилостроенето.

През 2016 г. само в Германия са продадени над 20 000 универсални робота, от които следвайки световната тенденция, вероятно над 10 000 са внедрени в автомобилостроенето.

Автомобилостроенето е изключително комплициран отрасъл, където нормите за сигурност и надеждност, сервизно обслужване и др. са много строги. Средно на всеки 5 до 7 години автоматизираните линии за производство на автомобили се подменят с нови, независимо от това в какво състояние се намира оборудването. Роботите, които излизат извън употреба формират един вторичен пазар на *ИУР*. Тези роботи не могат да се въведат веднага в експлоатация поради следните причини:

- необходимост от инспекция на механичната конструкция;
- частична или пълна подмяна на хардуера;
- подмяна на софтуера;
- изграждане на нов интерфейс, в зависимост от новото предназначение на робота.



Фиг. 266 Статистика на използването на *ИУР* в отделните промишлени сектори, според *Международната федерация по Роботика* за 2013-2015 г.

Пример за това е един клас масово използвани *ИУР* в автомобилостроенето на фирма *KUKA* с товароносимост *125-150 кг*. Нови тези роботи струват средно около *80-100 хиляди евро*, а на вторичния пазар могат да се намерят на *10-15 пъти* по-ниска цена.

Рециклирането на този тип индустриални изделия в точния смисъл на думата е нецелесъобразно, защото те по принцип са запазили в голяма степен своята функционална годност, особено като механична конструкция. Един такъв робот е с тегло около 1100 кг., с високотехнологични алуминиеви отливки, прецизни редуктори, серводвигатели и др., които не е целесъобразно да се предават на скрап за претопяване.

Като резултат от изпълнението на задачите може да се направи следното заключение: **постигнати са поставените задачи, реализирана е висока функционалност на робота и възможност за адаптиране към различни приложения.**

Реинженерингът на *ИУР* изисква инспекция на механичната конструкция, модернизация на хардуера и разработването на нов софтуер и интерфейс подходящ за пренасочването на този ресурс към други индустрии като:

- металургия;
- химия;
- енергетика;
- транспорт;
- складово стопанство;
- спомагателни дейности в индустрията и други.

Освен чисто икономическия ефект от реинженеринга магат да се очакват и косвени ползи, като например:

- Обучение, чрез реинженеринг на специалисти и докторанти от *ВТУ* и фирми в България за повишаване на експертния и иновативния потенциал в областта на роботиката и мехатрониката в промишлено изостанали сектори. Обучението включва изследване на механичната конструкция на универсални роботи, електрическите характеристики на задвижванията, сензорите за обратна връзка, анализ на математическия апарат, с който се решават правата и обратната задача на кинематиката при управлението на индустриални роботи.

- Разработване на нов специализиран софтуер за мехатронни системи за автоматизация на производството на база задания от индустриални предприятия и технически университети.
- Създаване и верифициране на методики и технологии за иновативност. В процеса на разработката ще се използват съвременни мехатронни подходи за функционално-структурен и динамичен анализ на модулите и системата като цяло, компютърно (*CAD/CAM/CAE системи*) моделиране, метода на *„крайните елементи“* и други съвременни методики, което ще доведе до натрупването на *„ноу-хау”* в персонала на университетите и фирмите.
- Енергоефективното и екологично чистото оползотворяване на вторичния пазар на роботи, използвани главно в автомобилостроенето и насочването им след модернизация в нови специфични индустриални области.
- Оптимизация на разходите и повишаване на производителността в предприятията. Резултатите от комерсиализацията на продукта могат да бъдат рационално използвани в България и региона, където приложението на универсални роботи е затруднено поради високата цена и липсата на инвестиции. По този начин при много по-малки разходи индустриалните предприятия ще повишат значително своята производителност, а от там и своята конкурентоспособност.

6. Оптимизации и иновации при реинженеринг на индустриални роботи

6.1. СИСТЕМА ЗА 3D СИМУЛАЦИЯ И OFFLINE ПРОГРАМИРАНЕ

При изграждането и програмирането на роботизирани системи за автоматизация неоценимо предимство е възможността за предварително тестване на цялостната система в рамките на виртуална среда, която дава възможност за безопасно откриване на потенциални грешки и пълна проверка на логиката и извършваните от ИУР движения.

За решаването на тази задача е разработена специализирана система за симулация и 3D визуализация. Основно предимство на тази система е работата и с реалните модули за реализация на машинната логика, такива каквито работят и на реалната система за управление. Единствената разлика е компилацията за процесорната архитектура на която работи средата за симулация. В конкретния случай модулът за машинна логика е компилиран за архитектура **x86_64,** докато в реалната система този модул е компилиран за архитектура **armv7**.

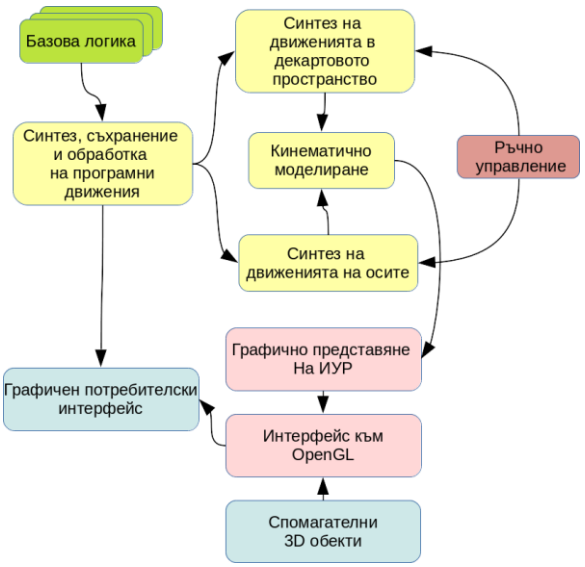
Системата за симулация е изградена от следните основни модули:

- Базова логика - този модул представлява пълно копие на ниво изходен код на съответния модул в реалната система за управление. Проектиран е като динамично зареждащ се програмен блок и реализира основната логика на процеса. Зарежда се този код, който отговаря за конкретната реализация (например логика за обслужване на машина за леене на алуминиеви детайли, система за палетизация и т.н.)
- Синтез, съхранение и обработка на програмни движения - статично реализиран аналогично на реалната системата
- Синтез на движенията в декартовото пространство - статично реализиран аналогично на реалната системата
- Синтез на движенията на осите - статично реализиран аналогично на реалната системата
- Кинематично моделиране - статично реализиран аналогично на реалната системата
- Графично представяне На ИУР – този модул генерира графично представяне на индустриалния робот във вид подходящ за 3D визуализация чрез OpenGL библиотеката
- Графичен потребителски интерфейс – реализира голяма част от функциите, реализирани в реалната система за управление, като освен тях предоставя необходимите функции за графичното изграждане на цялостната 3D сцена, структурирането на цялата информация под формата на проект (3D сцена, потребителска програма, параметри на индустриалния универсален робот и неговото графично представяне)
- Спомагателни 3D обекти – позволява въвеждането и редактирането на спомагателни обекти във виртуалната сцена, като поддържа основни примитиви (куб, конус, цилиндър, сфера), както и предварително моделирани 3D обекти, чрез формата STL.
- Ръчно управление – предоставя интерфейс за директна работа с разработения и подаден за патент пулт за ръчно управлени

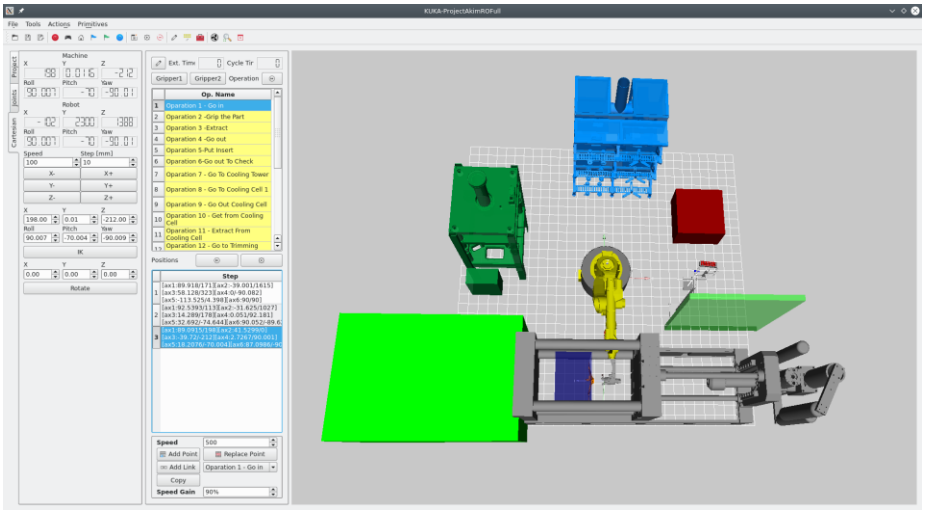
Блоковата схема на на системата за симулация е фигура 267.

На фигури 268, 269, 270 и 271 е показана симулация на леярска клетка с голяма степен на автоматизация. Тук освен изваждането на детайл от леярската машина (фигура 268) е автоматизирано и захващането, и предварителното поставяне на спомагателен детайл във формата (фигура 269), подредбата и охлаждането в специализиран охладителен шкаф (фигура 270) и поставянето на охладения детайл във обрязваща преса (фигура 271).

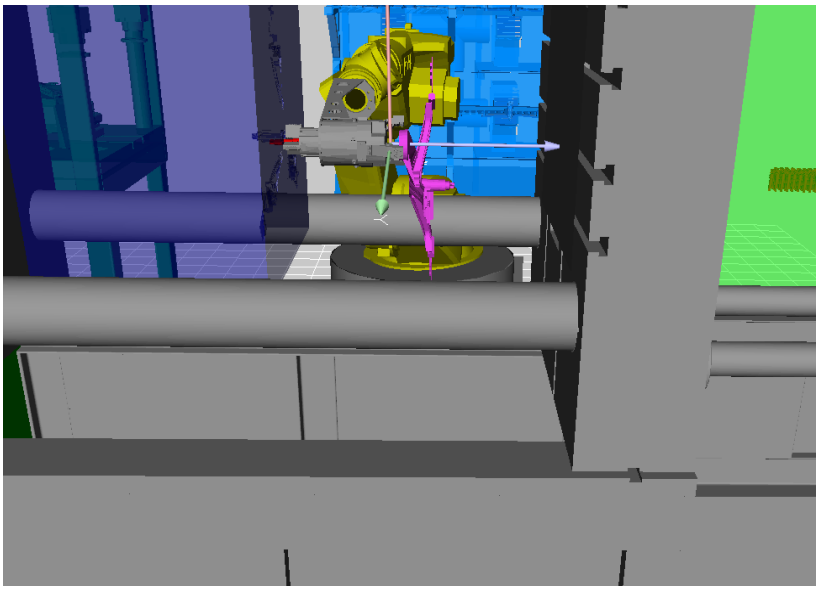
На фигури 272 и 273 са показани специфични за конкретния сценарий потребителски интерфейсни компоненти за контрол (фигура 272) и конфигуриране (фигура 273) на процеса.



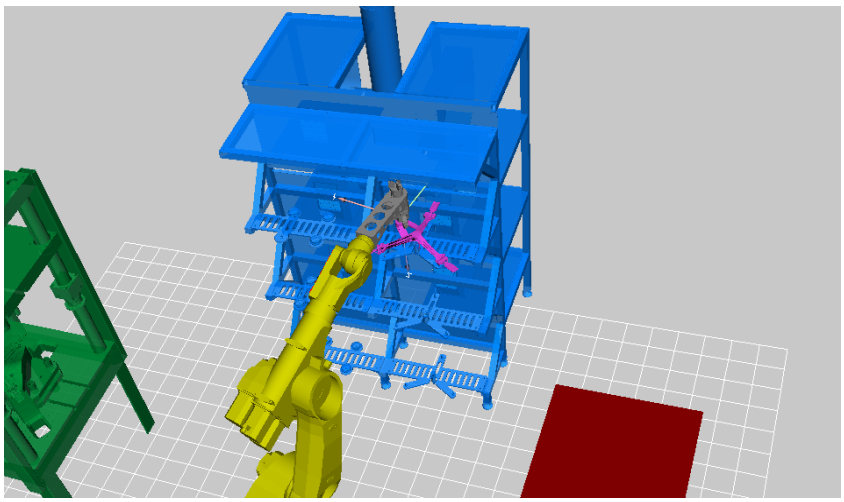
Фиг. 267 Блокова схема на система за симулация



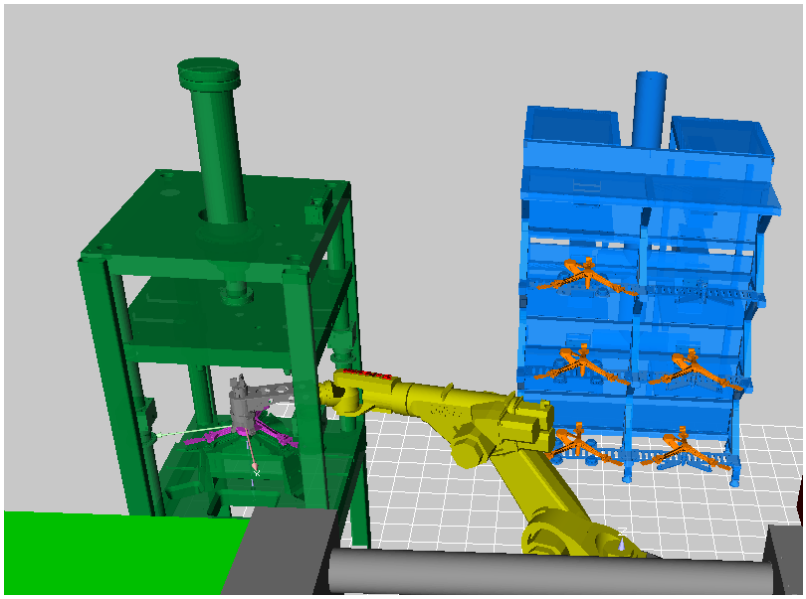
Фиг. 268 Симулация на леярска клетка с голяма степен на автоматизация



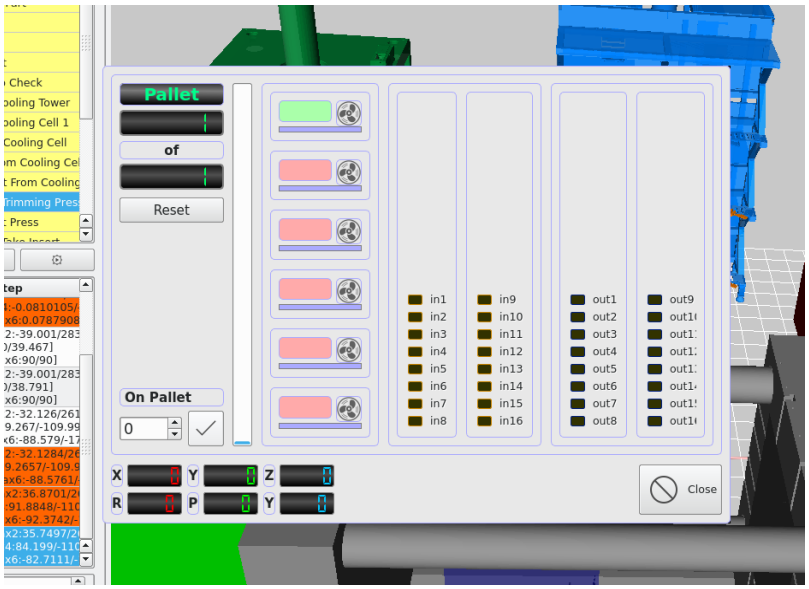
Фиг. 269 Поставяне на спомагателен детайл във формата



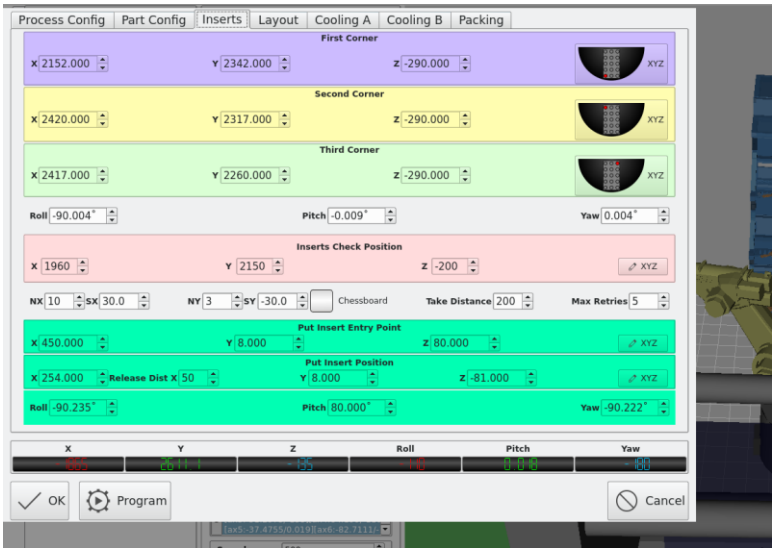
Фиг. 270 Подреждане на детайлите в охлаждащ шкаф



Фиг. 271 Поставяне на детайл в обрязваща преса

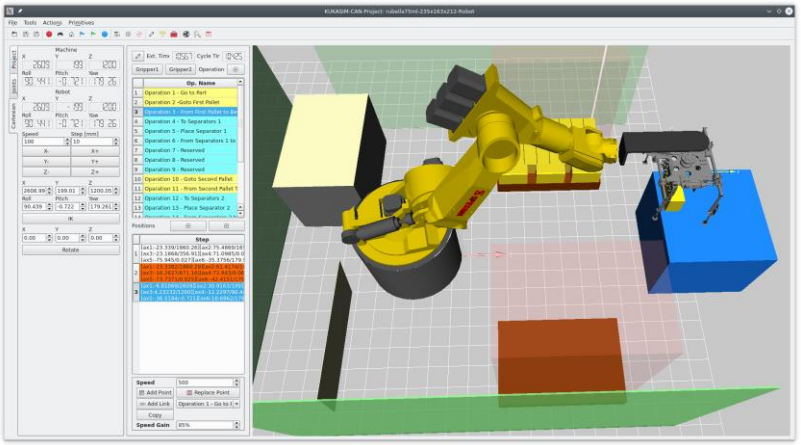


Фиг. 272 Интерфейс за контрол на процеса

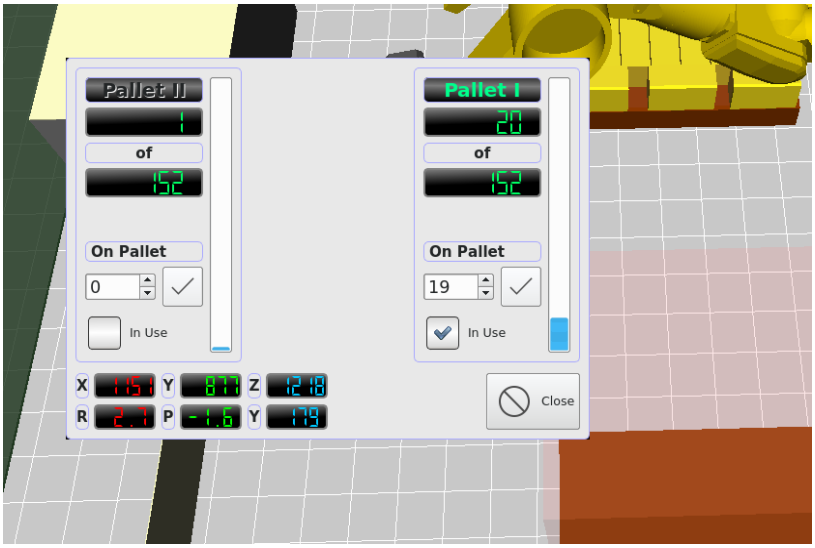


Фиг. 273 Интерфейс за конфигуриране на процеса

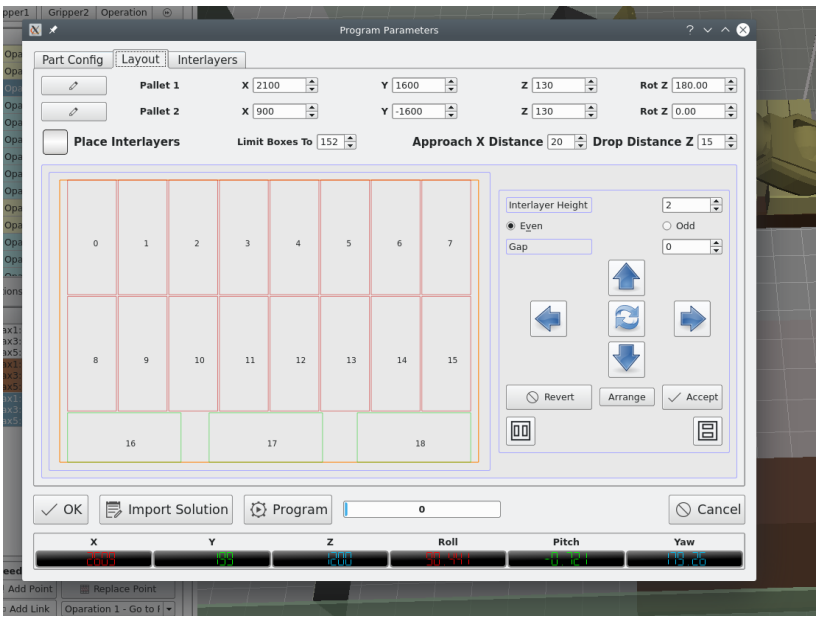
На фигура 274 е показана симулация на палетизиращ робот, като на фигура 275 е показан специализирания потребителски интерфейс за контрол на процеса, а на фигура 276 интерфейса за конфигуриране на процеса.



Фиг 274. Симулация на роботизирана палетизираща клетка



Фиг. 275 Интерфейс за контрол на процеса



Фиг. 276 Интерфейс за конфигуриране на процеса

От показаните по-горе илюстрации се вижда, че системата за симулация предоставя необходимата гъвкавост за симулиране на разнообразни приложения на индустриални роботи в практиката. Всички изброени симулации са реално реализирани и въведени в експлоатация.

6.2. БЕЗЖИЧЕН ПУЛТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Във връзка с работата по дисертацията и по реинженеринга на индустриални роботиш е регистрирана заявка за патент „Безжичен пулта за управление“, [83]:

Област на техниката

Изобретението се отнася до безжичен пулт за ръчно управление на периферни устройства, обслужващи технологични машини и по-специално за управление на леярски роботи/манипулатори за обслужване на леярски хоризонтални машини за леене под налягане на алуминиеви и магнезиеви сплави: дозиращ манипулатор за захранване на леярската машина с разтопена сплав; манипулатор за обдухване и обмазване на пресформата на машината; манипулатор за изваждане на отливките от машината.

Предшестващо състояние на техниката

Известни са пултове за ръчно управление с кабелна връзка към системите за управление на промишлените роботи/манипулатори за управление на скоростта и/или позицията посредством отделни бутони на пулта, [84]. Пултовете са снабдени още с защитни механизми - авариен стоп бутон и тристепенен бутон за разрешение на движението. Съществуват и пултове с безжична комуникация със системата за управление и с възможност за плавно управление на скоростта на движение посредством ръчен ротационен енкодер, [85]. Съществуващите решения съдържат елементи за визуална и звукова сигнализация за състоянието на управлявания промишлен робот/манипулатор, както и специализирани клавиатурни модули.

Част от известните пултове за управление нямат възможността за безжична връзка със системата за управление, и за плавно задание за скорост и посока на движението в ръчен режим, но осъществяват постоянен контрол на безопасността чрез мониторинг на аварийния стоп бутон и тристепенния бутон за разрешаване на движението, [86]. Друга част от известните пултове за дистанционно управление са с безкабелна връзка и плавно управление на скоростта и посоката на движението чрез ръчен ротационен енкодер, но нямат

елементите за безопасност - авариен стоп бутон и тристепенен бутон за разрешаване на движението, [87]. Съществуващите пултове нямат и възможността да управляват едновременно различни типове роботи/манипулатори. Друго несъвършенство на известните пултове, предназначени за управление на промишлени роботи/манипулатори е, че те съчетават функции за управление и програмиране, което води до големи, ергономично неподходящи размери, което усложнява боравенето с тях. Съществен проблем при известните безжични пултове е и батерийното захранване, което или изисква честа смяна на батериите или зареждането им чрез кабелна връзка.

Техническа същност на изобретението

Задачата на изобретението е да се създаде безжичен пулт за управление на леярски роботи/манипулатори, който подобно на известните пултове има възможност да подава управляващи сигнали към системата за управление, да следи системите за сигурност и да предоставя визуална и звукова информация на оператора, но с възможност да съчетава плавното управление на скоростта на движение с безжично предаване на данните и състоянието на елементите за безопасност - авариен стоп бутон и тристепенен бутон за разрешаване на движението, като същевременно дава допълнителна функция за дистанционно управление на 1 до 3 робота/манипулатора едновременно, и за безжичен заряд на батерийното захранване.

Съгласно изобретението задачата е решена чрез пулт за управление на леярски роботи/манипулатори, които се състои от два основни възела: ръчен пулт за управление и приемник-контролер.

Ръчният пулт за управление е съставен от първи микроконролер, към който еднопосочно са свързани: ръчен ротационен енкодер; тристепенен бутон разрешение на движението и авариен стоп бутон; блок батерийно захранване, свързан с блок за безжично зареждане на батерията. Първият микроконролер е двупосочно свързан с: първи радио модул; клавиатура, дисплей и зумер за звукова сигнализация.

Приемникът – контролер е съставен от втори микроконролер, двупосочно свързан с: втори радио модул; спомагателни цифрови входове и изходи; комуникационен интерфейс CANBUS и комуникационен интерфейс MODBUS, и еднопосочно свързан с блок контакти за разрешение на движението и контакти за авариен стоп;

Предимствата на предложеният пулт за управление на леярски роботи/манипулатори съгласно изобретението са възможността за плавно управление на скоростта на движение и позиция на 1 до 3 изпълнителни механизми, посредством ръчен ротационен енкодер чрез безжична връзка, съчетано с безжично предаване на състоянието на контролните елементи, свързани със безопасността на работа - тристепенен бутон разрешение на движението и авариен стоп бутон, компактен дизайн, елементи за визуална и звукова сигнализация, както и безжично зареждане на батерията.

Пояснения на приложените фигури

Примерно изпълнение на изобретението е показано на приложената фигура 277, която представлява схема на предложения пулт за управление на леярски роботи/манипулатори. На фигура 278 е показан външния вид на ръчен пулт за управление **А**.

Пример за изпълнение на изобретението

Пултът за управление на леярски роботи се състои от ръчен пулт за управление **А** и приемник – контролер **Б**. Ръчният пулт за управление **А** е съставен от първи микроконролер 1, двупосочно свързан с: първи радио модул 2; клавиатура индикация зумер 5 и еднопосочно свързан с: ръчен ротационен енкодер 3; тристепенен бутон разрешение на движението и авариен стоп бутон 4; блок батерийно захранване 6, свързан с блок за безжично зареждане на батерията 7. Приемникът – контролер **Б** е съставен от втори микроконролер 8, двупосочно свързан с: втори радио модул 9; спомагателни цифрови

входове и изходи 11; комуникационен интерфейс CANBUS 12, комуникационен интерфейс MODBUS 13, и еднопосочно свързан с блок контакти разрешение на движението и авариен стоп 10.

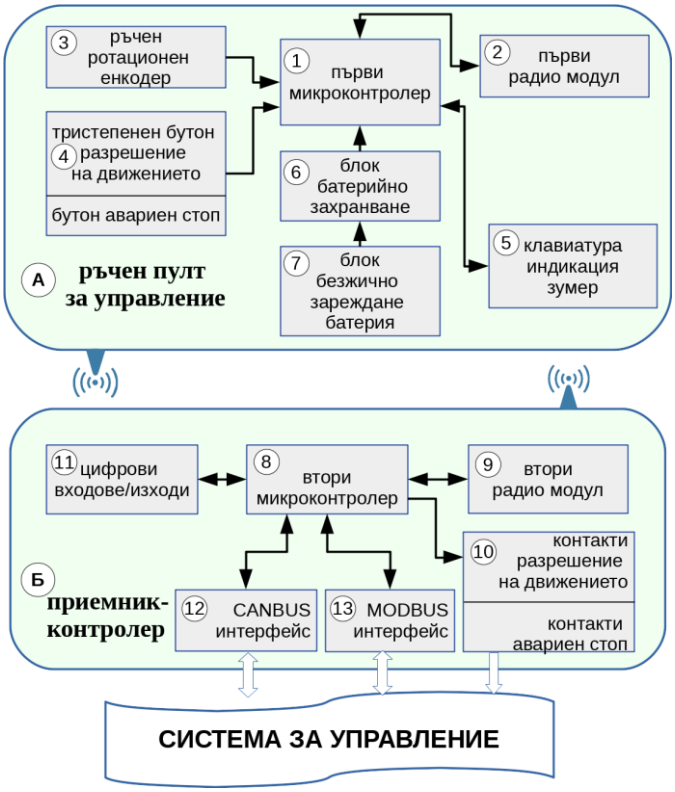
Действието на пултът за управление на леярски роботи/манипулатори съгласно изобретението е следното.

Първият микроконролер 1 на ръчния пулт за управление **А**, осигурява обработка на предаването и визуализацията на данните, предоставяйки на оператора възможността за избор на активен робот/манипулатор, активна ос за управление и режим на движението - в пространството на активните оси или в декартова координатната система, посредством блок клавиатура и индикация зумер 5. Съобразно избраната конфигурация, визуализирана на индикацията, първият микроконролер 1 следи за състоянието на фазите на ръчния ротационен енкодер 3 и формира пакет с данни за задание за скорост, като същевременно следи и състоянието на тристепенния бутон за разрешаване на движението и аварийния стоп 4. Така формираният пакет данни се криптира и предава посредством първия радио модул 2 към приемника-контролер **Б**. От една страна приемникът-контролер **Б** приема и декриптира изпратения пакет посредством втория радио модул 9, установява състоянието на блока контакти разрешение на движението и авариен стоп 10, съгласно получената информация и състоянието на спомагателните входове на блока цифрови входове и изходи 11. Получените данни се обработват и съхраняват във втори микроконтролер 8 и се изпращат към системата за управление чрез комуникационен интерфейс CANBUS 12, а съхраненото текущо състояние може да се изпрати при поискване от управляващата система и чрез комуникационен интерфейс MODBUS 13. От друга страна приемникът-контролер **Б** получава и съхранява информация за текущото положение на осите на активния робот/манипулатор и състоянието на системата за управление посредством комуникационен интерфейс CANBUS 12 и/или комуникационен интерфейс MODBUS 13 и я изпраща към ръчния пулт за управление посредством втория радио модул 9 за визуализация и звукова сигнализация.

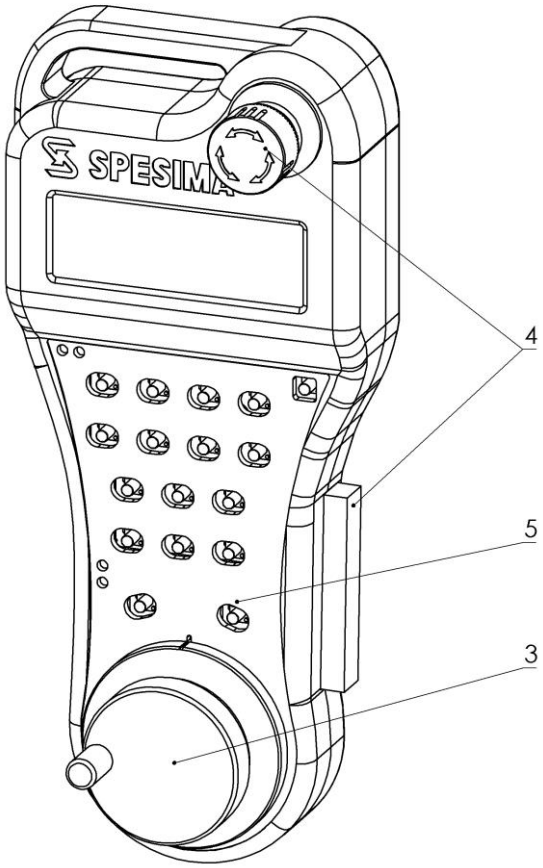
Автономното захранване на ръчния пулт за управление се осигурява от блок батерийно захранване 6 на основата на литиево-полимерна батерия 7, която от своя страна се зарежда посредством блок за безжично зареждане на батерията 7.

Патентни претенции

Безжичен пулт за управление, който се състои от ръчен ротационен енкодер, бутон авариен стоп, тристепенен бутон за разрешаване на движението, два радио модула, модул клавиатура, дисплей и зумер, блок батерийно захранване и микроконтролери, характеризиращ се с това, че в ръчен пулт за управление **А** е включен първи микроконролер (1), еднопосочно свързан с: ръчен ротационен енкодер (3); тристепенен бутон разрешение на движението и авариен стоп (4); блок батерийно захранване (6) и блок безжично зареждане на батерията (7), свързан с блок батерийно захранване (6), и двупосочно свързан с: първи радио модул (2); клавиатура и индикация (5); а също така включва приемник – контролер **Б**, съставен от втори микроконролер (8), двупосочно свързан с: втори радио модул (9); спомагателни цифрови входове и изходи (11); комуникационен интерфейс CANBUS (12) и комуникационен интерфейс MODBUS (13), и еднопосочно свързан с блок контакти разрешение на движението и авариен стоп (10).



Фиг. 267



Фиг. 268

Научни, научно-приложни и приложни приноси в дисертацията:

В представената дисертационна работа е спазван следният подход за разработка от теоретични изследвания към практическа реализация:

„обзор – анализ – моделиране – синтез – тестване – верификация“

Приносите в дисертацията са с предимно научно-приложен и приложен характер:

Направен е детайлен обзор, анализ и систематизация на мехатронни роботизирани системи

Извършено беше детайлно проучване и инженерно изследване на механичната хардуерната и софтуерната система на избрания типопредставител на *ИУР* – робот *KUKA KR 150*.

Извършен е анализ на кинематични и динамични модели на изследвания типопредставител.

Извършен е анализ на основните параметри на хардуерната конфигурация и софтуерното осигуряване.

Разработени са методики за инспекция на механичната конструкция, хардуерната конфигурация и софтуерното осигуряване.

Изследван е динамичният модел на избрания робот.

Представен е математическият апарат за решаване на правата и обратната задача на кинематиката за изследвания представител на *ИУР*.

Създадени са методики за изследване на механиката, хардуера и софтуера на *KUKA KR 150*.

Извършено е изследване на механичната конструкция, хардуера и софтуера на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* включващо изследване на кинематичните параметри и динамиката на робота, което удостовери надеждността на извършените операции по обновяването на механичните му компоненти и конструкция.

Извършено е изследване на разработения хардуер на функционално действащия лабораторен модел на реинженирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150,* което включва изследване на динамичните характеристики на шестте оси на робота и неговия интерфейс и комуникационен модул. Изследванията удостовериха, че:

- сервозадвижванията осигуряват необходимата динамика, така че роботът да покрива всички изисквания към неговата функционалност;
- сервозадвижванията имат запас по максимален ток (възможност за по-голямо претоварване), което осигурява и гарантира постигането на високи динамични параметри при ускоряване и спиране, както и възможността за работа с по-голяма инерционна маса (по-голям товар);

- сервозадвижванията практически поддържат зададената позиция при промяна на натоварването и/или скоростта, което показва тяхната адекватна реакция, работейки с управление по позиция;
- е постигнато оптимално управление на шестте оси на робота, което позволява използването му за различни индустриални приложения.

Извършено е изследване и верификация на резултатите от реинженеринга както следва:

– Изследване на механичната конструкция на избрания типопредставител след реинженеринг

– Проверка на кинематичните параметри на *ИУР*

– Проверка на динамичните характеристики на *ИУР*

–Изследване на хардуерните решения на *ИУР* вследствие на извършения реинженеринг

– Изследване на сервозадвижвания и сензори

– Изследване на интерфейса и комуникацията

– Изследване на функционалността на новосъздадения софтуер

– Изследване функционалността на софтуера

– Изследване на потребителския интерфейс

– Верификация на методиките за реинженеринг вследствие на извършените дейности

– Верификация на методиката за възстановяване на механичната конструкция

– Верификация на методиката за оценка на хардуерната система за управление

– Верификация на методиката за оценка на софтуерното осигуряване

Извършено е верифициране на резултатите от проведените изследвания, съгласно методиките за реинженеринг на *ИУР*

Извършено е изследване на функционалността на разработения софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания типопредставител на *ИУР – KUKA KR-150*. Изследването показа действието и работата на базовите програмни модули и на потребителските програми за движение на робота.

Извършена е верификацията върху обновената механична конструкция и разработения хардуер и софтуер за управление на функционално действащия лабораторен модел на реинженерирания робот *KUKA KR-150* на база на създадени и утвърдени методики за верификация.

Извършена е оптимизация на процедурите по симулиране и оф-лайн програмиране на роботи, подложени на реинженеринг

Предложено е иновативно решение на безжичен пулта за управление, защитено чрез регистрирана заявка за патент.

Предложена е концепция за комерсиализация на продукта, в резултат на дейностите по *РУР*.

Литература:

1. Карастоянов Д., Управление на роботи и на други мехатронни системи., Акад. Издателство „Марин Дринов”, София, 2010

2. Karastoyanov D., Nachev G., Adaptive Control of Industrial Robot for Arc Welding., 9th IFAC World Congress, Budapest, Hungary, July 2-6, 1984, vol. VI, 50-55

3. P. Kah, M Shrestha, E Hiltunen and J Martikainen39., Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications International Journal of Mechanical and Materials Engineering (2015) 10:13 DOI 10.1186/s40712-015-0042-y

4. Laiping, C. Shanben and L. Tao, “The modeling of welding pool surface reflectance of aluminum alloy pulse GTAW,” Materials Science and Engineering: A, vol. 394, no. 1–2, p. A 320–326, 2005

5. Pires, JN, Loureiro, A, Godinho T, Ferreira P, Fernando B, Morgado J. (2003). “Welding robots,” IEEE Robotics & Automation Magazine, 45–55.

6. Cui, H, Dong, J, Hou, G, Xiao, Z, Chen, Y, & Zhao, Z. (2013). “Analysis on arcwelding robot visual control tracking system”, in 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE).

7. Pires, JN, Loureiro, A, & Bölmsjo, G. (2006a). Welding robots: technology. London: System Issue and Application. Springer-Verlag. p. 74.

8. Cary, HB, & Helzer, SC. (2005). Modern welding technology. New Jersey: Pearson Education. pp. 326–329.

9. Tsai, L-W. (2000). Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators (p. 19). New York: Wiley & Sons.

10. Ross, LT, Fardo, SW, Masterson, JW, & Towers, RL. (2010). Robotics: theory and industrial applications (p. 47). Illinois: The Goodheart-Willocx Company, Inc.

11. Dinham, M, & Fang, G. (2013). Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(5), 288–301.

12. Robot Welding, “Key issues for robotic welding,” [Online]. Available: http:// www.robotwelding.co.uk/key-issues.html. [Accessed 4 September 2013].

13. Rochelle, B. “Think before you integrate (robotic welding),” thefabricator.com, 1 March 2010.

14. Robotics Bible, “Arc welding robot,” 11 September 2011. [Online]. Available: http://www.roboticsbible.com/arc-welding-robot.html. [Accessed 12 May 2013].

15. Servo Robot Inc. (2013). Arc seam finding. [Online]. Available: http:// www.servorobot.com/manufacturing-solutions/arc-seam-finding/. [Accessed 9 December 2013].

16. Машини • Технологии • Високотехнологично машиностроене - специално издание на сп. Инженеринг ревю • 11.07.2017 http://www.engineering-review.bg/bg/robotizirani-tehnologii-v-mashinostroeneto/2/3663/

17. http://automation-bulgaria.com/product/619-nov-scara-robot-sr-3ia

18. http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-910sc

19. http://automation-bulgaria.com/search.aspx?q=%F0%EE%E1%EE%F2%E8&o=def&see=all

20.https://www.fanuc.eu/bg/bg/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8-%D1%81-%D0%BA%D0%BB%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B8/vullings

[21] Аврамов, И., Гълъбов, В., Николов, Н. Приложения на мехатронно-адекватен подход при изследване и проектиране на роботи, пренасящи течни материали, Годишник на ТУ - София, том 50, кн. 3, 1999, с. 94-101.

[22] Гълъбов, В., Михайлов, В., Аврамов, И., Мехатронна спецификация на основни задачи за синтез и кинематично управление на механизми в специалната роботика, Механика на машините, № 14, 1996, с. 89-101.

[23] Гълъбов, В. Структурно-метричен синтез на механизми, Дисертация за д.т.н - автореферат, ТУ-София, 1998, 491 с.

[24] Козырев, Ю.Г. Промишленные роботы (справочник - 2-е изд.). Москва, Машиностроение, 1988. 392 с.

[25] Пейсах, Э. Е. Структурный синтез плоских шарнирных механизмов: современное состояние и актуальные проблемы. Механика на машините, № 75, 2008, с. 87-93.

[26] Славков, В., Николов, Н., Гълъбов, В. Функционална типология и структурна класификация на леярски дозиращи роботи. Механика на машините, № 50, 2004, с. 64-71.

[27] Славков, В., Гълъбов, В. Мехатронен подход при изследване, проектиране и разработка на специализиран робот. Автоматика и информатика, № 4, 2005, с. 46-50.

[28] Angeles, J., Hornel, G., Kocs, P., Computational Kinematics, Kluwer Academic Bublishers, 1993, p. 320.

[29] Avramov, I., Michailov, V., Galabov, V. Computer Aided Design of Mechanisms Based on Some Mechatronics Ideas. Mechatronics - the basis for now Industrial Developmen - ed. M.. Acar, Joint Hungarian - British Mechatronics Conference, Budapest, Computational Mechanics Publications, 1994, pp. 451-460.

[30] Balavessov, V., Galabov, V., Avramov, I. Deyanov,Y., Adaptive Motion Control of Mechatronic Systems, Proc. of 2-nd Intern. Conf. on Recent Advances Mechatronics ICRAM'99, 24-26 May, Istanbul, 1999, pp. 153-158.

[31] Buur, J., Lectures on Mechatronics Design Methodology, NATO-ASI, Mechatronics Design in the Textile Industry Engineering, Side, Turkey, 1992.

[32] Chew, M., Chen, S. N. T., Issa, G., F., Kinematic Structural Synthesis of Mechanisms Using Knowladge - Based Systems, J. of Mechanical Design, Vol. 117, March, 1995, pp. 96-103.

[33] Crossley F. R. E., The Permutation of Kinematic Chains of Eight Members or Less from the Graph Theoretic Viewpoint, Developments in Theoretical and Applied Mechanics, Pergamon Press, Oxford, Vol. 2, 1965, pp.

[34] Erdman, A. G.,(editor) Modern Kinematics, John-Wiley & Sons, Inc. New York, 1993, p. 604

[35] Galabov, V. Structure, Synthesis and Application of Q- manipulators. Proc. 6 -th World Congress on the TMM, Vol. 2, 1983, pp. 1007-1010.

[36] Galabov, V., Avramov, I., Michailov, V., Sotirov, Z., Deanov, J. Type - Dimensional Synthesis of Mechanisms for Robot- Manipulators. Proc. of 6 -th Intern. Machine Design and Production Conference (UMTIC '94), Ankara, 1994 , pp. 159-170.

[37] Galabov, V., Avramov, I., Sotirov, Z., Michailov, V. Functional Structure Synthesis of Mechanisms. Proc. of the Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Vol. I, Milano, Italy, 1995a, pp. 320-326.

[38] Galabov V. B., Avramov I. I., Sotirov Z. M., Michailov V. K., Deianov J. M., Mechatronic Concept in the Structural and Functional Design of Mechanisms, Proc. of International Conference on Recent Advances in Mechatronics, Vol.II , Istanbul, Turkey, August 14-16, 1995б, pp. 784-789.

[39] Galabov, V., Avramov, I., Michailov, V., Botev, R., Concurrent Formulation of Basic Problems in Synthesis and Control of Manipulating Mechanisms used in Task-Specific Robots, Proc. of Second ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Vol.1, Wienna, 1996, pp. 247-251.

[40] Galabov, V., Rousev, R., Shivarov, N. Planning of Movement Laws Using Trigonometric Polynomials. *Bulg. Academy of Sciences, Theor. & Appl. Mechanics*, No 3, 2010, pp. 3-12.

[41] Galabov V., Slavkov, V., Savchev, S., Todorov, T. Title Planning of Motion Laws Using Power-Trigonometric Polynomials (под печат).

[42] Greenough, J. D, et al , Design of Hibrid Machins, Proc. of the IX Congr. of TMM, Milano, Vol.4, 1995, pp. 2501-2505.

[43] Hirose, S., Machine Design in the Mechatronics Age, Journal of Robotics & Mechatronics, Vol.1, 1989, pp. 83-91.

[44] Iserman, R., On the Design and Control of Mechatronic Systems - A Survey, IEEE Transactions of Industrial Electronics, Vol. 43, No 1, 1996, pp.4-15.

[45] Kajitani, M. A., A Concept of Mechatronics, Jof Robotics and Mechatronics,Vol.1, No.1, 1989.

[45] Konstantinov, M. , Mechatronics in Robotics, Proc. of the 7th CISM-IFTOMM Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators , RoManSy 7 , Hermes, Paris , 1990, pp. 252-263.

[46] Luck, K., K-H. Modler, Synthesis of Guidance Mecahnisms, Mecanism and Machinin Theory, Vol. 29, No 4, 1994, pp. 525-533.

[47] Michailov, V., Galabov, V., Avramov, I. Software Tools For CAD of Mechanism - Development and Application in Mechatronic Environment. Engineering Mechanics, Assoc. for Eng. Mechanics, Vol. 3, No 2, Czech. Republic, Brno, 1996, pp. 97-102.

[48] Seireg, A., A Concurrent Engineering Approach to the Synthesis of Toothed Bodies, Proc. of Intern. Congress - Gear Transmitions, Sofia, Vol. 1, 1995, pp. 25-29.

[49] Shivarov, N., Galabov, V., Kinematics of SCARA Robots. *Проблеми на техническата кибернетика и роботика,* БАН, София, № 59, 2008, с. 51-59.

[50] Shkenderov, I., Shivarov, N., Galabov, V. Synthesis of Pover-Polynomial Motion Laws. *Проблеми на техническата кибернетика и роботика,* БАН, София, № 59, 2008, с. 74-81.

[51] Stadler W., Analytical Robotics and Mechatronics, McGraw-Hill, Inc. 1995, p. 570

[52] Tischler, C. R., Samuel, A. E., Hunt, H. K., Kinematic Chains for Robot Hands - I Orderly Number Synthesis, II - Kinematics Constrains, Classification, Connectivity and Actuation, Mech. Mach. Theory, Vol. 30, No 8, 1995, pp. 1193-1239.

[53] Лилов Л, Г Бояджиев (1997) Динамика и управление на манипулационни роботи, Университетско издателство "Св. Кл. Охридски", София.

[54] Чешанков Б (1982) Оптимално управление, Технически Университет, София.

[55] Chernousko, F. L.;, "Models and optimal control of robotic systems," in *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, vol. Volume 143, 2005, pp. pp 1-22.

[56] Chernousko F, L Akulenko and N Bolotnik (1989) Time-optimal control for robotic manipulators, In Journal of optimal control applications & methods, vol.10.

[57] Corke, Peter;, Robotics, Vision and Control, B. Siciliano, O. Khatib and F. Groen, Eds., Springer.

[58] Fagg A, A Barto, and J Houk (1998) Learning to reach via corrective movements, Paper presented at the 10th Yale workshop on adaptive and learning systems, New Haven, CT, pp. 179-185.

[59] Hagan Martin, Howard Demuth and Orlando De Jesús Man (2002) Introduction to the use of neural networks in control systems, In International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 12, No. 11, pp. 959-985.

[60] Karniel A and G Inbar (1997) A model for learning human reaching movements, In Journal of Biological Cybernetics, Vol. 77(3), pp 173-183.

[61] Kiriazov P (2004) Biology-consistent approach for iterative learning control of robotic systems, Paper presented at First International Industrial Conference Bionik2004, Hanover, April 22-23, pp 119-126.

[62] P. Kiriazov, I.Veneva, S. Karastanev, Controllability criteria in designing human assistive devices, Series on Biomechanics, vol. 26, No 1-2, (2011), 71-76

[63] Kiriazov, P.; Karastanev, S.; Delchev, K., "Dynamic Parameter Identification and Motion Optimization of Lifts with Processors," in *Proceedings of the 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Varna, September, 2001.

[64] Kiriazov P (2002) Dynamics-based motion synthesis by simple learning control, Paper presented at Eurographics 2002 (on CD), Saarbruecken, Germany, http://www.eg.org/EG/DL/Conf/EG2002/short

[65] Kiryazov, K.; Kiryazov, P.;, "Efficient learning control of point-to-point robot motion," *Mobile*

Robotics: Solutions and Challenges, no. ISBN: 9789814291269, pp. pp. 1055- 1063, 2009.
[66] Kiriazov, P., Nikolova, G., Veneva, I., Intelligent Control Design in Robotics and Rehabilitation, Lecture Notes in Computer Science: Intelligent Robotics and Applications Part II, vol. 7102/2011, pp. 307-316, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011) (ISBN: 978-3-642-25488-8).

[67] Kirk, D E (1970) Optimal control theory: an introduction, Prentice Hall.

[68] Kucuk, Serdar; Bingul, Zafer;, "Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics," *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, no. ISBN: 3-86611-285-8, 2006.

[69] Kuka, "Kuka Arm Tutorial," Kuka Roboter GmbH, 2013.

[70] Kuka, "System Software 5.5 "Operating and Programming Instructions for System Integrators"," Kuka, 2010.

[71] Lunze J (1992) Feedback control of large-scale systems, Prentice Hall, UK.

[52] Marinov, P and Kiriazov, P (1992) Point-to-point motion of robotic manipulators: dynamics, control synthesis and optimization, IFAC symposia series, Robot Control 1991, Eds. I Troch & K Desoyer, , pp 149-152.

[73] Murray, Richard M.; Li, Zexiang; Sastry, S. Shankar;, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, 1994.

[74] Nabtesco, "Precision Reduction Gear RV - E - Series (C - Series), Original Series," Nabtesco, 2015.

[75] Reister, D B and F G Pin (1994) Time-optimal trajectories for mobile robots with two independently driven wheels, In Int Journal of Robotics Research, Vol. 13, No.1, pp 38-54.

[76] Schaal S (2002) Learning robot control. In: Arbib MA (ed) The handbook of brain theory and neural networks, 2nd Edition. MIT Press, Cambridge, MA, pp 983-987.

[77] Shabana, A., Computational Dynamics, John Wiley & Sons Inc., 1994.

[78] Sikorski K (1982) Bisection is optimal, Numerische Mathematik, Vol. 40, pp 111-117.

[79] Sutton R and A Barto (1998) Reinforcement learning: an introduction. cambridge, MA: MIT Press.

[80] Tatarnikov, Denis A.; Tsapko, Gennady P.;, "Inverse Kinematics Analysis KUKA KR Agilus Robot," Tomsk, Russia.

[81] Vrahatis M and Iordanidis K (1986) A rapid generalized method of bisection for solving systems of nonlinear equations, Numerische Mathematik, 49, No. 2-3, pp 123-138.

[82] Yusupov R and E Rosenvasser (1999) Sensitivity of automatic control systems. CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C.,.436 p.

[83] Карастанев С., Безжичен пулта за управление., Заявка за патент на Република България, рег. № 112817 от 17.10.2016

[84] https://euchner-usa.com/pdfs/Catalogs/PendantsHandwheels.pdf

[85] http://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=DIA5ED2140103EN.pdf&p_Doc_Ref=DIA5ED2140103EN

[86] Control System and Teach Pendant For An Industrial Robot https://patents.google.com/patent/US20080255704

[87] Robots and robotic devices –Safety requirements for industrial robots

Публикации на автора във връзка с дисертационния труд:

1. Karastoyanov D., Karastanev S.. Reuse of Industrial Robots. IFAC-PapersOnLine, volume 51, Issue 30, 2018, Elsevier B. V., 2018, ISSN:2405-8963, DOI:10.1016/j.ifacol.2018.11.243, 44-47. SJR:0.26 Без ISI IF – с SJR
2. Gyoshev S., Popov B., Karastanev St.. ICT for 3D modeling and 3D tactile visualization of sites of cultural and historical heritage. Conference proceedings., Croatian society for mechanical technologies, Croatia, 2018, ISSN:1847-7917, 53-56 Без ISI IF и без SJR – индексирано в WoS или Scopus
3. B., Karastanev St.. Renovating of used industrial robots for new purposes. Conference proceedings., Croatian society for mechanical technologies, Croatia, 2018, ISSN:1847-7917, 107-110, Без ISI IF и без SJR – индексирано в WoS или Scopus
4. Karastanev St.. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНДУСТРИАЛНИ РОБОТИ ЗА ПОВТОРНА УПОТРЕБА. Част 1: Изследване на механиката. ROBOTICS, AUTOMATION AND MECHATRONICS ' 18 RAM 2018, Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018, ISSN:1314-4634, 17-22 Национално академично издателство
5. Karastanev St.. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНДУСТРИАЛНИ РОБОТИ ЗА ПОВТОРНА УПОТРЕБА. Част 2: Изследване на управлението. ROBOTICS, AUTOMATION AND MECHATRONICS ' 18 RAM 2018, Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018, ISSN:1314-4634, 23-28 Национално академично издателство
6. Карастанев С., ИНОВАТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА АДАПТИВНО РОБОТИЗИРАНО ЗАВАРЯВАНЕ., XXVII International Scientific and Technical Conference, ADP - 2018., June 21-24th 2018, Publishing House of Technical University of Sofia, 2018, ISSN:13 10 -3946, 272-277 Международно неакадемично издателство
7. Карастанев С., Безжичен пулта за управление., Заявка за патент на Република България, рег. № 112817 от 17.10.2016

Декларация за оригиналност:

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени, при проведени от мен, научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител.

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са цитирани, където е възможно, в изложените референции.

Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:……..
/инж. Стефан Карастанев/