



ЯВОР ПЕТРОВ СОФРОНОВ

**ПРОЕКТИРАНЕ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-
ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И
НАУЧНА СТЕПЕН

“ДОКТОР”

Научни ръководители: *проф. д.т.н. инж. Витан Борисов Гълъбов*
проф. д-р инж. Георги Димитров Тодоров

НАУЧНО НАПРАВЛЕНИЕ
5.1 МАШИНО ИНЖЕНЕРСТВО

НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ
**ТЕОРИЯ НА МЕХАНИЗМИТЕ,
МАШИНИТЕ И АВТОМАТИЧНИТЕ ЛИНИИ**

СОФИЯ

2015



ЯВОР ПЕТРОВ СОФРОНОВ

**ПРОЕКТИРАНЕ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-
ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И
НАУЧНА СТЕПЕН
“ДОКТОР”

Научни ръководители: *проф. д.т.н. инж. Витан Борисов Гълъбов*
проф. д-р инж. Георги Димитров Тодоров

Рецензенти: *проф. д-р инж. Иво Кръстев Малаков*
проф. д.т.н. Евтим Венец Захариев

НАУЧНО НАПРАВЛЕНИЕ
5.1 МАШИНО ИНЖЕНЕРСТВО

НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ
**ТЕОРИЯ НА МЕХАНИЗМИТЕ,
МАШИНИТЕ И АВТОМАТИЧНИТЕ ЛИНИИ**

СОФИЯ

2015

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедра „Теория на механизмите и машините” към МТФ при Технически университет – София на заседанието на катедрения съвет, проведено на 20.07.2015 г.

Дисертантът е редовен докторант в катедра „Теория на механизмите и машините” към МТФ при Технически университет – София, където е разработен дисертационният труд.

Дисертацията съдържа 6 основни глави с 73 фигури и 5 таблици, разположени на общо 155 страници, в които се включват 1 страница авторска библиография на статии, доклади изследователски разработки, свързани с дисертацията, 7 страници литература от 133 източника (51 на латиница). Всяка глава завършва с изводи и обобщения. В заключение са обобщени получените резултати и са дефинирани основните научно-приложни и приложни приноси на дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 19.11.2015 г. от 17.30 ч. в зала 2140 на ТУ – София на заседание на научно жури в състав:

проф. д-р инж. Иво Кръстев Малаков	Председател
проф. д-р инж. Георги Димитров Тодоров	Научен секретар
проф. д.т.н. Евтим Венец Захариев	Член
доц. д-р инж. Детелина Стоянова Игнатова	Член
доц. д-р инж. Иван Николов Чавдаров	Член

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно-технологичния факултет на ТУ – София, кабинет 3230.

Автор: Явор Петров Софронов

Заглавие: ПРОЕКТИРАНЕ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ

Технически редактор:

Тираж: 50

Излязъл от печат:

Печатна база на ТУ – София

А. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Европейската и световна тенденция е максимално висок дял от средствата за производство да бъдат снабдени със системи за автоматизация. В частност леярското производство и по-специално машинното леене на алуминиеви сплави предоставя изключително голямо поле за внедряване на специализирани работи за дозиране и хранване на леярските машини, за изваждане и контрол, палетизация и транспорт на готовите детайли, почистване и обмазване на прес-формите и др.

Високата запрашеност, влажност и температура в производствените цехове и работата на трисменен режим прави специализираните работи изключително желани от всеки клиент, който иска да произвежда конкретни изделия. Машинното леене на алуминиеви сплави е приоритетно в производството на части за автомобилната, електро- и електронната промишленост, както и в изделията за бита и телекомуникациите.

НАУЧНА ЗНАЧИМОСТ И НОВОСТ

Създадени са метод и механо-математичен модел за синтез на шарнирни четиризвонни механизми с квази-праволинейна трансляция на мотовилката, прилагането на който в голяма степен намалява недостатъците като запазва предимствата на основния лостов механизъм на съществуващите екстрактори на отливки. Съставени са математични модели на първични кинематични вериги, които включват не само въртящи, но и плъзгащи кинематични двоици. С това става възможен синтезът по четири безкрайно близки относителни положения на ориентиращи лостови, управляващи, предавателни механизми, вградени в шестзвонни Q-манипулатори, синтезът в краен интервал на обобщената координата на лостови механизми по метода на максимално свитата еволюта, както и синтезът на механизми с профилирани висши кинематични двоици. Съставени са математични модели на ориентиращ механизъм за неограничен брой звена на първичната кинематична верига, където по зададена целева ориентация, включително при постоянна ориентация на крайния ефектор и предварително определени предавателни функции на управляващите предавателни механизми, са изведени първите две предавателни функции, необходими за синтезирането му, независимо от неговия вид.

ПРАКТИЧЕСКА ПОЛЕЗНОСТ И ПРИЛОЖИМОСТ

Проектирани и конструирани са с основното участие на автора модели на лостово-верижен и лостов манипулационен механизъм, с което са постигнати изцяло поставените функционални и конструктивни изисквания към екстрактор на отливки от хоризонтални машини за леене под налягане. По този начин са апробирани поставените в дисертационната работа цел и задачи както в теоретичен, така и в доказване на приложимостта на предложения метод.

АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ДИСЕРТАЦИЯТА

Дисертационният труд е апробиран в основните си части на:

- Национална конференция с международно участие „Автоматика и информатика”, 2008 и 2010 г., София;
- Дни на механиката във Варна, 2008 г.;
- „Българско списание за инженерно проектиране“.

ПУБЛИКУВАНЕ

Резултатите от дисертацията са публикувани в 6 статии и доклади.

Б. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В глава I са разгледани видовете специализирани работи за автоматизирано обслужване на леярски машини. Дадени са примери за манипулационни механизми за изваждане на отливки на водещи фирми производители на подобен вид работи. Направен е анализ на съществуващите подходи и разработки, касаещи синтеза на механизмите, който ясно показва, че съществува необходимост от по-лесен за възприемане в практиката метод.

В резултат на направения обзор е установено също, че основните механизми на съществуващите работи са разположени вертикално и имат шарнирна четиризвенна затворена структура. Установени са основните им недостатъци, изразяващи се в ограничено бързодействие и по-ограничените габарити на отливката, която манипулират.

Основавайки се на по-горе казаното, са формулирани целта и основните задачи на дисертационния труд, свързани със създаване на нови максимално опростени и високонадеждни механизми на специализирани работи-екстрактори за изваждане на отливки от хоризонтални машини за леене под налягане.

В глава II са представени функционалната структурна класификация на манипулационните механизми и изграждането им посредством наслагване на кинематични вериги (първични, паралелни, вторични, допълнителни и спомагателни), целящи значително увеличаване на бързодействието на екстрактора и изваждане на отливки с възможно най-големи габаритни размери. Направен е структурен синтез на механизмите с дву-, три-, четири-, пет- и N-звенна първична кинематична верига. Показани са съответни траектории и предавателни функции на Q-манипулатори с четири- и осемзвенна топологична структура. Разгледана е структурната систематика и подходите за изграждане на структури на направляващи механизми.

В глава III е направен метричния синтез на манипулатори с четири-, шест- и осемзвенна структура. Върху апарата на кинематичната геометрия е създаден метод и съответен механо-математичен модел за синтез на шарнирни четиризвенни механизми с квази-праволинейна трансляция на мотовилката, прилагането на който в голяма степен намалява недостатъците като запазва предимствата на основния лостов механизъм на съществуващите екстрактори на отливки. Получени са резултати, които са несравнимо по-добри от постигнатите до момента както по отношение на праволинейност на целевата траектория в зоната на леярската машина, така и по отношение на минимизиране на ненужното повдигане на манипулирания обект (отливка) при неговото изваждане от машината. Решени са задачите, свързани с постигането на ориентацията на крайният ефектор на Q-манипулатори само с един ориентиращ предавателен механизъм за шест- и осемзвенни манипулационни

механизми. Изведени са първите три предавателни функции на механизми за целева ориентация на крайния ефектор на шестзвенни Q-манипулатори със структура Watt I.

Съставени са математични модели при първични кинематични вериги, които включват не само въртящи, но и плъзгащи кинематични двоици. С това става възможен синтезът по четири безкрайно близки относителни положения на ориентиращи, лостови, управляващи, предавателни механизми, вградени в шестзвенни Q-манипулатори, синтезът в краен интервал на обобщената координата на лостови механизми по метода на максимално свитата еволюта, както и синтезът на механизми с профилирани висши кинематични двоици.

Съставени са математични модели, където по зададена целева ориентация, включително при постоянна ориентация на крайния ефектор и предварително определени предавателни функции на управляващите предавателни механизми, са изведени първите две предавателни функции на ориентиращ механизъм, необходими за синтезирането му, независимо от неговия вид. Съставените математични модели са обобщени за неограничен брой звена на първичната кинематична верига. Синтезирани са лостов и лостово-верижен манипулационен механизъм, като са изпълнени предявените изисквания за нови работи-екстрактори на отливки.

В глава IV са представени конструктивни решения на нови, прогресивни работи-екстрактори на отливки с лостов и лостово-верижен манипулационен механизъм. Направени са якостно-деформационни и динамични анализи на разработените модели, които доказват адекватността на конструктивните решения и реализиране на поставените цели както в теоретичен, така и приложен аспект.

В заключение е направен кратък обзор на извършената работа, обобщение на получените резултати и приноси.

ГЛАВА I. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

I.1 СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Леенето под налягане е изключително продуктивен процес за формиране на изделия [Белопухов 1975]. Автоматизираното обслужване на леярските машини освобождава работника от тежки, многократно повтарящи се операции, които работният цикъл на машината го принуждава да извършва. Автоматизирането на тези операции има не само социален ефект. То води до повишаване на производителността на труда и качеството на отливките при съществено намаляване на брака [Свиткин и др. 1999].

Реализацията на специализирани работи, изградени на агрегатно – модулен принцип, при който е използван мехатронен подход е важна и неотменна част от веригата: изследване, идеен проект, разработване и производство.

Потвърждение на този факт, е че световни лидери в роботостроенето, като ABB, KAWASAKI, KUKA, REIS, TOSHIBA, HITACHI, FANUC и др., предлагат универсални работи за автоматизация на процесите на леене. Тази автоматизация е сравнително скъпа и трудно достъпна за масово приложение.

Специализираните работи, които имат по-малко на брой степени на свобода, имат широко приложение в леярското производство, главно заради по-ниската си цена и лесно програмиране и обслужване.

Основните задачи на синтеза произтичат от функционалното предназначение на механизмите. Тяхното създаване започва с проектиране на кинематичната им схема, т.нар. структурен и метричен синтез. Проектирането на схемата на механизма по зададени негови свойства се нарича синтез на механизма. Следващите етапи (пресмятания на якост, избор на материали и други) вече не променят функционалните свойства на механизма.

I.2 ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основавайки се на функционалния подход за структурно-метричен синтез на манипулационни механизми [Гълъбов 1998], на необходимостта от разработване на нови средства за автоматизирано обслужване на хоризонтални машини за леене под налягане и на идеята за максимално опростени и високонадеждни решения, е формулирана следната **цел на дисертационния труд**:

Създаване на нови максимално опростени и високонадеждни видове механизми на специализирани работи-екстрактори за изваждане на отливки от хоризонтални машини за леене под налягане посредством прилагане на съвременни методи за структурен и метричен синтез и конструиране.

За реализиране на поставената цел е необходимо да се решат следните основни задачи:

1. Да се анализират теоретичните проблеми, свързани с проектиране на основните манипулационни механизми на работи-екстрактори, съвременни подходи и методи за техния синтез.
2. Да се извърши структурен синтез на нови манипулационни механизми на работи-екстрактори на отливки, функционална топология, структурна класификация и сравнителен анализ.
3. Да се осъществи метричен синтез и точностен анализ на синтезираните манипулационни механизми:
 - 3.1 Синтез на механизми с четиризвенна топологична структура.
 - 3.2 Синтез на механизми с шестзвенна топологична структура.
 - 3.3 Синтез на механизми с осемзвенна топологична структура.
4. Да се разработят два типа манипулационни механизми на работи-екстрактори на отливки:
 - 4.1 Технически проект на лостово-верижен манипулационен механизъм.
 - 4.2 Технически проект на лостов манипулационен механизъм.
 - 4.3 Якостни и динамични изследвания на проектираните механизми.

ГЛАВА II. СТРУКТУРИ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ

Използваните досега традиционни технически средства (манипулатори и специализирани работи, накратко наречени екстрактори) за автоматизирано изваждане на алуминиеви и магнезиеви отливки от прес-формите на хоризонтални машини за леене под налягане не са оптимални по отношение на тяхната функция, конструкция, бързодействие и други конкурентни параметри. Посочените в увода недостатъци предопределят снижаване на прогресивността и ефективността на екстракторите, въпреки въведените подобрения [Гълъбов и др., 1999a], [Гълъбов и др., 1999b], [Гълъбов и др., 1999в], [Гълъбов и др., 2003]. Затова при проектирането и

изработването на нови типове екстрактори ще бъдат поставени и постигнати две **основни цели**:

Ц1. *Значително увеличаване на бързодействието на екстрактора.*

Ц2. *Изваждане на възможно най-големи отливки от леярската машина.*

Това налага допълнително да бъдат изучени изокинематичните свойства и съответните връзки между параметрите на манипулационните механизми с четиризвенна, шестзвенна и осемзвенна първична кинематична верига [Гълъбов и др. 2004], [Савчев 2004].

Поставените цели могат да бъдат постигнати, ако бъдат удовлетворени следните **изисквания**:

И1. Носачът на крайния ефектор да извършва праволинейна трансляция при изваждане на отливките от леярската машина, което дава следните предимства:

- Скъсяване на работния цикъл, като се използва възможно най-малка част от целевата траектория.
- Разполагане на конвейера за извеждане на отливките на най-подходящо при определени условия място, а не винаги в края на целевата траектория.
- Изваждане на отливки с максимално възможни габарити, определени от разположението на колоните на леярската машина.
- Намаляване на консумираната енергия и натоварването на екстрактора, като се изключи излишното издигане на отливките.
- Обслужване на различни по вид и габарити леярски машини само с един екстрактор.

И2. Подвижните звена на първичната кинематична верига на основния механизъм да бъдат възможно най-леки и къси. Това означава да са опънати в крайните положения на хващача.

И3. Допълнителни механизми, които се носят от първичната кинематична верига, да бъдат със сравнително малки маси и висок к.п.д.

И4. Екстракторът да бъде по-технологичен и по-евтин.

И5. Конструкцията да е оригинална и прогресивна.

Формулираните изисквания ще бъдат удовлетворени, ако бъдат изпълнени следните **условия за синтез на основния механизъм**:

Главно условие У 1 – праволинейна трансляция на носача (звено $n + 1$) на ротационния и трансляционния модул ($У 1 = И 1$). Това условие е изпълнено, ако са удовлетворени едновременно определящите го условия:

У 1.1 – праволинейна траектория на точка H за всяка стойност на обобщената координата $\varphi_{1,0}$.

У 1.2 – постоянна ориентация на носача ($\omega_{n+1,0} = 0$).

Първичната кинематична верига е уместно да има антропоморфна структура (само с R двоици), съобразно изисквания **И2**, **И5** и **И6**. Задвижването на звената на веригата да става посредством стандартни елементи, което е технически (вж. **И 4**) и икономически изгодно (вж. **И5**).

Задължително условие У 2 – основният механизъм да съществува във вид на затворена кинематична верига в целия интервал на изменение на входния ъгъл при благоприятни ъгли на предаване на движението, респ. висок к.п.д. (вж. **И4**).

Съгласно поставените цели Ц1 и Ц2 са разработени от екип под ръководството на проф. Гълъбов, част от който е и автора на дисертацията, няколко конструктивни решения на екстрактори от лостово-верижан тип, базирани на структурата на т.нар. *Q-манипулатори*. Тези манипулатори притежават очевидни предимства по отношение на бързодействие и движение по траектория, но и недостатъци по отношение на стабилност и вибрации, заради използването на гъвкави елементи в управляващите предавателни механизми.

II.1 ФУНКЦИОНАЛНИ ВИДОВЕ КИНЕМАТИЧНИ ВЕРИГИ

II.1.1 Функционални видове кинематични вериги

Новите подходи се нуждаят от структурен синтез, при което могат да се извлекат ограничен брой структури, което довежда до нарастване на потенциала за решаване на технически проблеми и до удовлетворяване на специфичните изисквания на проектираната механична система. Тук ще бъдат разгледани тези подходи, развити от идеята за изграждане на структури на механизми посредством наслагване на отворени кинематични вериги с последователна топология и различна функционалност [Galabov et al. 1995], формирайки затворени вериги на управляващи предавателни механизми [Galabov 1983]. Тези неразклонени вериги са първични градивни елементи за функционален топологичен синтез на механизми за манипулатори. Съгласно техните основни функционалности, те могат да се разделят на **първични** (prim), **паралелни** (par), **вторични** (sec), **допълнителни** (add) и **спомагателни** (sub).

Основни градивни и свързващи елементи за въведения функционален топологичен синтез на механизмите са бинарните звена и низшите кинематични двоици, образуващи различни по функционалното си предназначение (функционални видове) *неразклонени кинематични вериги с последователна топология* - *първична, паралелна, вторична, допълнителна и спомагателна*. Дефинициите на въведените вериги разкриват тяхната същност.

Първичната кинематична верига е най-късата (по брой на звената) верига само с низши кинематични двоици, която свързва изпълнителното звено (в случая хващача на екстрактори на отливки) със стойката. Повечето универсални работи имат първична верига, при която всяка двоица на кинематичната верига е активна (задвижвана).

Паралелната кинематична верига е структурно идентична на първичната, поради което също свързва изпълнителното звено със стойката. В този смисъл всяка паралелна верига може да се приеме за първична, ако съдържа само низши кинематични двоици. Тези вериги типично създават различни варианти на кинематични конфигурации на механизмите и по-добри условия за тяхната стабилност, точност и баланс.

Вторичната кинематична верига свързва две несъседни звена от коя да е паралелна верига, включително първичната. Възможно е вторичната верига да свързва две несъседни звена на друга вторична верига.

Допълнителната кинематична верига свързва две несъседни звена от различни кинематични вериги (първична, паралелна, вторична). Въвеждането им в структурата е продиктувано преди всичко от необходимостта за редуциране на степените на свобода на механизма посредством установяване на кинематична зависимост на движението на звената от двете различни вериги (повечето звена са

свързани със стойката).

Спомагателната кинематична верига свързва посредством две междинни звена други две съседни звена на първична, паралелна или вторична кинематична верига. В общия случай се формира четиризвенна топологична структура на механизма, чрез която се настройва необходимото входно движение, което ако включва време за престой, води до спиране на следващото звено на механизма. Такива вериги типично имат манипулационни механизми, вградени в структурата на специални работи или машини, захранвани директно посредством мотори без управление.

Когато една кинематична верига се свързва с друга/други вериги, тогава звената принадлежат и на двете вериги.

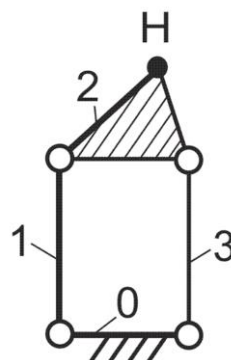
Броят и естеството на функционалните изисквания може да бъде различен, тъй като зависят от конкретно поставената задача при проектирането на манипулационния механизъм. Единадесет примери на функционални изисквания и техните съответстващи типове функции на кинематичните вериги са представени в табл. II.1. Знаците "+" и "-" означават условно функционалната стабилност и функционалната недостатъчност на пет вида кинематични вериги за удовлетворяване на определени изисквания.

Табл. II.1 Типове функции на КВ съгласно функционални изисквания

Функционални изисквания	Функционални видове кинематични вериги				
	(първич- на)	(пара- лелна)	(вторич- на)	(допъл- нителна)	(спомага- телна)
1. <i>Минимизиране</i> на броя на звената и на кинематичните двоици	+	-	-	-	-
2. <i>Минимизиране</i> на работното пространство на механизма	+	-	-	-	-
3. <i>Максимизиране</i> на работното пространство на крайния ефектор	+	-	-	-	-
4. <i>Многовариантност</i> на кинематичните конфигурации на механизма	+	+	+	-	-
5. <i>Минимизиране</i> на броя на кинематичните двоици, чрез които крайният ефектор е представен	+	-	+	+	-
6. <i>Оптимизиране</i> на броя и подреждането на активните кинематични двоици	-	+	+	+	-
7. <i>Минимизиране</i> на структурните грешки на механизма	-	+	+	+	-
8. <i>Оптимизиране</i> на действието чрез промяна на подреждането на активните двоици	-	-	+	+	+
9. <i>Стабилност</i> на механизма	-	+	+	+	+
10. <i>Балансиране</i> на механизма	-	+	+	-	+
11. <i>Декуплиране</i> на действието на крайния ефектор	+	+	+	-	-

II.1.2 Манипулационни механизми с четиризвенна кинематична структура

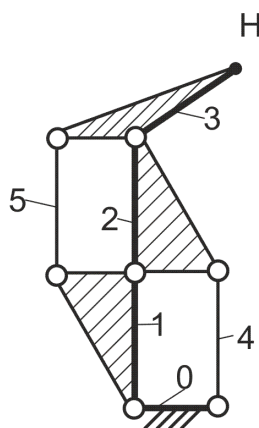
Тази структура, състояща се от звената 0 (стойка), 1, 2 и 3 (фиг. II.6), се образува от наслагване на *първична кинематична верига* (prim), съставена от звената 0, 1 и 2, и *вторична кинематична верига* (sec) с междинно бинарно звено (3), свързващо две несъседни звена (0 и 2) на първичната кинематична верига, които са звена и на вторичната верига. Така топологичната структура на вторичната кинематична верига се образува от звената 0, 3 и 2. Тази топологична структура е еднаква с тази на първичната кинематична верига, поради което може да се разглежда и като *паралелна кинематична верига* (par), стига кинематичните двойци 0-3 и 2-3 да се *низши*, т.е. механизмът да е изцяло *лостов*. Такъв е основният шарнирен четиризвенеен механизъм на повечето манипулатори – екстрактори на отливки (фиг. II.6).



Фиг. II.6 Структура на основния механизъм на екстрактори от типа на GRIPMAT

II.1.3. Манипулационни механизми с шестзвенна кинематична структура

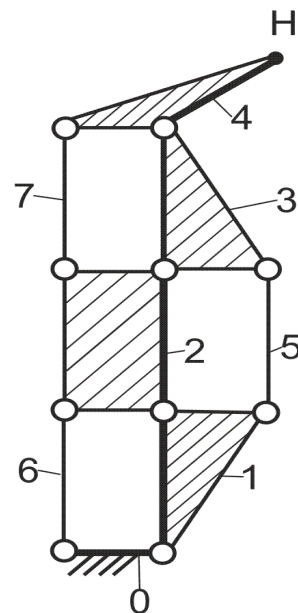
Съществуват няколко комбинации от функционалните видове кинематични вериги за изграждане на шестзвенеен манипулационен механизъм, като за задачите от типа „вземи-постави“ съгласно *задължителното условие U2* – най-подходящи са базираните на *Q* – манипулатор с две подвижни звена, към който е добавено трето звено, което представлява крайния ефектор. По този начин първичната верига става с три подвижни звена, като всяко от тях през едно се свързват с вторични кинематични вериги. Звената от първичната кинематична верига може да бъдат разглеждани като релативни стойки на съответните звена от вторичните вериги, които пък от своя страна образуват УПМ. Общият брой на звената, на кинематичните двойци и на УПМ е съответно $N = 2n$, $p = 3n - 2$ и $b = n + 1$. При $n > 2$ броят на бинарните звена е $b = n + 1$. Броят на тернарните звена е винаги равен на 2, а броят на кватернарните звена е $q = n - 3$. Стойката 0 и изпълнителното (крайното) звено са винаги бинарни, докато първото звено 1 и предпоследното са винаги тернарни, ако $n \geq 3$.



Фиг. II.7 Структура тип Watt I на основния механизъм на екстрактори Speedmat 2 ($Q_{1,1}$ – манипулатор)

II.1.4. Манипулационни механизми с осемзвенна кинематична структура

Кинематичните възможности на Q – манипулаторите нарастват с увеличаване на броя n на подвижните звена на първичната кинематична верига. Тяхната структура удовлетворява функционалното изискване за минимален обем на работното пространство на изпълнителното звено при възможно най-малки размери на самите механизми, ако при достигане на най-отдалечените точки на работното пространство, звената на първичната кинематична верига се подреждат последователно в една права (сингулярна конфигурация на веригата). Това не е възможно и за двете крайни положения на изпълнителното звено, ако механизмът е лостов, за разлика от верижно-лостовите механизми. Затова при осемзвенните манипулатори основният механизъм вече е Q – манипулатор с три подвижни звена, към които се добавя изпълнителното звено на крайния ефектор. Повишеният брой геометрични параметри на тези манипулатори по принцип дава възможност за генериране на по-сложни движения, но същевременно снижава коефициента на полезно действие и устойчивостта на механичната им система при равни други условия.



Фиг. II.8 Структура на 8 -
звене $Q_{1,1,1}$ –
манипулатор

Представената на фиг. II.8 структура е същата като на основния механизъм на екстрактори от типа на Speedmat 1.

II.2. СТРУКТУРЕН СИНТЕЗ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ

В този раздел ще бъдат определени зависимости между параметрите на Q -манипулатори с две и с три подвижни звена на ПКВ, които по отношение на генерираните траектории са изокинематични. Това улеснява създаването на манипулатори с три подвижни звена на ПКВ [Гълъбов и др. 2003], които могат да проникват през по-тесен отвор в щита на машина за леене под налягане, както и за симетрично разположение на манипулатора [Гълъбов и др. 2004]. Конкретен пример за практическа реализация на поставената цел представлява проектираният с преобладаващо участие на автора функционален модел на екстрактор на отливки от леярски машини [Гълъбов и др. 2003], [Гълъбов и др. 2004].

II.2.1. Структурен синтез на първичната кинематична верига

Както бе казано по-горе първичната кинематична верига е най-късата (по брой звена) верига само с низши кинематични двоици, която свързва изпълнителното звено със стойката. Ако съществуват няколко такива (паралелни) вериги, то една от тях се приема за първична. В зависимост от броя на звената на първичната условно ОКВ ще бъдат разгледани случаите с дву-, три- и четиризвенни вериги.

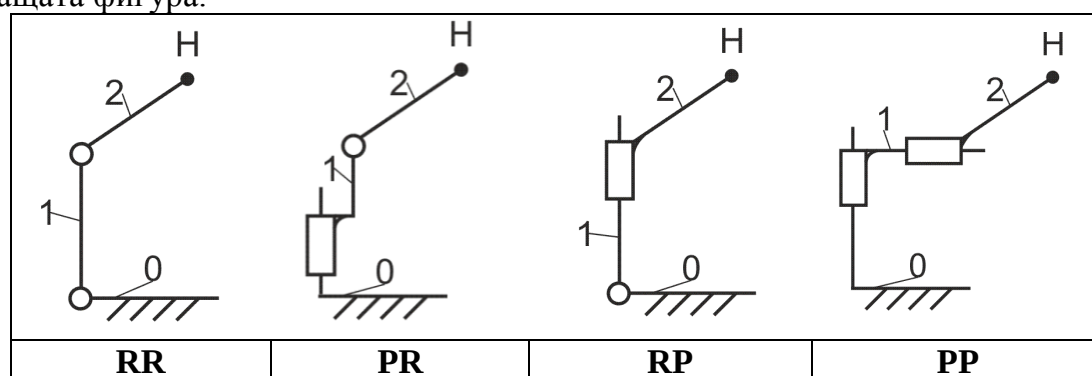
МЕХАНИЗМИ С ДВУЗВЕННА ПЪРВИЧНА КИНЕМАТИЧНА ВЕРИГА

Тя е най-простата в структурно отношение първична кинематична верига и се

състои от две звена свързани помежду си с двоица от V клас R, P или H (винтова) . Едно от двете звена е неподвижно и се явява стойка на механизма, а другото се явява вход и изход за механизма. Затова входните и изходните параметри на тези механизми са еднакви. Това са електродвигателят с неговите статор и ротор, пневмо- и хидро- цилиндърът, с неговите цилиндър бутало, и винтовият механизъм. Въпреки, че тези механизми не преобразуват входни параметри с комбинирането им се изграждат структурите на универсалните промишлени роботи. В зависимост от броя, разположението и управлението им по скорост могат да се постигнат различни равнинни и пространствени траектории на крайния ефектор.

МЕХАНИЗМИ С ТРИЗВЕННА ПЪРВИЧНА КИНЕМАТИЧНА ВЕРИГА

Тризвенната верига е минималната по брой звена на ОКВ, която може да генерира траектория и в редки случаи приблизително да реализира равнинно движение. Такава верига е с две степени на свобода ($h = 2$), т.е. за реализирането на НМ е необходимо или отделен управляем двигател за всяко подвижно звено, или ако кинематична верига се затвори с добавяне на някой от видовете функционални вериги, докато степените на свобода на механизма се сведат до една ($h = 1$). Възможните варианти на тризвенна първична кинематична верига са разгледани на следващата фигура.

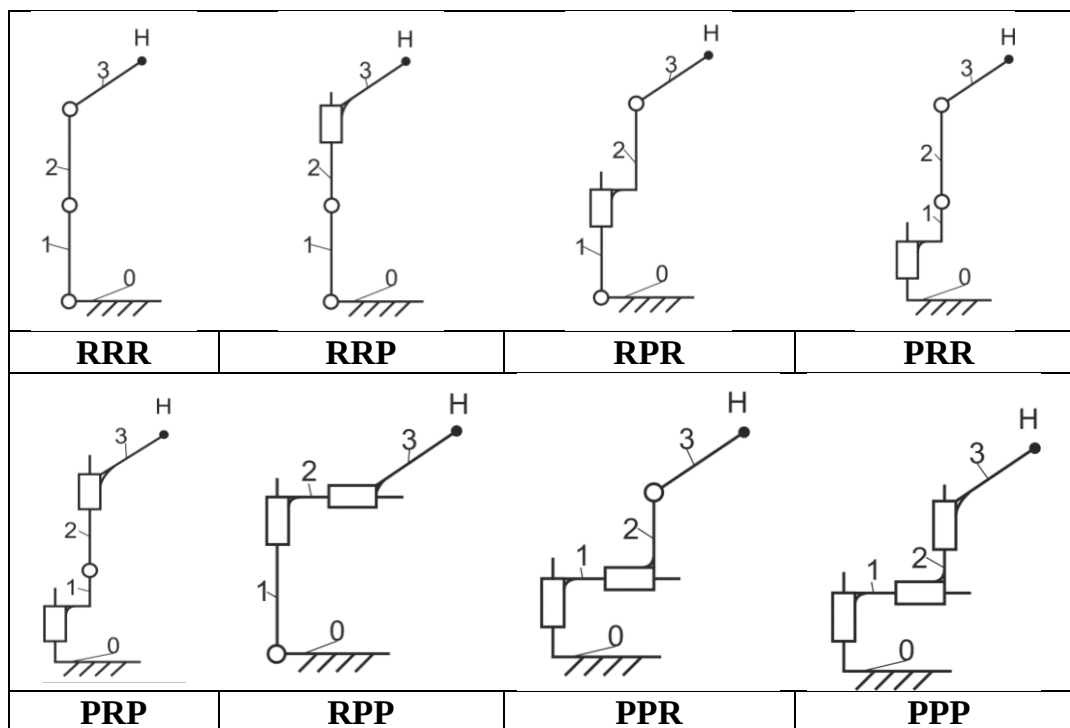


Фиг. II.9 Структури на тризвенна първична кинематична верига

МЕХАНИЗМИ С ЧЕТИРИЗВЕННА ПЪРВИЧНА КИНЕМАТИЧНА ВЕРИГА

За направляване на тяло в равнината е необходимо към тризвенната кинематична верига да бъде добавено още едно звено. Така степените на свобода на такава четиризвенна ОКВ стават три ($h = 3$). Вариантите са разгледани на фиг. II.10.

Добавянето на функционални кинематични вериги за редуциране на степените на свобода до една ($h = 1$) при тези механизми води до множество решения. Получават се т. нар. механизми с поликонтурни ЗКВ. Тези структури обикновено имат повтарящи се ограничения, при което от неизбежното разсейване на размерите в рамките на допусковите полета често сглобяването се извършва с деформация на звена. Това води до нарастване на силите и моментите на триене, загуби на енергия и понижаване на к.п.д. на механизма. Затова при проектирането на такива многозвонни механизми е важно да се предвиди анализ и да се вземат мерки за избягване на пасивните връзки.



Фиг. II.10 Структури на четиризвнна първична кинематична верига

Такава структура има основният механизъм на екстрактори от типа на Speedmat 2.

Последната RPP структура е непълноценна, тъй като с нея е невъзможно да се постигне ъглова ориентация на звено 3, но е представена с цел пълнота. Предимство имат четирите структури с R-двоици на звената 2 и 3, при които ориентацията се извършва само с последното звено 3.

Структурите с повече от две R-двоици са непълноценни, но са включени с цел пълнота на представянето.

Изборът на структура на първичната кинематична верига зависи от конкретната манипулативна задача и от възможността за структурно декупиране на движенията. С универсално предназначение са ОКВ съставени само от R двоици, особено когато става въпрос за генериране на траектории, които са близки до дъга от окръжност, циклоида и нейните производни: елипси, отсечки и многоъгълници със заоблени върхове или рогови точки. За избора им допринасят и лесната им конструктивна реализация и високите им експлоатационни характеристики. В случаите, когато траекторията е близка до праволинейна с голям ход или е спираловидна, за предпочитане е замяната на една или повече R двоици от ОКВ с P двоици.

В действителност прецизен избор на структурата на първичната ОКВ може да се направи едва тогава, когато се решат задачите за оразмеряване и разположение на управляваната ОКВ и за определяне на предавателните функции на УПМ съобразно наложените геометрични, кинематични и динамични ограничения.

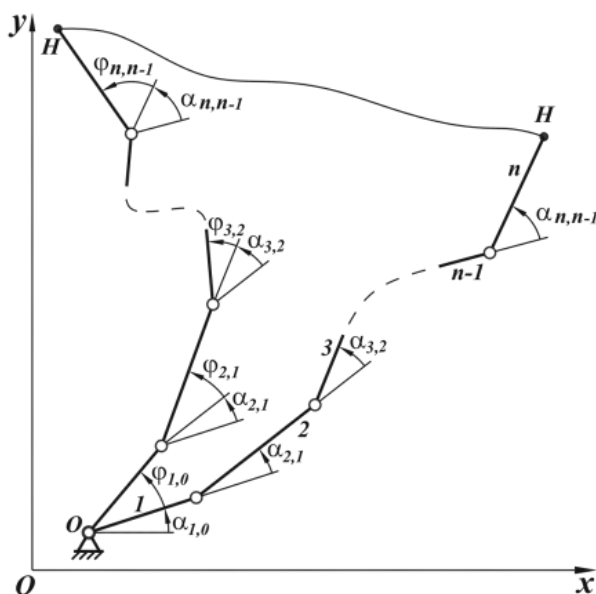
МЕХАНИЗМИ С N-ЗВЕННА ПЪРВИЧНА КИНЕМАТИЧНА ВЕРИГА

Координатите на характеристичната точка H (фиг. II.1) на една n -звнна първична кинематична верига (ПКВ) се определят от проекционните уравнения:

$$x_H = x_O + \sum_{k=1}^n (l_k \cos \psi_k); \quad y_H = y_O + \sum_{k=1}^n (l_k \sin \psi_k) \quad (\text{II.1})$$

където с l_k са отбелязани дължините на подвижните звена ($k=1,2,\dots,n$), а с $\psi_k = \sum_{k=1}^i \psi_{k,k-1}$ е означен ъгълът, който k -тото звено сключва с ос x на координатната система Oxy , свързана със стойката. Ъгълът $\psi_{k,k-1}$ се определя като алгебрична сума от текущия ъгъл $\varphi_{k,k-1}$ на завъртане на звено k спрямо звено $(k-1)$ и ъгъл $\alpha_{k,k-1}$, който определя началното положение на звено k спрямо звено $k-1$:

$$\psi_{k,k-1} = \varphi_{k,k-1} + \alpha_{k,k-1} \quad (\text{II.2})$$



Фиг. II.12 ПКВ Q-манипулатор в начално и текущо положение

Ъглите $\varphi_{k,k-1}$, респ. координатите x_H и y_H , е удобно да се представят чрез първите предавателни функции

$$\varphi'_{k+1,k-1} = \frac{d(\varphi_{k+1}-\varphi_k)}{d(\varphi_{k-1}-\varphi_k)} = \frac{d\varphi_{k+1,k}}{d\varphi_{k-1,k}} \quad (\text{II.3})$$

на управляващи предавателни механизми с входно звено $(k-1)$, релативна стойка k и изходно звено $(k+1)$:

$$\begin{aligned} \varphi_{k+1,k} &= \int \left[\varphi'_{k+1,k-1}(\varphi_{k-1,k}) \right] d\varphi_{k-1,k} + C; \\ \varphi_{k-1,k} &= -\varphi_{k,k-1}. \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Стойностите на всеки ъгъл $\varphi_{k+1,k}$ се определят последователно при $k=1,2,\dots,n-1$ и се получават в крайна сметка само като функция на входната координата $\varphi_{1,0}$.

За тризвенни ПКВ ($n = 2$) при $x_0 = y_0 = 0$, $\alpha_{k,k-1} = 0$ ($k = 1, 2$) и $\varphi'_{2,0}^{(1)} \equiv i = \text{const}$ за координатите на точка H се получават позиционните функции и техните производни, които могат да бъдат обединени в общи релации

$$\frac{d^{(m)}x_H}{d\varphi_{1,0}^m} = l_1 \cos(\varphi_{1,0} + \frac{m\pi}{2}) + l_2 (1 - \varphi'_{2,0}^{(1)})^m \cos(\varphi_{1,0}(1 - \varphi'_{2,0}^{(1)}) + \frac{m\pi}{2}), \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{d^{(m)}y_H}{d\varphi_{1,0}^m} = l_1 \sin(\varphi_{1,0} + \frac{m\pi}{2}) + l_2 (1 - \varphi'_{2,0}^{(1)})^m \sin(\varphi_{1,0}(1 - \varphi'_{2,0}^{(1)}) + \frac{m\pi}{2}), \quad (\text{II.6})$$

от които траекториите на точка H се получават при $m = 0$, първите производни при $m = 1$ и т. н.

Условието за рогови точки от траекторията $dy_H/dx_H = 0/0$ се свежда до едновременно нулиране на (II.5) и (II.6) при $m = 1$. Получава се

$$\lambda = \frac{l_1}{l_2} = i - 1. \quad (\text{II.7})$$

Тези точки са ректифицируеми (плоски) [Брадистилев 1961]. Поради симетрия на траекторията относно нормалата ѝ в ректифицируема точка, допирането между траекторията и тангентата ѝ в точката е от трети ред, което означава, че те имат четири безкрайно близки общи точки. Геометричният смисъл на знака (-) на λ означава, че ректифицируеми точки могат да се получат само при сгънато положение на звената 1 и 2 на ПКВ.

Може да се обобщи, че роговите и ректифицируемите точки се получават при сингулярни конфигурации на ПКВ.

Геометричният смисъл на знака (+) на λ (при $i > 1$) означава, че роговите точки се получават при опънати звена 1 и 2 на ПКВ, докато при знак (-) на λ (при $i < 1$) роговите точки се получават при сгънати звена 1 и 2 на ПКВ.

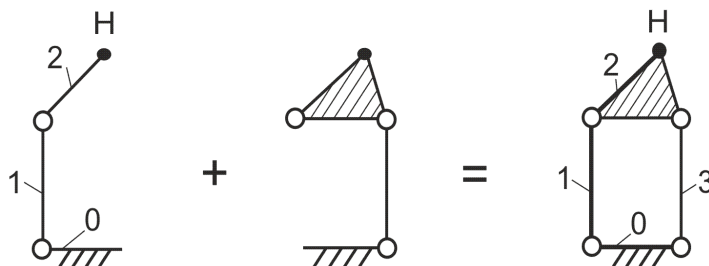
Кривата, генерирана от манипулатор с параметри l_1 , l_2 и i , може да бъде генерирана от *изоморфен* манипулатор [Гълъбов 1992] с параметри

$$l_1^* = l_2, \quad l_2^* = l_1, \quad i^* = \frac{i}{i-1}. \quad (\text{II.8})$$

Следователно всяка крива може да се генерира от два манипулатора, еднакви по структура, но с различни параметри и кинематични показатели.

II.2.2. Структурен синтез на манипулационни механизми с четиризвенна топологична структура

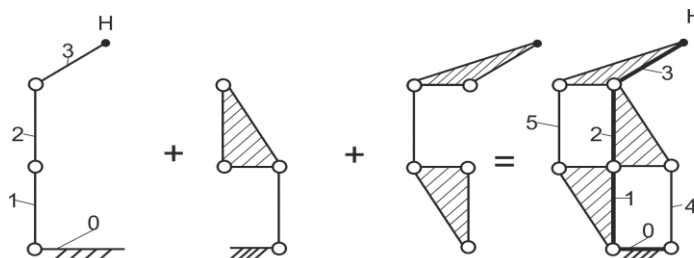
Когато към *тризвенната първична кинематична верига* 0,1,2 се добави веригата със звена 0,3 и 2 (както бе споменато по-горе) и една или двете кинематични двойки 0-3 и 2-3 са *висши*, тогава кинематичната верига 0-3-2 вече не е паралелна, а става вторична. И в двата случая се образува *УПМ* с релативна стойка – звено 1, вход – стойката 0 (с входни кинематични параметри, равни по модул и обратни по знак на тези на реалното входно звено 1), междинно звено 3 и изходно звено 2.



Фиг. II.13 Първична и паралелна кинематични вериги, образуващи шарнирен четиризвенник

II.2.3. Структурен синтез на манипулационни механизми с шестзвенна топологична структура

Манипулационните механизми с шестзвенна структура съгласно казаното по-горе се състоят от четиризвенна ПКВ и два УПМ.



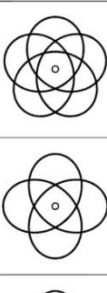
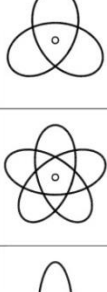
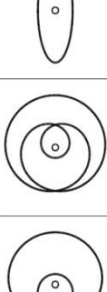
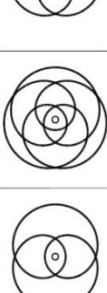
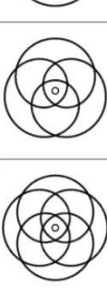
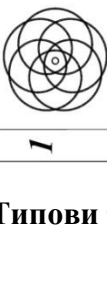
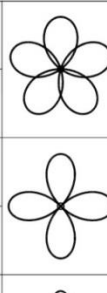
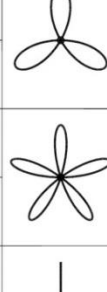
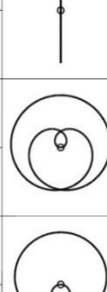
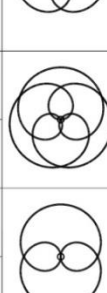
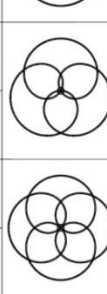
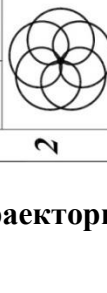
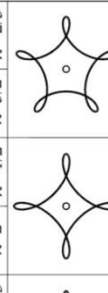
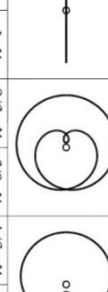
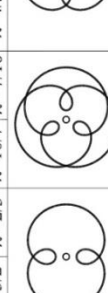
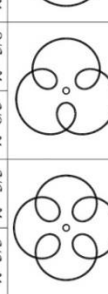
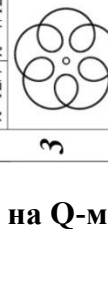
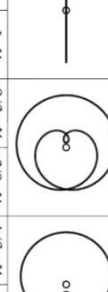
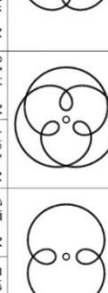
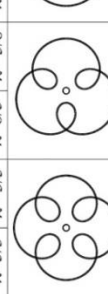
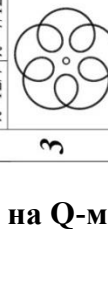
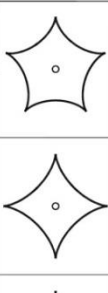
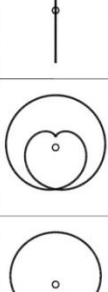
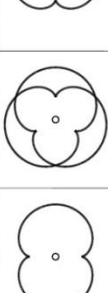
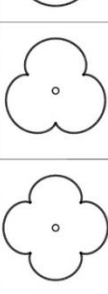
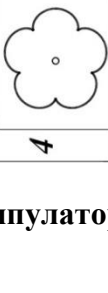
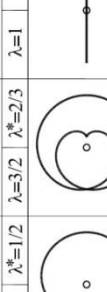
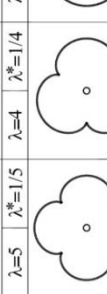
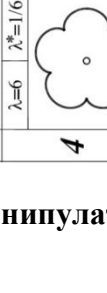
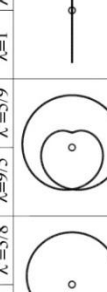
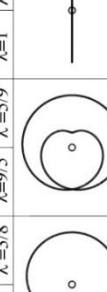
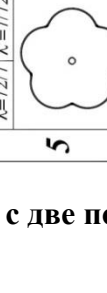
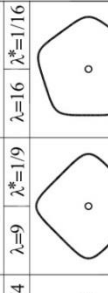
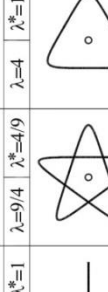
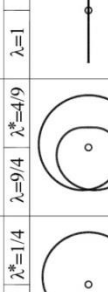
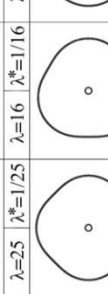
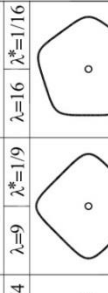
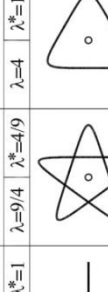
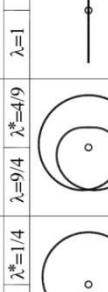
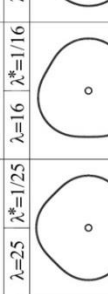
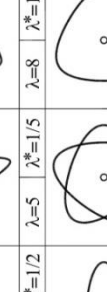
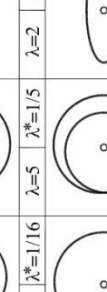
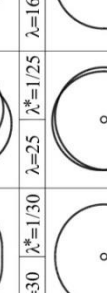
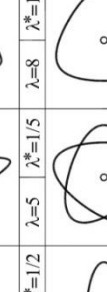
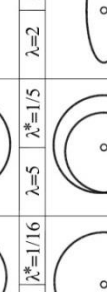
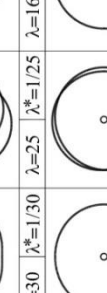
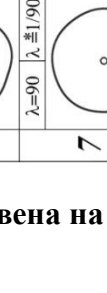
Фиг. II.14. Структура на 6-звене **Q**-манипулатор

Двете подвижни звена 1 и 2 от ПКВ, преди крайният ефектор - звено 3, всъщност осигуряват основното движение на манипулатора. Взаимовръзката между тях се осигурява посредством УПМ формиран от звената 0, 1, 2, 4 и в зависимост от синтезираните предавателни функции е възможно да се постигне голямо разнообразие от траектории на крайният ефектор. С втория УПМ, формиран от звената 1, 2, 3 и 5, обикновено се осъществява ориентацията на манипулирания обект.

ТРАЕКТОРИИ И ПРЕДАВАТЕЛНИ ФУНКЦИИ

При условие, че управляващият предавателен механизъм е с постоянно предавателно отношение, позиционните функции на характеристичната точка H на един манипулатор с RR -структура на ПКВ, както и производните на тези функции могат да бъдат обединени в общи релации (II.5), (II.6) [Гълъбов 1998a], [Гълъбов и др. 2002].

Създаден е каталог от десетки траектории, получени като сателитни криви при различни стойности на i и $\lambda = l_1/l_2$. Каталогът може да се използва за учебни и експериментални цели, както и в конструкторската практика. На фиг. II.15 са представени 84 типови траектории. При $\lambda = 1$ (ред 2) се получават криви, които минават през базовия шарнир на ПКВ. При $i > 1$ това са т. нар. *рози* – криви на *Gvido-Grandi* (колони 9-12), сред които при $i = 4$ се получава *четирилистната детелина*.

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
$i = -5$	$i = -4$	$i = -3$	$i = -2$	$i = -3/2$	$i = -1$	$i = -1/2$	$i = 2$	$i = 5/2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
$i^* = 5/6$	$i^* = 4/5$	$i^* = 3/4$	$i^* = 2/3$	$i^* = 3/5$	$i^* = 1/2$	$i^* = 1/3$	$i^* = 2$	$i^* = 5/3$	$i^* = 3/2$	$i^* = 4/3$	$i^* = 5/4$
$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 2/3$ $\lambda^* = 3/2$	$\lambda = 1/2$ $\lambda^* = 2$	$\lambda = 1/2$ $\lambda^* = 2$	$\lambda = 1/2$ $\lambda^* = 2$	$\lambda = 1/2$ $\lambda^* = 2$	$\lambda = 1/2$ $\lambda^* = 2$
											
<i>2</i>											
<i>3</i>											
<i>4</i>											
<i>5</i>											
<i>6</i>											
<i>7</i>											

Фиг.П.15 Типови траектории на Q-манипулатор с две подвижни звена на ПКВ

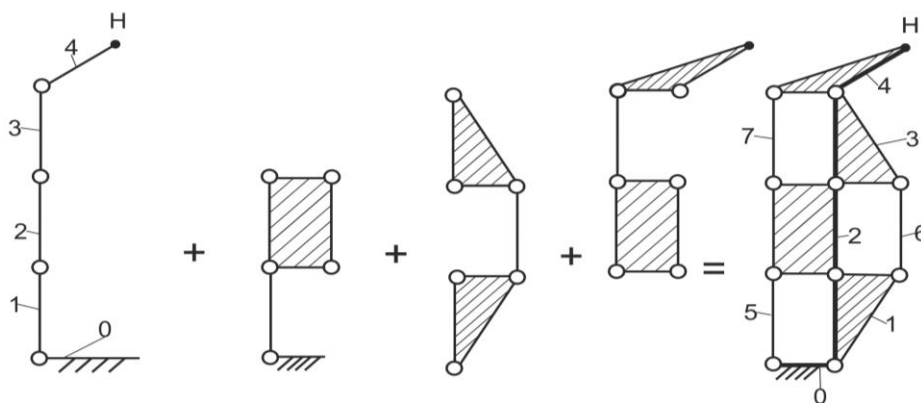
От условията за рогови и инфлексни точки (допиране на кривата и тангентата в съответната ѝ точка от втори ред) на генерираната крива се получават съответно отношенията

$$\lambda = \frac{l_1}{l_2} = i_{2,0}^{(1)}(-\hat{\phi}_{1,0}) - 1, \text{ (II.18), респ. } \lambda = \frac{l_1}{l_2} = -(i_{2,0}^{(1)}(-\hat{\phi}_{1,0}) - 1)^2 \quad \text{(II.19)}$$

при сингулярни конфигурации на ПКВ.

II.2.4. Структурен синтез на манипулационни механизми с осемзвенна топологична структура

С увеличаването на броя на звената на ПКВ на пет се увеличава и броят на УПМ с още един и така се формира топологичната структура на осемзвенните манипулационни механизми.



Фиг. II.16 Структура на 8-звенеи Q-манипулатор

Кинематичните възможности на Q-манипулаторите с осемзвенна топологична структура са необикновено големи, дори при постоянно предавателно отношение на управляващите предавателни механизми [Боренщейн 1982], [Гълъбов 1992], [Гълъбов и др. 2003]. Недостатък на тези манипулатори е невъзможността им да проникват в сравнително тесни отвори, поради относително големите дължини на двата лоста, както и асиметричното им разположение, което води до занижена стабилност, до допълнително статично и динамично натоварване, съпроводено от завишени трептения, износвания и грешки.

ТРАЕКТОРИИ И ПРЕДАВАТЕЛНИ ФУНКЦИИ

Кинематичната схема на ПКВ на Q-манипулатор с n на брой подвижни звена е показана на фиг. II.12 от предходния параграф. Управляващите предавателни механизми с постоянни предавателни отношения свързват, през едно, две звена от ПКВ, поради което броят им трябва да бъде $n-1$. Първият управляващ механизъм свързва стойката (звено 0) и звено 2, като звено 1 се явява релативна стойка на този механизъм. Вторият управляващ предавателен механизъм свързва звената 1 и 3 с релативна стойка 2 и така нататък за всеки следващ управляващ механизъм. Траекторията, която описва характеристичната точка H на Q-манипулатор с n на брой подвижни звена на ПКВ се изразява чрез уравненията:

$$\begin{aligned} x_H &= x_0 + \sum_{i=1}^n \left[l_i \cos \left(\sum_{k=1}^i (\varphi_{k,k-1} + \alpha_{k,k-1}) \right) \right] \\ y_H &= y_0 + \sum_{i=1}^n \left[l_i \sin \left(\sum_{k=1}^i (\varphi_{k,k-1} + \alpha_{k,k-1}) \right) \right], \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

където с $\alpha_{k,k-1}$ е отбелязан ъгълът между звена k и $k-1$ в началното им положение, а с $\varphi_{k,k-1}$ текущия ъгъл, на който се е завъртяло звено k спрямо началното му положение. l_i представлява дължината на i -то звено.

Първата предавателна функция $\varphi'_{k+1,k-1}(k)$ на k -тия управляващ механизъм представлява производната:

$$\varphi'_{k+1,k-1}(k) = \frac{d\varphi_{k+1,k}}{d\varphi_{k-1,k}}, \quad (\text{II.21})$$

от която след интегриране се определя ъгълът:

$$\varphi_{k+1,k} = \int \varphi'_{k+1,k-1}(k) (\varphi_{k-1,k}) d\varphi_{k-1,k} + C. \quad (\text{II.22})$$

При постоянни предавателни отношения на управляващите механизми, за координатите x_H и y_H на характеристичната точка H се получават следните уравнения:

$$\begin{aligned} x_H &= x_0 + \sum_{i=1}^n l_i \cos \left(\sum_{k=1}^i \alpha_{k,k-1} + \varphi_{1,0} \sum_{k=1}^i (-1)^{k-1} \prod_{j=1}^{k-1} \varphi'_{j+1,j-1}(j) \right) \\ y_H &= y_0 + \sum_{i=1}^n l_i \sin \left(\sum_{k=1}^i \alpha_{k,k-1} + \varphi_{1,0} \sum_{k=1}^i (-1)^{k-1} \prod_{j=1}^{k-1} \varphi'_{j+1,j-1}(j) \right). \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

Поради това типовете траектории, които могат да се генерират, са значително повече. Също така с този тип механизми би могло да се осъществят движения с временен престой от по-висок ред. При направляващите механизми с две подвижни звена от ПКВ може да се постигне временен престой от първи ред, който се получава при нулиране на първата предавателна функция на манипулатора ($dy_H/dx_H = 0$). Поради невъзможността за едновременно нулиране на първата и втората предавателни функции, механизмът с две подвижни звена на ПКВ не може да реализира престой от по-висок ред.

Траекториите, които реализират Q-манипулатори с постоянни предавателни отношения на управляващите предавателни механизми и четиризвенна структура на ПКВ, се описват чрез уравнения.

$$\begin{aligned}
x_H &= L_1 \cos(\Phi_{1,0}) + L_2 \cos\left(\Phi_{1,0}\left(1 - \Phi'_{2,0}^{(1)}\right)\right) + \\
&+ L_3 \cos\left(\Phi_{1,0}\left(1 - \Phi'_{2,0}^{(1)} + \Phi'_{2,0}^{(1)}\Phi'_{3,1}^{(2)}\right)\right) \\
y_H &= L_1 \sin(\Phi_{1,0}) + L_2 \sin\left(\Phi_{1,0}\left(1 - \Phi'_{2,0}^{(1)}\right)\right) + \\
&+ L_3 \sin\left(\Phi_{1,0}\left(1 - \Phi'_{2,0}^{(1)} + \Phi'_{2,0}^{(1)}\Phi'_{3,1}^{(2)}\right)\right),
\end{aligned} \tag{II.24}$$

получени от (II.24) при $n = 3$ и $\alpha_{k,k-1} = 0$ ($k = 1, 2, 3$). Параметрите са записани с главни букви, за да се различават от тези на механизмите с тризвенна структура.

На фиг. II.17 са показани ограничен брой типови траектории, които могат да се генерират чрез този вид направляващи механизми, при различни предавателни отношения на управляващите предавателни механизми и отношения между дължините на трите подвижни звена на ПКВ.

ИЗОКИНЕМАТИЧНИ Q-МАНИПУЛАТОРИ

Условието, Q-манипулатори с три подвижни звена на ПКВ да бъдат изокинематични на манипулатори с две подвижни звена е генерираните криви на движение (сателитни криви) на двата типа манипулатори да са еднакви. Приравнявайки десните страни на уравнения (II.10) и (II.11) със съответните уравнения от (II.24), се получава система, чийто решения удовлетворяват желаното условие за изокинематичност между двата типа направляващи механизми по отношение на генерираните траектории.

Тъй като предавателните функции на управляващите механизми са постоянни, въвеждаме следното означение: $\varphi'_{2,0}^{(1)} = \dot{i}_1$; $\Phi'_{2,0}^{(1)} = I_1$; $\Phi'_{1,3}^{(2)} = I_2$. При условие, че в трите подвижни звена на ПКВ в начално положение са сингулярни, реалните решения на системата уравнения, съставени от (II.10), (II.11) и (II.24), са две:

$$L_2 = l_1; \quad L_1 + L_3 = l_2; \quad I_1 = \frac{\dot{i}_1}{\dot{i}_1 - 1}; \quad I_2 = 1; \quad \Phi_{1,0} = \varphi_{1,0}(1 - \dot{i}_1), \tag{II.26}$$

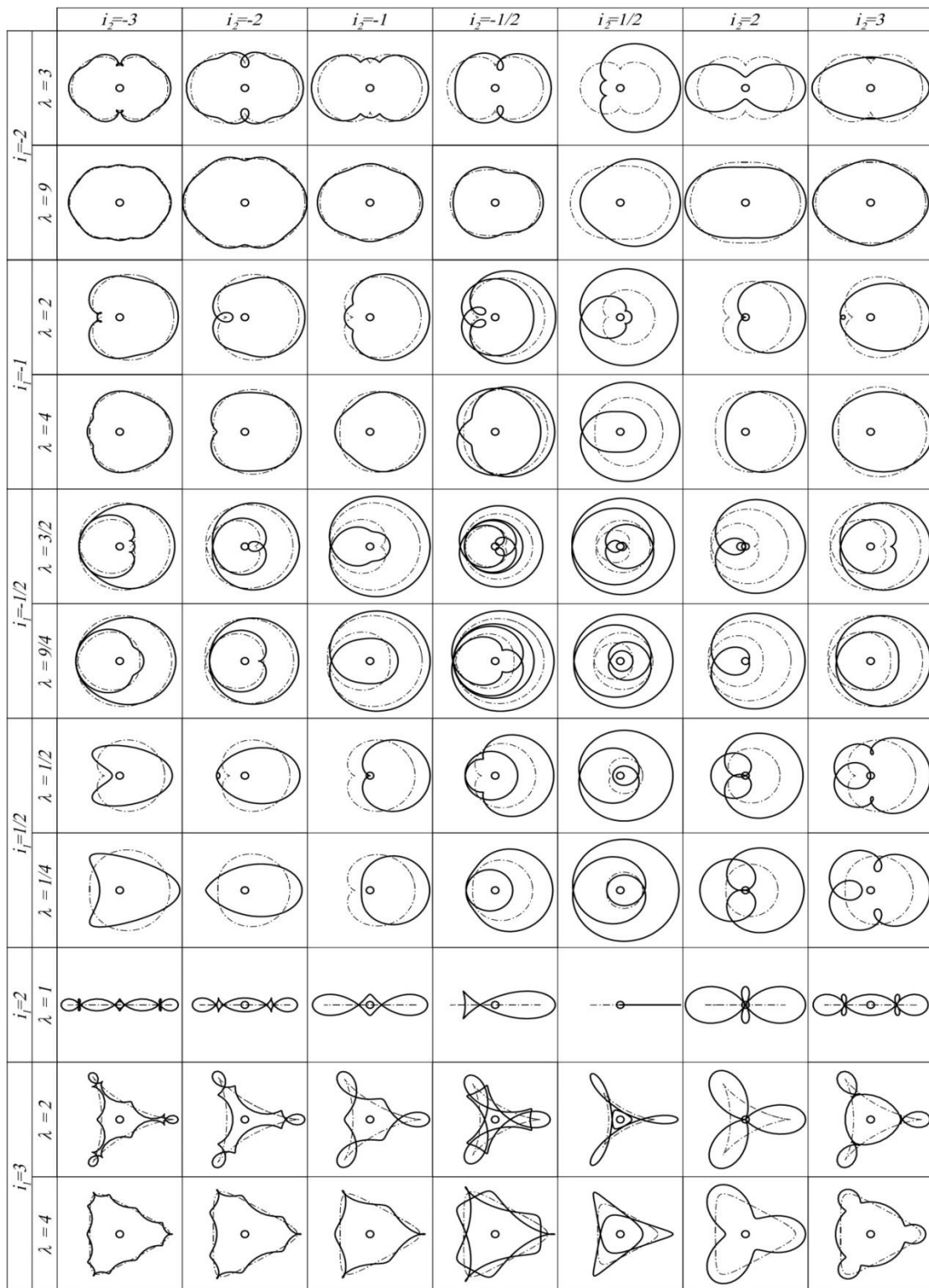
$$L_2 = l_2; \quad L_1 + L_3 = l_1; \quad I_1 = \dot{i}_1; \quad I_2 = 1; \quad \Phi_{1,0} = \varphi_{1,0}. \tag{II.27}$$

От двата варианта на изокинематични механизми с три подвижни звена на ПКВ се забелязват две основни предимства на този тип манипулатори в сравнение с предходния, при еднакви траектории и сумарна дължина на звената от ПКВ:

- могат да се подбират различни комбинации от дължини на звена 1 и 3, което може да се използва в една оптимизационна задача;
- при $I_1 > 0$, механизмът се облекчава по отношение на статичното и динамично натоварване.

При условие, че ъглите $\alpha_{1,0}$ и $\alpha_{3,2}$, на които са завъртени в начално положение съответно първото звено спрямо стойката и третото спрямо второто, са

равни на 180° , се получават още четири решения на системата съставена от уравнения (II.10), (II.11) и (II.24). Тогава сумата $L_1 + L_2 + L_3$ ще бъде по-голяма от $l_1 + l_2$.



Фиг. II.17 Траектории, генерирани от Q-манипулатор с три подвижни звена на ПКВ, при $L_3=L_2/(I_2-1)$

ГЛАВА III. МЕТРИЧЕН СИНТЕЗ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ- ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ

III.1. МЕТРИЧЕН СИНТЕЗ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ С ЧЕТИРИЗВЕННА ТОПОЛОГИЧНА СТРУКТУРА

Синтез на първичната кинематична верига. Имаме механизъм с четиризвенна топологична структурата, показана на фиг. II.6. Зададени са параметрите на работната сцена, която включва разположението и основните размери на леярската машина и на конвейера, върху който се поставя отливката. Съгласно тези параметри и габаритите на хващача, който ще се ползва, се определят дължината $a = \overline{A_0A}$ на направляващия лост 1, дължината $c = \overline{AC}$ и отместването $h = \overline{CH}$.

Синтез на паралелната кинематична верига. Синтезът на тази верига ще бъде сведен до определяне на параметрите на шарнирен четиризвенеен механизъм, кинематично еквивалентен на условния коляно-мотовилков механизъм по отношение на абсолютното движение на мотовилката до производните от трети ред вкл. Това означава да имат общи кинематични инварианти – абсолютен МЦС Q , полюсна тангента t_Q и крива на кръговите точки, която в случая се разпада на полюсната тангента t_Q и правата AC . Така генерираната траектория и хоризонталната тангента към траекторията ще имат четири безкрайно близки точки, т.е. оскулацията между тях ще бъде от трети ред вкл.

III.2. МЕТРИЧЕН СИНТЕЗ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ С ШЕСТЗВЕННА ТОПОЛОГИЧНА СТРУКТУРА

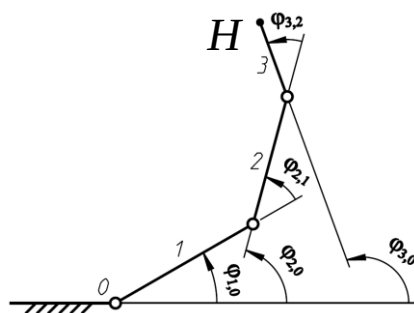
Синтез на първичната кинематична верига.

Съгласно представеното в т. II.1.3 структурата на един шестзвенеен Q -манипулатор се изгражда от една ПКВ с три подвижни звена и двоици от V клас, и два УПМ $C1$ и $C2$ (фиг. II.7). Основният механизъм $C1$ свързва кинематично звено 2 със стойката 0 при релативна стойка звено 1. Ориентирацият механизъм $C2$ свързва кинематично звено 3 със звено 1 при релативна стойка звено 2. Получава се структура тип Watt I.

Съблюдавайки поставените в глава 1 изисквания и последователността за изваждане на отливка (фиг. III.1) е необходимо да движим последното звено на ПКВ по „Г-образна“ траектория.

Синтез на управляващите предавателни механизми.

Ъгълът на завъртане $\varphi_{3,2}$ на звено 3, заедно с крайния ефектор (КЕ), спрямо звено 2 (фиг. III.12) се определя от елементарната зависимост



Фиг. III.12 ПКВ с RRR-структура

$$\varphi_{3,2} = \varphi_{3,0} - \varphi_{1,0} - \varphi_{2,1}. \quad (\text{III.38})$$

Ъглите $\varphi_{3,2}$ и $\varphi_{1,2} = -\varphi_{2,1}$ са съответно изходна и входна координата на ориентиращия механизъм C2 с релативна стойка звено 2. След диференциране на (III.38) спрямо $\varphi_{1,2}$ се получава търсената първа предавателна функция на M2:

Определяне на предавателните функции на ориентиращия механизъм при RPR- структура на ПКВ

$$\frac{d\varphi_{3,2}}{dS_{1,2}} = \left(\frac{d\varphi_{3,0}}{d\varphi_{1,0}} - 1 \right) \left(\frac{dS_{2,1}}{d\varphi_{0,1}} \right)^{-1}, \quad (\text{III.48})$$

Определяне на предавателните функции на ориентиращия механизъм при PRR- структура на ПКВ

$$\frac{d\varphi_{3,2}}{d\varphi_{1,2}} = \frac{d\varphi_{3,0}}{dS_{1,0}} \left(\frac{d\varphi_{2,1}}{dS_{0,1}} \right)^{-1} + 1, \quad (\text{III.51})$$

Определяне на предавателните функции на ориентиращия механизъм при PPR- структура на ПКВ

$$\frac{d\varphi_{3,2}}{dS_{1,2}} = \frac{d\varphi_{3,0}}{dS_{1,0}} \left(\frac{dS_{2,1}}{dS_{0,1}} \right)^{-1}, \quad (\text{III.60})$$

III. 3 МЕТРИЧЕН СИНТЕЗ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ С ОСЕМЗВЕННА ТОПОЛОГИЧНА СТРУКТУРА

Синтез на първичната кинематична верига.

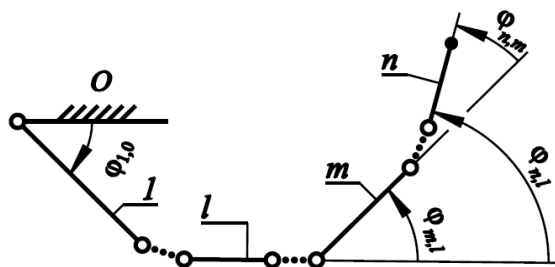
Съгласно представеното в т. II.1.4, структурата на един осемзвенеи Q-манипулатор се изгражда от една ПКВ с четири подвижни звена и двоици от V клас, и три УПМ C1, C2 и C3 (фиг. II.8). Първият УПМ C1 свързва кинематично звено 2 със стойката 0 при релативна стойка звено 1. Вторият УПМ C2 свързва кинематично звено 3 със звено 1 при релативна стойка звено 2. Ориентиращият механизъм C3 свързва кинематично звено 4 със звено 2 при релативна стойка звено 3.

Синтез на управляващите предавателни механизми.

При зададена целева ориентация на крайния ефектор и известни предавателни функции на УПМ-ми да се определят предавателните функции на ориентиращия УПМ, включително при постоянна ориентация на КЕ. Така вместо с поредица от механизми, свързващи крайното звено със стойката, е възможно целевата ориентация да се постигне само от един ориентиращ УПМ [Гълъбов 1992, 1998].

Определяне на първата предавателна функция на ориентиращия механизъм

Нека звената m , l и n са съответно стойка 0, начално звено 1 и крайно звено n , носещо КЕ.



Фиг. III.19 Първична кинематична верига с n подвижни звена

Получава се изразът:

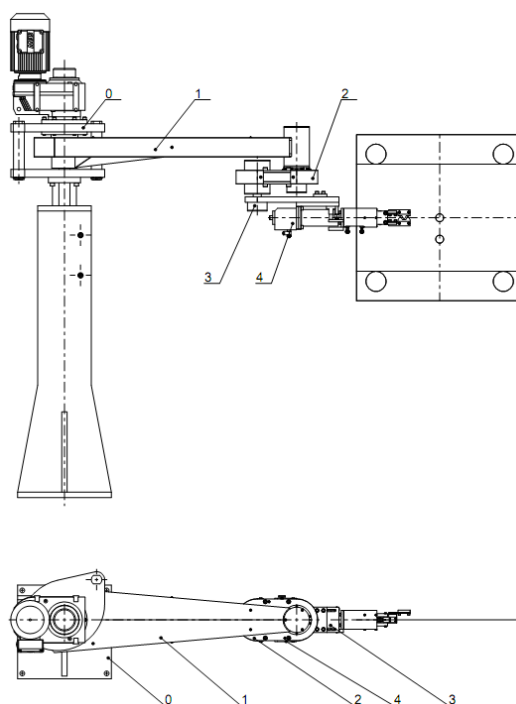
$$\frac{d\varphi_{n,n-1}}{d\varphi_{n-2,n-1}} = \frac{1 + \sum_{m=1}^{n-2} \left[\prod_{k=1}^m \left(-\frac{d\varphi_{k+1,k}}{d\varphi_{k-1,k}} \right) \right] - \frac{d\varphi_{n,0}}{d\varphi_{1,0}}}{\prod_{k=1}^{n-2} \left(-\frac{d\varphi_{k+1,k}}{d\varphi_{k-1,k}} \right)}. \quad (\text{III.89})$$

ГЛАВА IV. КОНСТРУИРАНЕ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ-ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ. ЯКОСТНИ И ДИНАМИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

IV.1 ТЕХНИЧЕСКИ ПРОЕКТ НА ЛОСТОВО-ВЕРИЖЕН МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ

След оразмеряване на кинематичната схема на манипулационния механизъм се пристъпва към конструктивната му реализация.

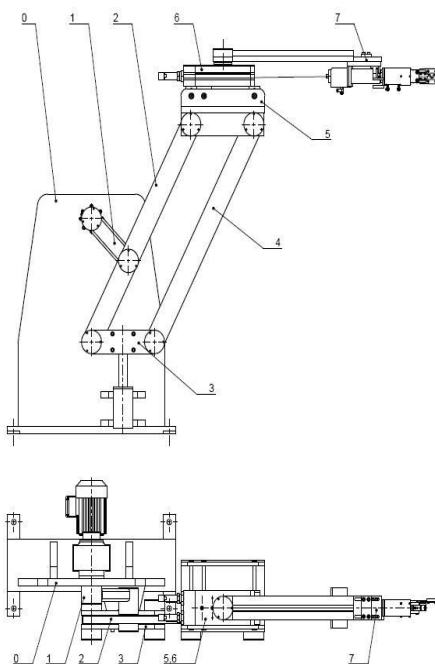
Към стойката 0 се присъединяват последователно първото звено 1 второто звено 2, носача 3 и хващач с ротационен модул 4 (фиг. IV.1). При тази компоновка на модулите след изваждане на отливката от леярската машина, ротационният модул завърта на 90° (за машини с топла камера), след което хващачът я освобождава надолу към конвейера.



Фиг.IV.1 Прототип на екстрактор с лостово-верижен манипуляционен механизъм

IV.2 ТЕХНИЧЕСКИ ПРОЕКТ НА ЛОСТОВ МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ

Създаден е модел на манипуляционния механизъм на специализиран робот-екстрактор в средата на Pro/Engineer (фиг.IV.4). Извършена е физическа симулация на движението на механизма посредством продукта Pro/Mechanism. Получените резултати показват, че разработените математични модели адекватно отразяват структурата на механичните системи и характера на връзките на съставляващите ги механизми.



Фиг.IV.4 Прототип на екстрактор с лостов манипуляционен механизъм

IV.3 ЯКОСТНИ И ДИНАМИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЛОСТОВО-ВЕРИЖНИЯ МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ

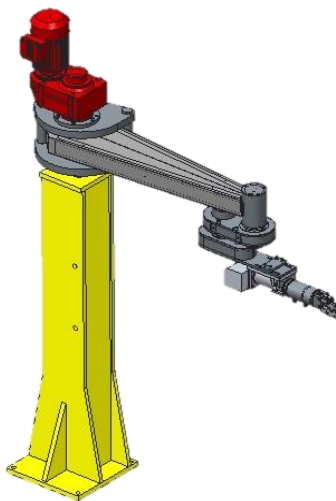
Интензивното развитие на компютърната технология доведе до разширяване на възможностите на инженерните анализи по посока на точност и комплексност на изследваните физични задачи както по отношение на геометричната сложност и брой на елементите, така и в посока на моделиране на мултифизични, взаимосвързани проблеми.

Инженерните анализи са основен елемент от създаването на виртуалния прототип и имат следните основни цели:

- Да пресъздадат поведението на разработвания обект в работни условия на възможно най-ранен етап;
- Да намалят времето за разработка на изделието, като спестят изготвянето на физични прототипи;
- Да оценят конкретни физични величини (често пъти тези величини трудно могат да бъдат пряко определени въз основа на физическо моделиране);
- Да позволят развитието на нови, подобрени варианти въз основа на изходната конструкция (оптимизация).

Създаденият и все по-широко използван CAD/CAE инструментариум се основава на т.нар. „виртуално прототипиране”, което се състои в използването на компютърен тримерен модел с ниво на функционален реализъм, близко до това на физическия модел. “Дигиталната структура” на виртуалния модел съставлява едно от важните му предимства. Това е качество, което в комбинация със съвременната компютърна техника, позволява ревизиране, валидиране и оптимизация на продукта по един много бърз, икономичен и ефективен начин. При изследването на якостно – деформационното поведение на екстрактор с лостово-верижен механизъм е използван методът на крайните елементи (МКЕ), който по своята същност е апроксимационен компютърно ориентиран метод, намиращ широко приложение в анализа на непрекъснати среди.

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕКСТРАКТОР С ЛОСТОВО-ВЕРИЖЕН МЕХАНИЗЪМ



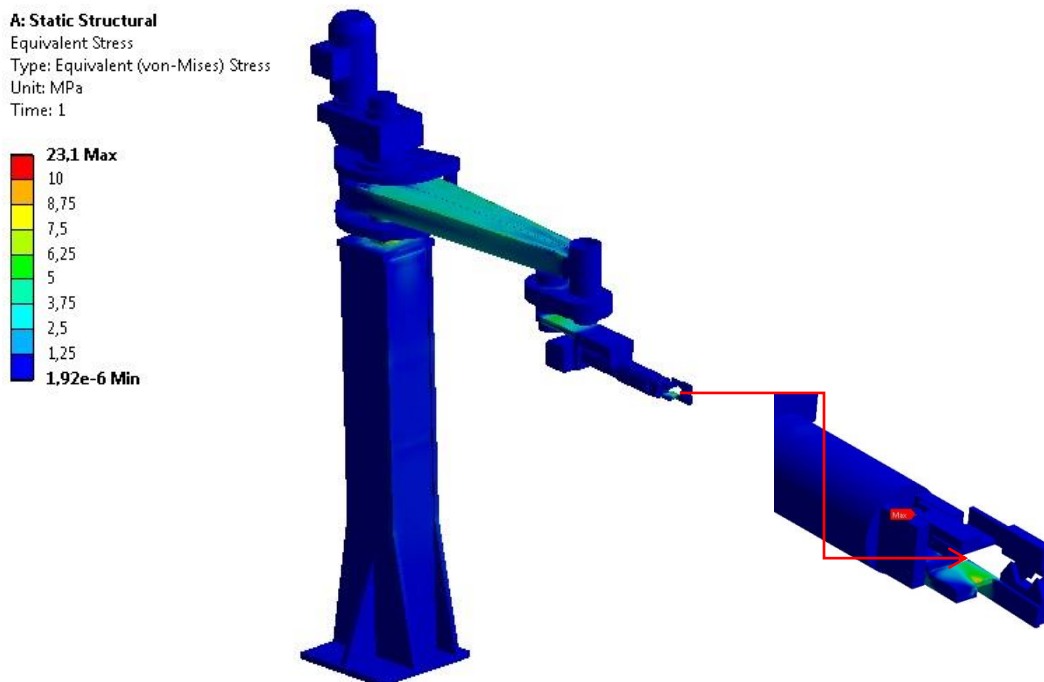
Фиг.IV.5 3D модел на екстрактора с лостово-верижен механизъм

Модел от крайни елементи

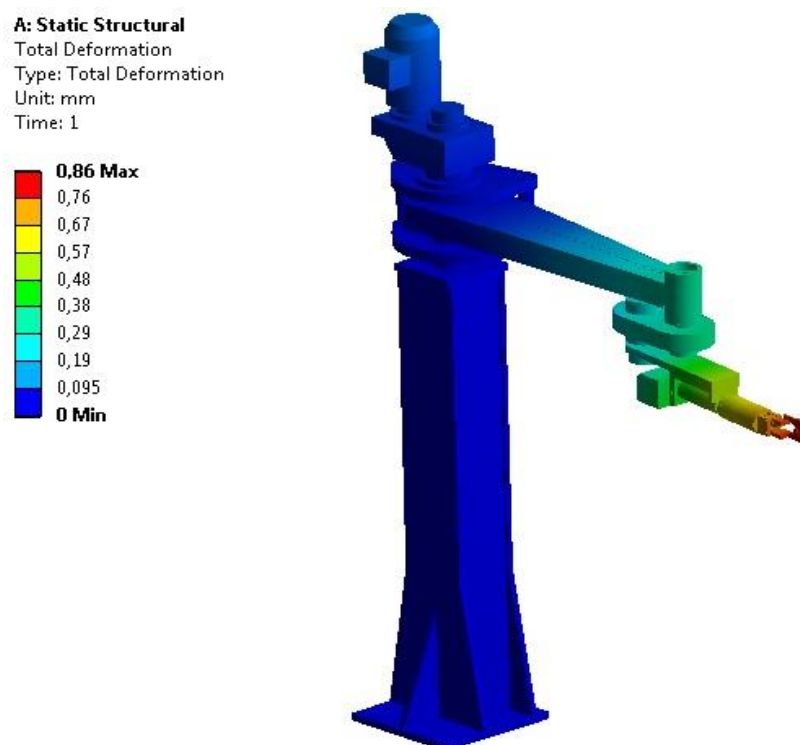
Създаден е модел от крайни елементи състоящ се от 73653 елемента и 326077 възела. Структурните компоненти са съединени посредством контактни елементи, като всички заварени детайли са симулирани чрез модел на контакт тип „bonded”, а всички оси от тип “frictionless”.

Якостно-деформационен анализ

На фиг.IV.9 и фиг.IV.10 са показани респективно получените напрежения и деформации при изследването на манипулатора.



Фиг.IV.9 Напрежения в манипулатора с лостово-верижен механизъм



Фиг.IV.10 Деформации в манипулатора с лостово-верижен механизъм

Както се очаква поради малката маса на отливките получените напрежения и деформации са пренебрежимо малки. Получените максимални деформации са около 0.1 mm, а получените максимално големи напрежения под 24 МПа.

IV.4 ЯКОСТНИ И ДИНАМИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЛОСТОВ МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕКСТРАКТОР С ЛОСТОВ МЕХАНИЗЪМ

Конструкцията на екстрактора с лостов манипуляционен механизъм, разработена в среда на Pro/engineer, е показана на фиг.IV.17.



Фиг.IV.17 3D модел на манипулатора с лостов механизъм

За намаляване на изчислителното време е разработен и числен симулационен модел въз основа на вече изградения опростен геометричен виртуален модел на изделието. Извършените опростявания и корекции не оказват влияние на получените резултати от анализите, но съществено улесняват изчислителният модел.

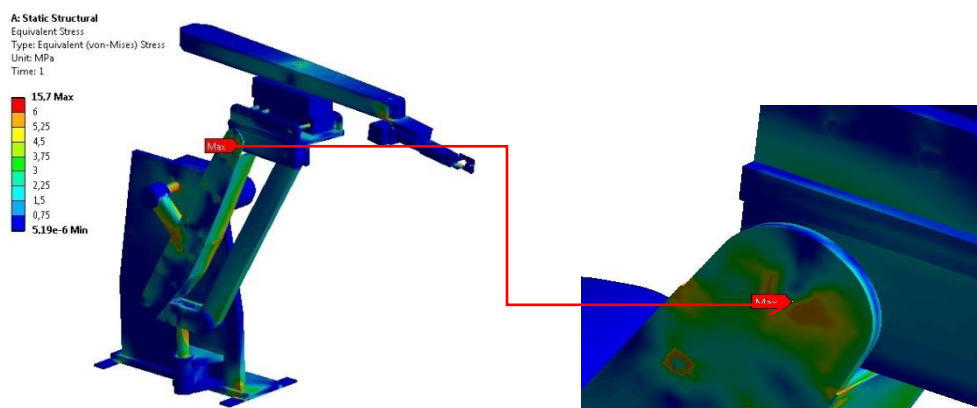
Модел от крайни елементи

Генериран е модел от крайни елементи състоящ се от 187271 елемента и 833633 възела. Структурните компоненти са съединени посредством контактни елементи, като всички заварени детайли са симулирани чрез модел на контакт тип „bonded”, а всочки оси от тип “frictionless”.

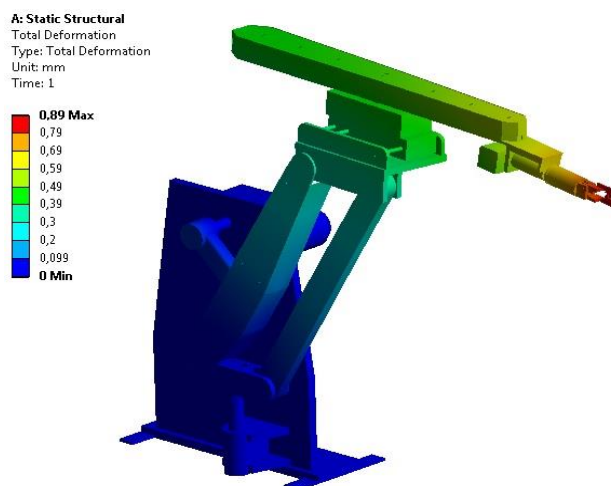
РЕЗУЛТАТИ ОТ ИНЖЕНЕРНИЯ АНАЛИЗ

Якостно-деформационен анализ

На фиг.IV.21 и фиг.IV.22 са показани респективно получените напрежения и деформации при изследването на манипулатора.



Фиг.IV.21 Напрежения в манипулатора с лостов механизъм



Фиг.IV.22 Деформации в манипулатора с лостов механизъм

Както се очакваше, поради малката маса на отливките, получените напрежения и деформации са пренебрежимо малки. Максималните регистрираните деформации са около 0.1 mm , а получените максимално големи напрежения под 16 MPa.

ГЛАВА V. ОБОБЩЕНИЕ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ И ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

V.2. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Научно-приложни приноси:

1.1 Създадени са метод и механо-математичен модел за синтез на шарнирни четириизвени механизми с квази-праволинейна транслация на мотовилката, прилагането на който в голяма степен намалява недостатъците като запазва предимствата на основния лостов механизъм на съществуващите екстрактори на отливки.

1.2 Съставени са математични модели на първични кинематични вериги, които включват не само въртящи, но и плъзгащи кинематични двоици. С това става възможен синтезът по четири безкрайно близки относителни положения на ориентиращи лостови, управляващи, предавателни механизми, вградени в шестзвонни Q-манипулатори, синтезът в краен интервал на обобщената координата на лостови механизми по метода на максимално свитата еволута, както и синтезът на механизми

с профилирани висши кинематични двойци.

1.3 Съставени са математични модели на ориентиращ механизъм, където по зададена целева ориентация, включително при постоянна ориентация на крайния ефектор и предварително определени предавателни функции на управляващите предавателни механизми, са изведени първите две предавателни функции, необходими за синтезирането му, независимо от неговия вид. Съставените математични модели са обобщени за неограничен брой звена на първичната кинематична верига.

2. Приложни приноси:

2.1 Проектиран и конструиран е с основното участие на автора модел на лостово-верижен манипулационен механизъм, с което са постигнати изцяло поставените функционални и конструктивни изисквания към екстрактор на отливки от хоризонтални машини за леене под налягане. По този начин са апробирани поставените в дисертационната работа цел и задачи, както в теоретичен, така и в доказване на приложимостта на предложения метод.

2.2 Проектиран и конструиран е с основното участие на автора модел на лостов манипулационен механизъм, с което са постигнати изцяло поставените функционални и конструктивни изисквания към екстрактор на отливки от хоризонтални машини за леене под налягане. По този начин са апробирани поставените в дисертационната работа цел и задачи, както в теоретичен, така и в доказване на приложимостта на предложения метод.

ГЛАВА VI. СТАТИИ И ДОГОВОРИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

VI.1. СТАТИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Гълъбов, В., С. Савчев, В. Славов, Г. Славков, **Я. Софронов**, Стоянова, Я. СИНТЕЗ НА ЛОСТОВО-ВЕРИЖЕН ХИПОЦИКЛИЧЕН МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ НА СПЕЦИАЛИЗИРАН РОБОТ ЗА ИЗВАЖДАНЕ НА ОТЛИВКИ. *Inter. Conf. AUTOMATICS & INFORMATIONS`08*, Sofia, 2008, VI-21-25.
2. Гълъбов, В., В. Славков, С. Савчев, Г. Славов, Г. Тодоров, Н. Николов, **Я. Софронов**, Я. Стоянова, Я. ИЗБОР НА СХЕМНО РЕШЕНИЕ ЗА ИНТЕГРИРАНО ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ЕКСТРАКТОР НА ОТЛИВКИ С ПНЕВМОЗАДВИЖВАНЕ. *Inter. Conf. AUTOMATICS & INFORMATIONS`10*, Sofia, 2010, III-537 – III-542.
3. Гълъбов, В., **Я. Софронов**, А. Милев, СИНТЕЗ НА ОСНОВНИЯ МЕХАНИЗЪМ НА РОБОТ-ЕКСТРАКТОР НА ОТЛИВКИ, *Механика на машините*, № 97, 2012, с. 3-8.
4. Гълъбов, В., **Я. Софронов**, А. Милев, ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДАВАТЕЛНИТЕ ФУНКЦИИ НА МЕХАНИЗМИ ЗА ОРИЕНТАЦИЯ НА КРАЙНИЯ ЕФЕКТОР НА Q-МАНИПУЛАТОРИ, *Механика на машините*, № 97, 2012, с. 9-14.
5. Гълъбов, В., **Я. Софронов**, А. Милев, ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДАВАТЕЛНИТЕ ФУНКЦИИ НА МЕХАНИЗМИ ЗА ОРИЕНТАЦИЯ НА КРАЙНИЯ ЕФЕКТОР НА ШЕСТЗВЕННИ Q-МАНИПУЛАТОРИ, *Механика на машините*, № 97, 2012, с. 15-19.
6. **Софронов, Я.**, ЯКОСТНИ И ДИНАМИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЛОСТОВО-ВЕРИЖЕН И ЛОСТОВ МАНИПУЛАЦИОНЕН МЕХАНИЗЪМ НА РОБОТИ-ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ, *Българско списание за инженерно проектиране*, ISSN 1313-7530, (под печат).

VI.2. ДОГОВОРИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Договор № 907НИ-5/2007 „ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗРАБОТВАНЕ НА МОДЕЛ НА СПЕЦИАЛИЗИРАН РОБОТ-ЕКСТРАКТОР”, НИС при ТУ-София, *Ръководител на темата: проф. д.т.н. Витан Гълъбов.*
2. Договор № 112пд045-5/2011 „МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАНИПУЛАЦИОННИ МЕХАНИЗМИ НА РОБОТИ - ЕКСТРАКТОРИ НА ОТЛИВКИ СЪС СРЕДСТВАТА НА ВИРТУАЛНОТО ИНЖЕНЕРСТВО”, НИС при ТУ-София, *Ръководител на темата: проф. д-р Георги Тодоров.*

ANNOTATION

European and global trend is going to maximizing the proportion of the production to be equipped with automation systems. In particular the casting production and especially machine casting of aluminum alloys provides extremely wide field for implementation of specialized robots for dosing and feeding of casting machines, for extraction and control, palletizing and transport of finished parts, cleaning and lubrication of molds and etc.

The aim of present PhD thesis is creation of new simplified and highly reliable types of mechanisms of specialized robots extractors for extracting the castings from horizontal injection molding machines by applying a modern methods for structural and metric synthesis and design.

To achieve the aim where examined, according to functional classification, structures of different manipulation mechanisms, also were synthesized two-, three-, four-, five- and N-linkages of the primary kinematic chain. Metrical synthesis were made to four-, six- and eight linkage structures.

A method and mechanical-mathematical model for synthesis of four bar mechanisms with quasi-rectilinear translation of the rocker was developed, the implementation of which greatly reduces the disadvantages, while retaining the advantages of the main linkage mechanism of existing die-cast extractors.

Mathematical models of primary kinematic chains, which include not only rotating, but sliding kinematic couples were composed. This model made possible the synthesis of four infinitely close relative positions of orientation, control, transfer mechanism embedded in the six-bars Q-manipulators.

Mathematical models of orientation mechanism where composed which follows goal trajectory, including permanent orientation of the end effector and predetermined transmission functions of control transmission mechanisms are calculated for first two transfer functions needed for its synthesis, whatever its type is.