



Технически университет – София
Инженерно-педагогически факултет - Сливен

маг. инж. Ина Димитрова Николова

**ПРОЕКТИРАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА
ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ МОДУЛИ, ПОДХОДЯЩИ ЗА
ЗАДВИЖВАЩИ УСТРОЙСТВА НА
РЕКОНФИГУРИРУЕМИ И МЕХАТРОННИ СИСТЕМИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна
степен „доктор“

Професионално направление: 5.1 Машинно инженерство

Научна специалност: Машинознание и машинни елементи

Научен ръководител:
доц. д-р инж. Димитринка Славова Дахтерова

Сливен
2021

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедрен съвет на катедра “Механика, машиностроене и топлотехника” при Инженерно-педагогически факултет – Сливен към Технически университет – София, състоял се на 15.07.2021 г.

Докторантът е зачислен в редовна форма със заповед № 701/ 21.02.2014 г. и е отчислен с право на защита със Заповед № 813/ 06.03.2017 г. на Ректора на Технически университет – София.

Дисертацията се състои от списък на съкращенията, списък на фигурите, списък на таблиците, четири глави, приноси, научни публикации към дисертационния труд, използвана литература и съдържание. Записката е с общ обем от 142 страници и съдържа 58 фигури и 18 таблици. Към дисертационния труд са оформени 10 приложения. Всяка глава завършва с изводи.

Означенията на формулите и графиките в автореферата съответстват на тези от дисертационния труд.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 09.11.2021 г. от 11:00 ч. в зала 1207 на Инженерно-педагогически факултет – Сливен към Технически университет – София на открито заседание на научно жури, определено със Заповед № ОЖ-5.1-45 от 27.07.2021 г. на Ректора на Технически университет – София, в състав:

1. проф. д.т.н. инж. Станимир Михайлов Карапетков - Председател
2. доц. д-р инж. Димитринка Славова Дахтерова - Научен секретар
3. проф. д-р инж. Радостин Симеонов Долчинков - Член
4. проф. д-р инж. Велизара Иванова Пенчева - Член
5. доц. д-р инж. Димитър Петков Караиванов - Член

Обща характеристика на дисертационния труд

1.1. Актуалност на проблема

Изключително голямото разнообразие от машини и компоненти предполага бързото и разнообразно развитие на задвижващи системи за тях. Наред с това и обширното разнообразие от варианти на електромеханични модули (ЕММ) налагат съвременните инженери да използват многокритериалната оптимизация за бърз избор на правилното задвижване за конкретно приложение.

Във всички етапи на процеса на проектиране на нови машини и системи, както и при избора на подходящо за дадено приложение оборудване, инженерите и проектантите се сблъскват с една от важните задачи, а именно вземането на решения [42]. Многовариантността на задачите за проектиране и оптимизация на ЕММ предполага прилагането на методи за многокритериална оптимизация [1], а методите от типа ауторанжиращи предлагат удобна методология за решаване на подобен вид проблеми.

Наред с това, съществуването на много фирми, произвеждащи ЕММ допълнително затруднява процеса на избор на подходящо оборудване. Проектирането на база данни, която включва информация за възможни варианти на ЕММ и за съществуващи ЕММ на конкретни фирми ще улесни допълнително процесите на оптимизация и избор на подходящо задвижване за дадено приложение.

Направеният преглед на наличните публикации показва, че няма разработена единна система, която да обхваща процесите на избор на ЕММ за дадено приложение, извършване на оптимизация на подходящите варианти на оборудване, както и анализ на динамиката на ЕММ.

Цели и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се създаде подход за проектиране, избор на дадено приложение и оптимизация на ЕММ, подходящи за задвижващи устройства на реконфигурируеми и мехатронни системи. Основно изискване е подходът да позволява оптимален избор и на фирмени ЕММ, въз основа на каталози и интернет данни с технически параметри и показатели, както и на градивни елементи за тях.

Задачи:

1. Да се проучат тенденциите в развитието на електрозадвижванията на съвременните производствени машини, както и на опита на световноизвестни фирми в тази област.
2. Да се проучат тенденциите в развитието на методите за многокритериална оптимизация от типа на ауторанжиращите, предлагащи удобна методология за решаване на подобни по вид

проблеми, както и на наличните софтуерни продукти, с които може да се улесни процеса на оптимизация.

3. Да се проучи модулният принцип на проектиране, залегнал като основен подход при производството на различни по вид машини и системи, като реконфигурируеми и мехатронни, роботи и манипулатори и т.н.
4. Да се проектира релационна база данни при синтез на ЕММ, която да включва някои геометрични и технически параметри на варианти на ЕММ, с цел улесняване на решаването на многокритериалната оптимизационна задача.
5. Да се реши многокритериалната оптимизационна задача чрез прилагане на проучените ауторанжиращи методи, които осигуряват подходящ алгоритъм за подреждане на зададения брой алтернативи по ранг въз основа на избрани критерии.
6. Да се направи динамично изследване на ЕММ и оптимизация по динамични критерии.

Научна новост и практическа приложимост

Разработена е релационна база данни, която обхваща, както възможни комбинации на съставните компоненти на електромеханичните модули (електродвигатели и редуктори), така и електромеханични модули, включени в стандартната производствена гама на различни фирми-производители. Базата данни позволява бърз и лесен достъп до редица технически и геометрични параметри на модулите, както и извеждане на необходимата информация в подходящ файлов формат, което улеснява значително решаването на оптимизационната задача.

Базата данни може да намери приложение в учебният процес, като чрез нея нагледно могат да бъдат показани възможни комбинации между структурните компоненти на ЕММ, техните механични и електрически параметри, технически характеристики и графична тримерна визуализация на структурните компоненти, налични за свободно ползване.

Решена е и многокритериалната оптимизационна задача чрез използване на два метода от типа „ауторанжиращи“ - представеният нов метод RAZOR, който за пръв път е публикуван в статиите към дисертационния труд и световно утвърденият метод PROMETHEE.

Създадени са два модела на динамиката на ЕММ – при използване на готовите блок-модули, налични в софтуерния продукт MathWorks Matlab и чрез решаване на съставеното диференциално уравнение на динамиката на ЕММ. Двата модела показват сходни резултати при провеждането на динамичното изследване и могат да се използват при извършването на анализ

на динамиката на електромеханични модули със задвижващи електродвигатели с различни параметри и при различни условия.

Апробация на резултатите от дисертацията

Дисертационният труд е докладван и обсъден на катедрен съвет на катедра “Механика, машиностроене и топлотехника” при ТУ – София, ИПФ – Сливен. Части от темата са докладвани на:

- XXIV Международна научна конференция "trans & MOTAUTO '16, проведена в гр. Бургас;
- „Национална конференция с международно участие Сливен 2018“, проведена в хотелски комплекс „Свети Никола“ в гр. Сливен;
- 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (IWAMA 2016), University of Manchester, UK, 10-11 November 2016.

Резултатите от дисертацията са отразени в пет публикации, четири от които на английски език. Една от публикациите е отпечатана в списание Tehnički vjesnik IF: 0,670 и е индексирана в Scopus.

Съдържание на дисертационния труд

ГЛАВА ПЪРВА – ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

В резултат на направените проучвания на 123 литературни източници, от които 90 на латиница и 21 интернет сайтове могат да бъдат формулирани следните основни изводи:

1. Съвременните електрозадвижвания са многодвигателни, като основен задвижващ компонент на различните машини и системи са ЕММ, обединяващи електрическата и механичната част на задвижванията. Те се проектират и произвеждат на база принципа за модулно проектиране. Поради редицата предимства, модулният подход при проектиране е намерил приложение в множество области, като електро автомобили [84], роботи и манипулатори [76], ветрогенератори [100], металорежещи машини [94], строително инженерство [59], дори и при производство на мебели [86].

2. Производството на изключително голямо разнообразие на електромеханични модули, дължащо се на множеството им области на приложение, от световни лидери в машиностроителното производство, като ABB, Schneider Electric, Siemens, Lenze, Bonfiglioli, SEW Eurodrive, Fuji Electric и много други налага разработването както на нови, така и непрекъснато обновяване на съществуващи алгоритми за проектиране и оптимизация на ЕММ.

3. Направеният преглед на наличните публикации показва, че няма разработена единна система, която да обхваща процесите на избор на ЕММ за дадено приложение, извършване на оптимизация на подходящ вариант на

оборудване, както и анализ на динамиката на ЕММ. Фирмите, производители на ЕММ, обикновено разработват и предоставят на своите клиенти софтуер за избор и оразмеряване на предлаганите от тях продукти.

4. Проектирането на база данни, която включва информация за възможни варианти на ЕММ и за съществуващи модули на конкретни фирми ще улесни допълнително процесите на оптимизация на ЕММ, подходящи за задвижващи устройства на реконфигурируеми и мехатронни системи.

5. Изключително голямото разнообразие от варианти на ЕММ налага във всички етапи на процеса на проектиране на нови машини и системи, както и при избора на подходящо за дадено приложение оборудване, съвременните инженери и проектантите да се сблъскват с една от важните задачи, свързана с вземане на решение.

6. Многовариантността на задачите за проектиране и оптимизация на ЕММ предполага прилагането на методи за многокритериална оптимизация за бърз избор на правилното задвижване, удовлетворяващо изискванията на конкретното приложение. Съществува голямо разнообразие от подобни методи, всеки от които може да бъде приложен при оптимизацията на ЕММ.

7. Методите за многокритериална оптимизация от типа ауторанжиращи предлагат удобна методология за решаване на подобен вид проблеми, като са налични множество програмни продукти, с които процесът на оптимизация може да бъде улеснен значително.

ГЛАВА ВТОРА – ПРОЕКТИРАНЕ НА БАЗА ДАННИ ПРИ СИНТЕЗ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ МОДУЛИ

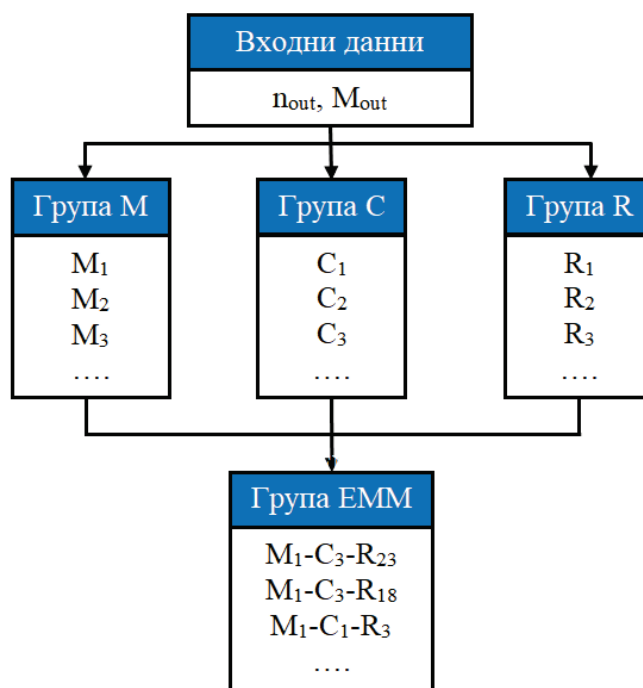
Обичайна практика на компаниите, произвеждащи ЕММ и компоненти и аксесоари за тях е да предоставят софтуер за проектиране на задвижване от предлаганата от тях гама продукти. Процесът на избор на подходящ ЕММ за дадено приложение може да се окаже труден, поради голямото разнообразие от варианти и фирми, които ги предлагат. Създаването на база данни (БД) с ЕММ на различни производители ще допринесе за по-лесния бърз избор при проектиране на нови машини и модернизация на съществуващи такива и ще улесни значително решаването на многокритериалната оптимизационна задача.

За постигане на целта на дисертационния труд е разработена релационна база данни, която включва някои технически и геометрични параметри на различни комбинации ЕММ.

Структурата на проектираната БД се определя от структурните компоненти на ЕММ, които могат да се разделят най-общо на три групи, всяка от които съответства на таблица в проектираната БД:

- Група М – електродвигатели – която включва основните технически характеристики на електродвигателите;
- Група С – съединители – всеки запис отговаря на конкретен тип съединител;
- Група R – редуктори – в която са дадени най-често използваните типове редуктори и техните основни технически характеристики.

На фиг. 2.1 е показана блок-схема на структурата на БД. При търсене в БД с определени стойности за входни данни, трябва да се изведат всички резултати на зададени между електродвигатели, съединители и редуктори комбинации, които удовлетворяват търсенето. В практиката най-често се среща директно свързване между електродвигателя и редуктора или посредством адаптер (в случаите напр. когато двата компонента са от различни производители), а в по-редки случаи се налага свързването да се осъществи посредством съединител.



Фиг. 2.1 Блок-схема на структурата на проектираната БД

Създадени са три варианта на база данни, които се различават помежду си в структурно и организационно отношение. И в трите варианта са въведени комбинации между електродвигател и редуктор, както за синтез на ЕММ чрез налични комбинации от редуктори и електродвигатели, така и готови съществуващи продукти на фирми-производители на мотор-редуктори.

2.3. Вариант 1 - база данни с готови комбинации ЕММ

Това е варианта с най-опростена структура. Състои се само от една таблица, в която са въведени възможните съчетания на структурните единици

– електродвигатели и редуктори. Това са комбинации от съществуващи мотор-редуктори, включени в стандартната производствена гама на някои фирми – производители на мотор-редуктори.

С цел улесняване достъпа до информацията в БД от потребителя е разработен формуляр за търсене, който се състои от различни по вид функционални елементи: текстови полета, функционални бутони с различна функция, зададена чрез макроси или Visual Basic код и подформуляр. Крайният вид на формуляра е показан на фиг. 2.6.

Фиг. 2.6 Общ вид на формуляра за търсене на вариант 1
1 – текстово поле; 2 – функционални бутони; 3 – подформуляр

Търсенето измежду наличните в БД записи се осъществява чрез въвеждане на стойности в текстовите полета „честота на въртене на изходящия вал n2 (min-1)” и „въртящ момент на изходящия вал M2 (Nm)“. След натискане на функционалния бутон „Търсене“ се активира създадената заявка (query), чрез която се извеждат в всички налични в БД записи за възможни комбинации ЕММ, удовлетворяващи търсените стойности.

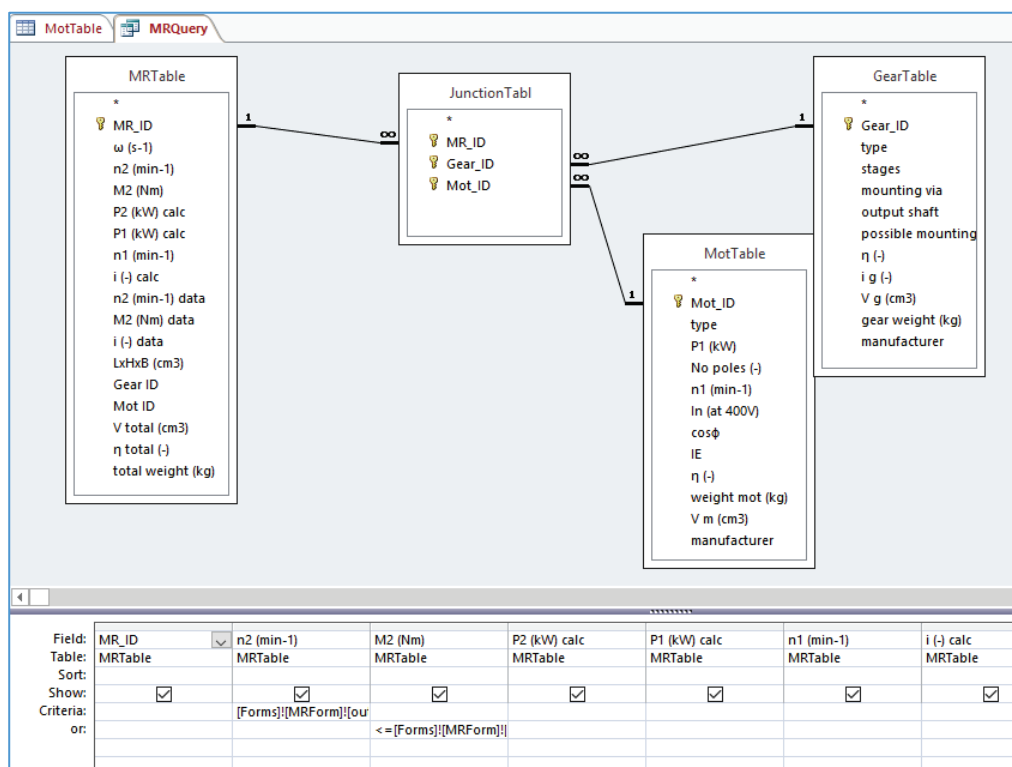
За допълнително опростяване на структурата на БД геометричните параметри на получените варианти на ЕММ, както и някои от техническите данни за електродвигателите и редукторите са изнесени в отделни файлове, за всеки конкретен вариант. Достъпът до тях се осъществява чрез колоната за хипервръзка в полето Gear_Mot_ID.

2.4. Вариант 2 - база данни за синтез на ЕММ

Вторият вариант на БД е по-сложен в структурно отношение от предходния вариант. Състои се от три основни таблици: (1) електродвигатели,

(2) редуктори и (3) ЕММ, и от една спомагателна свързваща таблица. В таблица електродвигатели са дадени основните технически параметри на въведените в БД електродвигатели, а в таблица редуктори – основните технически параметри на въведените редуктори (цилиндрични съосни, конусни, червячни, с успоредни валове и комбинации между тях). Спомагателната таблица служи за свързване на трите основни таблици, като между нея и другите три таблици са задени връзки (релации) от типа една-към-много.

Структурата на заявката на втория вариант на БД се различава от структурата на заявката при първия вариант по дефинираните между таблиците връзки. На фиг. 2.12 е показан общият вид на заявката, като от фигурата могат да се видят ясно зададените между таблиците релации.



Фиг. 2.12 Общ вид на заявката – вариант 2 на БД

Пример:

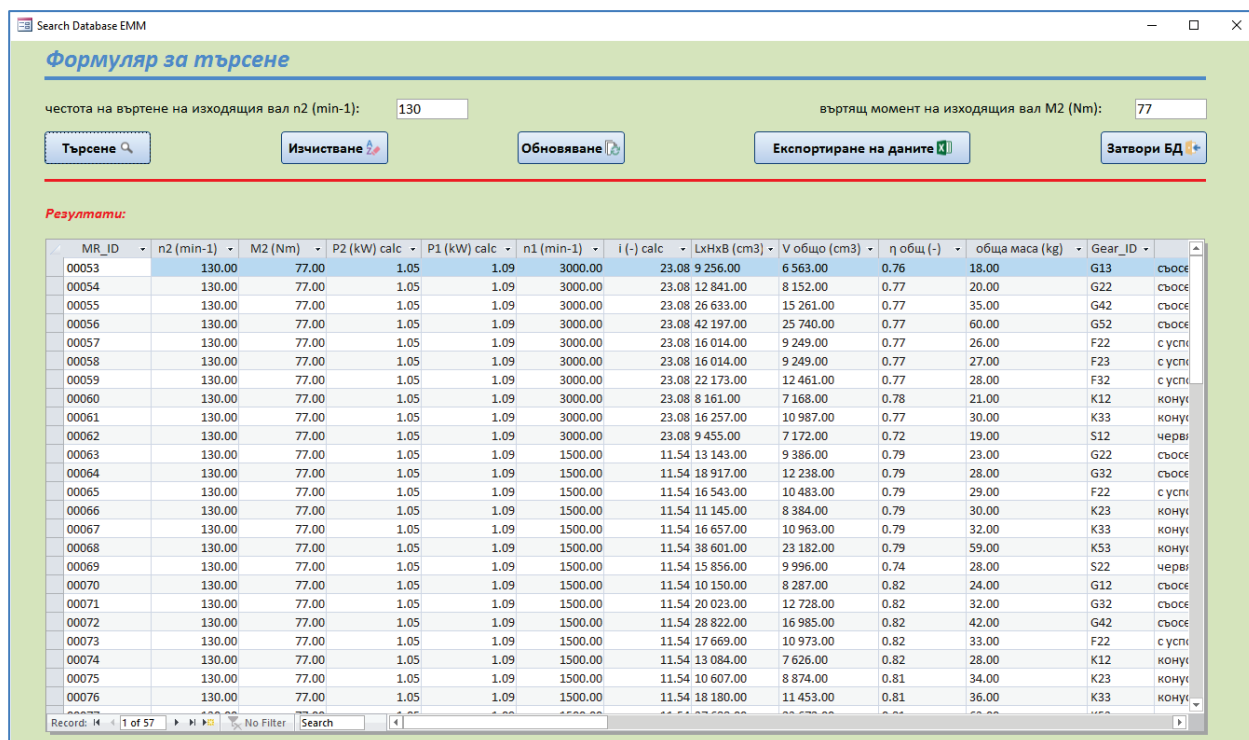
Синтез на ЕММ при следните входни данни: $n_{изх.} = 130 \text{ min-1}$; $M_{изх.} = 77 \text{ Nm}$. В зависимост от типа на електродвигателя и редуктора се получават различни варианти за ЕММ. В поле резултати на формуляра за търсене се извеждат 57 варианта на готови ЕММ на три различни германски фирми, които са въведени в БД. Комбинациите се състоят от:

- асинхронен електродвигател с накъсо съединен с номинална мощност 1,10 kW при изчислени стойности за входящата и изходящата мощност,

съответно $P1 \text{ (kW)} = 1.09$ и $P2 \text{ (kW)} = 1.05$ и различен брой полюси (2, 4, 6 и 8);

- редуктор (цилиндричен съосен, цилиндричен с успоредни валове, конусен и червячен) с 2 или 3 степени на редукция.

На фиг. 2.13 са дадени резултатите от търсенето.



MR_ID	n2 (min-1)	M2 (Nm)	P2 (kW) calc	P1 (kW) calc	n1 (min-1)	i (-) calc	LxHxB (cm3)	V общо (cm3)	η общ (-)	обща маса (kg)	Gear_ID	
00053	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	9 256.00	6 563.00	0.76	18.00	G13	съосен
00054	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	12 841.00	8 152.00	0.77	20.00	G22	съосен
00055	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	26 633.00	15 261.00	0.77	35.00	G42	съосен
00056	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	42 197.00	25 740.00	0.77	60.00	G52	съосен
00057	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	16 014.00	9 249.00	0.77	26.00	F22	с успоредни валове
00058	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	16 014.00	9 249.00	0.77	27.00	F23	с успоредни валове
00059	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	22 173.00	12 461.00	0.77	28.00	F32	с успоредни валове
00060	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	8 161.00	7 168.00	0.78	21.00	K12	конусен
00061	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	16 257.00	10 987.00	0.77	30.00	K33	конусен
00062	130.00	77.00	1.05	1.09	3000.00	23.08	9 455.00	7 172.00	0.72	19.00	S12	червячен
00063	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	13 143.00	9 386.00	0.79	23.00	G22	съосен
00064	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	18 917.00	12 238.00	0.79	28.00	G32	съосен
00065	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	16 543.00	10 483.00	0.79	29.00	F22	с успоредни валове
00066	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	11 145.00	8 384.00	0.79	30.00	K23	конусен
00067	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	16 657.00	10 963.00	0.79	32.00	K33	конусен
00068	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	38 601.00	23 182.00	0.79	59.00	K53	конусен
00069	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	15 856.00	9 996.00	0.74	28.00	S22	червячен
00070	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	10 150.00	8 287.00	0.82	24.00	G12	съосен
00071	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	20 023.00	12 728.00	0.82	32.00	G32	съосен
00072	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	28 822.00	16 985.00	0.82	42.00	G42	съосен
00073	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	17 669.00	10 973.00	0.82	33.00	F22	с успоредни валове
00074	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	13 084.00	7 626.00	0.82	28.00	K12	конусен
00075	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	10 607.00	8 874.00	0.81	34.00	K23	конусен
00076	130.00	77.00	1.05	1.09	1500.00	11.54	18 180.00	11 453.00	0.81	36.00	K33	конусен

Фиг. 2.13 Резултати от търсенето при вариант 2 на БД

2.5. Вариант 3 - база данни за синтез на ЕММ с опростен потребителски интерфейс

Третият разработен вариант на БД има идентична структура с вариант 2, но основната разлика и от двата варианта е начинът по който се извеждат резултатите от търсенето и общият вид на формуляра за търсене. Докато при другите два варианта на БД въвеждането на стойности за входните данни и извеждането на резултатите се осъществява чрез използване на различните елементи, изграждащи формуляра, при вариант 3 това се осъществява чрез въвеждане и потвърждаване на стойностите в изскачащи прозорци, които се извеждат при отваряне на БД. Резултатите от търсенето се визуализират във формуляр, като всеки намерен в БД запис е на отделна страница. Създадени са функционални бутони за улесняване на работата с така структурирания формуляр. Общият вид на изскачащите прозорци е даден на фиг. 2.14, а на фиг. 2.16 е представен общият на формуляра за извеждане на резултатите.

Фиг. 2.14 Изкачащи прозорци – вариант 3 на БД

Фиг. 2.16 Общ вид на формуляра за извеждане на резултатите – вариант 3 на БД

2.7. Резултати и изводи

Проектираната база данни предоставя бърз и лесен достъп до информация относно налични комбинации между редуктори и електродвигатели, както и на готови ЕММ на различни производители, а начинът по който са структурирани и трите варианта позволява лесно и бързо извеждане на данните.

В структурно отношение първия вариант е най-опростен, но същевременно групирането на данните само в една таблица е предпоставка за влошаване производителността на базата данни при увеличаване на обема от информация и за дублиране на данни.

Втория и третия вариант имат една и съща структура, изградена въз основа на няколко свързани помежду си таблици, заявки и формуляри за достъп до данните от потребителя. Изградените по този модел БД дават

възможност за бързо и лесно обновяване и поддръжка на БД. Изградените между таблиците връзки предотвратяват дублирането на информация, като промяната в запис в която и да е таблица се отразява автоматично в свързаните към нея други таблици.

Проектираната база данни може да послужи като основа за последващата оптимизация на наличните различни варианти на ЕММ. Бързото и лесно извеждане на необходимите данни в подходящ файлов формат позволява съвместимост с различни готови ПП за оптимизация, което значително улеснява следващата стъпка от процеса на оптимален избор на задвижване.

Освен това БД може да намери приложение и в учебният процес, като чрез нея нагледно могат да бъдат показани възможни комбинации между структурните елементи на ЕММ, техните механични и електрически параметри и технически характеристики. Базата данни е отворена за обновяване и допълване.

Използвайки SQL (Structured Query Language) – език за програмиране, проектиран за управление на данните от релационни БД или за обработка на потока данни в релационни системи за управление или чрез система за управление на БД с отворен код е възможно да се извърши миграция на проектираната БД от Access към SQL, което ще позволи създаването на онлайн БД.

ГЛАВА ТРЕТА – ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ МОДУЛИ

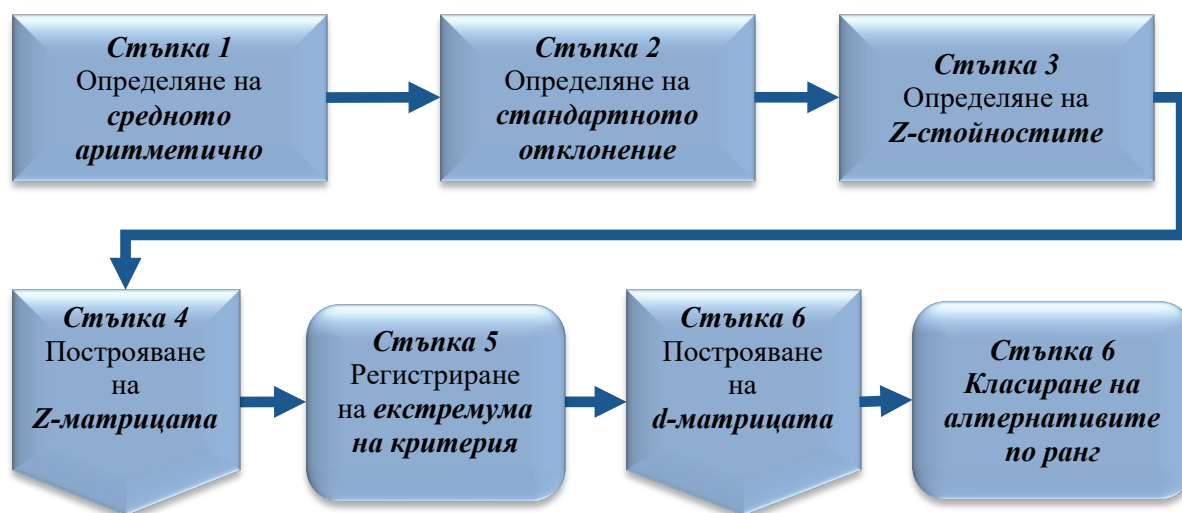
3.1. Обща информация

Оптимизацията е една важна стъпка към изграждането на надеждна и функционална система. Задачите за проектиране на ЕММ и за избор на подходящо електромеханично задвижване за конкретно приложение са многовариантни, което прави извършването на оптимизация още по-наложително.

Първата стъпка при решаването на оптимизационни задачи е да се определят целевите функции и техните изисквания и ограничения. Критериите за оптимизация при многокритериалния оптимизационен анализ на ЕММ може да се обособят в две основни групи: (1) статични и (2) динамични критерии. Статичните критерии представляват геометрични, енергийни и икономически характеристики на ЕММ, като сумарният обем на модула, общият к.п.д., сравнителна оценка, цена и т.н. Динамичните критерии, от друга страна, представляват някои от динамичните характеристики на ЕММ, като бързодействие, степен на неравномерност на пусковия режим, коефициент на динамично претоварване в пусков режим и др.

Съществува голямо разнообразие от методи за оптимизация, които могат да бъдат приложени при извършването на многокритериална оптимизация на ЕММ. В дисертацията е представено извършване на оптимизация на различни варианти на ЕММ по статични и по динамични критерии чрез използване на два метода от типа ауторанжиращи – новоразработения метод RAZOR и световно утвърдения метод PROMETHEE.

На фиг. 3.1 е показана блок-схема на последователността на стъпките при използване на метод RAZOR, а на фиг. 3.2 е дадена блок схема на стъпките при прилагане на метод PROMETHEE.



Фиг. 3.1 Последователност на стъпките при изпълняване на метод RAZOR

За прилагането на метод RAZOR е необходимо първо да се определи средното аритметично на критерия $k_i(\cdot)$:

$$(3.1) \quad \bar{x}(k_s) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m k_s(a_i) \quad \forall s = 1, 2, \dots, n$$

където m е броят на избраните алтернативи.

Въз основа на изчислената стойност за средното аритметично се изчислява стандартното отклонение за критерия $k_i(\cdot)$:

$$(3.2) \quad \sigma(k_s) = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (k_s(a_i) - \bar{x}(k_s))^2} \quad \forall s = 1, 2, \dots, n$$

Следващата стъпка от процедурата е да се изчислят Z-стойностите, съгласно следното уравнение:

$$(3.3) \quad z_x = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

където: x е конкретна стойност от разпределението (редът с данни), $\bar{x}$ е средното аритметично на това разпределение, а σ е стандартното отклонение на същото разпределение. На базата на тези стойности се построява т.нар. Z-матрица $\{z(k_s)_i\}$:

$$(3.4) \quad z(k_s)_i = \frac{k_s(a_i) - \bar{x}(k_s)}{\sigma(k_s)} \quad \forall s = 1, 2, \dots, n \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

Регистрира се екстремума на критерия $k_i(\cdot)$ над A :

$$(3.5) \quad \bar{k}_s = \text{Extr}\{k_s(a_1), k_s(a_2), \dots, k_s(a_m)\} \quad \forall s = 1, 2, \dots, n$$

и се получава т.нар. вектор „Идеална алтернатива“, който е изграден от екстремумите на компонентите $k_i(\cdot)$ на критерия $k(\cdot)$:

$$(3.6) \quad \overline{K(A)} = (\bar{k}_1, \bar{k}_2, \dots, \bar{k}_n)$$

Построява се т.нар. d-матрица, която е матрица с разстоянията от всяка алтернатива до „Идеалната алтернатива“:

$$(3.7) \quad d_{si} = |z(k_s)_i - z(\bar{k}_s)_i| = \left| \frac{k_s(a_i) - \bar{k}_s}{\sigma(k_s)} \right| \quad \forall s = 1, 2, \dots, n \quad \forall i = 1, 2, \dots, m$$

Най-накрая се дефинира класирането на алтернативите по ранг въз основа на изчисления рейтинг:

$$(3.8) \quad R_i^n = \sum_{s=1}^n d_{si} \cdot w_i$$

където с w_i са означени тегловните коефициенти ($w_i = 0 \div 1$). Алтернативата a_i доминира алтернативата a_j по отношение на оптималността на n -тия критерий, ако $R_i^n \geq R_j^n$.



Фиг. 3.2 Последователност на стъпките при изпълняване на метод PROMETHEE

Първата стъпка при прилагане на метод PROMETHEE е определянето на разликите между алтернативите за всеки един критерий (сравняване на алтернативите по двойки):

$$(3.9) \quad x = k_s(a_i) - k_s(a_j) \quad a_i, a_j \in A \quad i \neq j \quad i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

Остойносттаването на разликите се извършва чрез специално въведени функции на предпочитание [26].

Извършва се остойносттаваща релация за всички алтернативи чрез изчисляване на многокритериалната степен на предпочитание на едната алтернатива над другата, съгласно следната зависимост:

$$(3.16) \quad \pi(a_i, a_j) = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n P_s^{\dots}(a_i, a_j)$$

където n е броят на критериите. Така формулирана зависимост (3.16) предполага равнопоставеност на критериите. В случай, че е необходимо ЛВР да изрази предпочитание на един или няколко критерия, то зависимостта за степента на предпочитание трябва да се въведат тегловни коефициенти. Зависимост (3.16) ще придобие следния вид:

$$(3.16.1) \quad \pi(a_i, a_j) = \sum_{s=1}^n w_s \cdot P_s^{(\dots)}(a_i, a_j)$$

Следващата стъпка при прилагане на метод PROMETHEE е изчисляването на изходящия поток φ^+ и на входящия поток φ^- :

$$(3.21) \quad \varphi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m \pi(a_i, a_j)$$

$$(3.22) \quad \varphi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m \pi(a_j, a_i)$$

Пълна подредба на алтернативите без несъпоставимост се постига чрез отчитане на нетния поток φ за всяка алтернатива:

$$(3.19) \quad \varphi(a_i) = \varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i)$$

Ако $\varphi(a_i) > \varphi(a_j)$, то a_i има по-висок ранг от a_j . Ако $\varphi(a_i) = \varphi(a_j)$, то a_i е безразлично към a_j .

3.2.4. Числен пример 4

Извършена е многокритериална оптимизация на 13 алтернативи на ЕММ със задвижващ асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор, избрани от наличните в разработената база данни, при следните входни данни: честота на въртене на изходящия вал $n_{out} = 320 \text{ min}^{-1}$ и въртящ момент на изходящия вал $M_{out} = 41 \text{ Nm}$. Въз основа на тези стойности са изчислени входящата мощност P_{in} и изходящата мощност P_{out} : $P_{in} = 1,37 \text{ kW}$, $P_{out} = 1,43 \text{ kW}$. Електродвигател с номинална мощност $P_{nom} = 1,50 \text{ kW}$ ще може да осигури постигането на стойностите за входните данни.

За този пример са използвани електромеханични модули на немските фирми KEB Antriebstechnik GmbH и Watt Drive Antriebstechnik GmbH със следните структурни компоненти:

- асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор с номинална мощност $P_n = 1,5 \text{ kW}$ - налични са 4- и 2-полюсни електродвигатели;
- редуктор: цилиндричен съосен, конусен, червячен и с успоредни валове.

Оптимизацията е извършена по следните статични критерии:

- $k1$ - сумарният обем на ЕММ V_{Σ} , $[\text{mm}^3]$;
- $k2$ - габаритните размери на ЕММ ($L \times B \times H$), $[\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}]$;
- $k3$ - общият к.п.д. на ЕММ $\eta_{общ}$, $[-]$;
- $k4$ - общата маса на ЕММ ($m_{общо}$), $[\text{kg}]$.

Избрана е функция на предпочитание тип V (с линейно предпочитание и област на безразличие) при стойностите за праговете на предпочитание и безразличие представени в таблица 3.10.

Типа на функцията, както и стойностите за праговете са избрани, като са взети предвид следните данни:

	k1	k2	k3	k4
минимална стойност	7 554.26	7 370.18	0.71	22.50
максимална стойност	13 694.97	22 095.40	0.84	40.00
средно аритметично	10 831.79	13 356.53	0.80	30.43
стандартно отклонение	1 783.92	4 223.31	0.03	5.06

В таблица 3.11 са дадени получените стойности за входящия, изходящия и нетния потоци, за рейтинга на алтернативите и класирането по ранг на алтернативите съгласно двата метода на оптимизация. На фиг. 3.15 са представени графично резултатите от проведената оптимизация по метод PROMETHEE (фиг. 3.15 а) и метод RAZOR (фиг. 3.15 б).

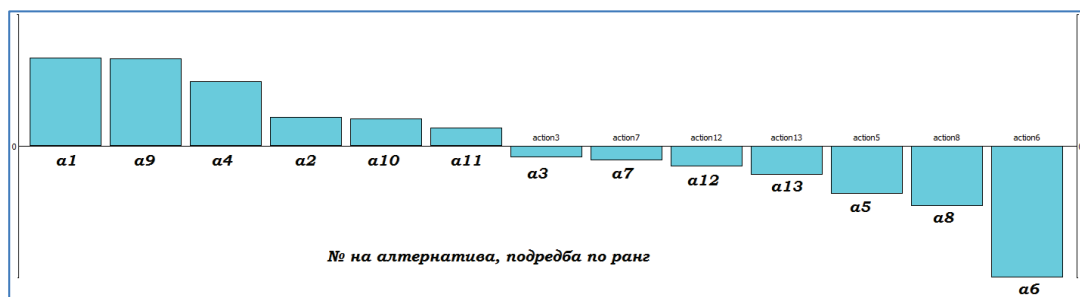
Таблица 3.10 Тип на функцията на предпочитание и стойности за праговете на предпочитание и безразличие – числен пример 4

Критерии		Екстремум	функция на предпочитание	q	p
k1	$V_{\Sigma} [mm^3]$	min	V	6 500.00	8 500.00
k2	$L \times H \times B$ [mm x mm x mm]	min	V	3 500.00	7 000.00
k3	$\eta_{общ} [-]$	max	V	0.71	0.81
k4	обща маса [kg]	min	V	11.00	11.50

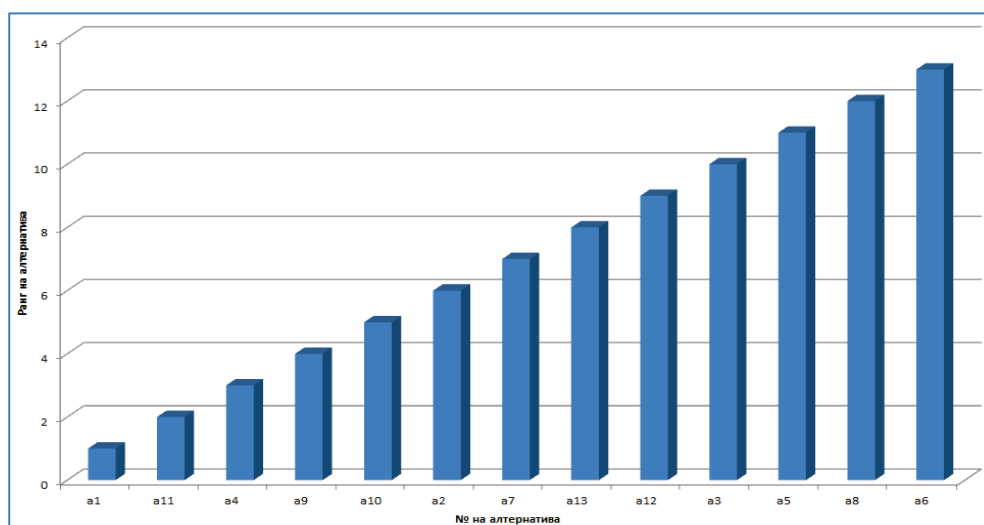
Таблица 3.11 Стойности за входящия, изходящия и нетния потоци и за рейтинга на алтернативите, както и класирането на алтернативите по ранг – числен пример 4

№	PROMETHEE				RAZOR	
	Visual PROMETHEE				MS Excel	
	$\phi +$	$\phi -$	$\phi (a_i)$	ранг	R_n	ранг
a1	0,215	0,000	0,215	1	1,821	1
a2	0,076	0,006	0,071	4	3,501	6
a3	0,028	0,055	-0,027	7	5,293	10
a4	0,158	0,000	0,158	3	2,336	3
a5	0,013	0,129	-0,117	11	5,373	11
a6	0,000	0,321	-0,321	13	7,608	13
a7	0,036	0,072	-0,036	8	4,235	7
a8	0,000	0,147	-0,147	12	7,210	12
a9	0,213	0,000	0,213	2	2,385	4
a10	0,074	0,008	0,066	5	2,608	5
a11	0,053	0,008	0,045	6	2,251	2
a12	0,019	0,068	-0,050	9	4,720	9
a13	0,019	0,089	-0,071	10	4,363	8

Въз основа на получените резултати се наблюдават някои разлики в подредбата по ранг на алтернативите при двата метода. Въпреки това, и при двата метода алтернатива **a1** е класирана на 1^{во} място. И в този случай причина за възникналите различия в подредбата по ранг на алтернативите може да се посочи много малките разлики в стойностите за критериите между някои от алтернативите.



а)



б)

Фиг. 3.15 Графично представяне на резултатите от извършената оптимизация в средата на Visual PROMETHEE Academic Edition и Microsoft Excel - числен пример 4

3.4. Анализ на резултатите и изводи

Резултатите от проведените числени експерименти показват както съвпадения в класирането по ранг на алтернативите при двата метода за многокритериална оптимизация, така и различия, които в някои от случаите са значителни. Могат да бъдат посочени следните три основни причини за възникването на тези различия:

1) Използваните програмни продукти

За извършване на оптимизацията са използвани четири програмни продукта, които в своята същност се различават значително един от друг. Visual PROMETHEE и Diviz са специално създадени за решаване на оптимизационни задачи, като Visual PROMETHEE е специализиран софтуер за работа само по метод PROMETHEE, а Diviz може да се използва както за решаване на MO3 по методите от семейството на ауторанжиращите (като ELECTRE и PROMETHEE), така и по генетични методи за оптимизация и методи с размита логика.

Microsoft Excel е програмен продукт за създаване и обработване на електронни таблици, извършване на математически изчисления, създаване на отчети и диаграми, а Matlab със своята среда Simulink предлага множество инструменти за математически и статистически изчисления и за разнообразно графично представяне на резултатите от провежданите симулации.

Всички използвани програмни продукти са подходящи за решаване на МОЗ, като ЛВР сам трябва да прецени с кой от тях ще е най-удобно да работи.

2) *Различия в методите*

Докато метод RAZOR се основава изцяло на статистическия подход з-стандартизация и ролята на ЛВР е значително намалена, то при метод PROMETHEE е от голямо значение какви предпочитания ще изрази ЛВР. За да е възможно решаването на МОЗ по метод PROMETHEE е необходимо ЛВР да има предварителни познания за същността на метода и да притежава поне базов опит при изразяване на предпочитанията.

От голямо значение за решаването на задачи от подобен тип е дали има въведени тегловни коефициенти, тъй като това до голяма степен влияе върху крайното класиране по ранг на алтернативите.

Друга разлика между двата метода, която трябва да се отбележи, е начинът на формиране на класирането по ранг. При метод PROMETHEE алтернативата, която има най-голяма стойност (положителна) за нетния поток се класира на 1^{-BO} място, а алтернативата с най-малка стойност за нетния поток – на последно място, докато при метод RAZOR алтернативата с най-голяма стойност за рейтинга R_i се класира на последно място, а алтернативата с най-малка стойност за R_i – на 1^{-BO} място.

3) *Брой на алтернативите и критериите*

При по-голям брой алтернативи, разликата в подредбата по ранг при двата метода е доста по-осезаема, особено когато за някои от алтернативите разликите между стойностите по даден критерий са много малки.

Представените методи за многокритериална оптимизация са лесни за усвояване и предлагат възможност за решаване на МОЗ с множество на брой алтернативи и критерии с висока степен на точност, като са особено подходящи при извършване на оптимизация на ЕММ. В сравнение с други методи за многокритериална оптимизация, стъпаловидните процедури по които се прилагат методи PROMETHEE и RAZOR са леки и лесни за изпълнение. Наличието на редица софтуерни продукти, които могат да бъдат използвани при решаването на подобни задачи допълнително улесняват и ускоряват процеса на работа. И двата метода предполагат възможност за геометрична визуализация на получените резултати в двумерното пространство.

Трябва също така да бъде посочена и възможността за манипулация на резултатите от оптимизацията до известна степен. Това е по-забележимо при

използване на метод PROMETHEE, тъй като изборите, които ЛВР прави при изпълнение на процедурата на метода са директно свързани с резултатите от оптимизацията.

Резултатите от проведената оптимизация могат да бъдат противоречиви, дори и в случаите когато са дефинирани тегла за критериите. Ако ЛВР все още не е убедено в това, кое от възможните решения трябва да избере, то може да се извърши последваща оптимизация на избран брой от алтернативи въз основа на проведената първоначална оптимизация, т.е. оптимизационната задача може да се раздели на няколко задачи с по-малък брой алтернативи, като могат да бъдат комбинирани и различни методи за оптимизация. По този начин ще се постигне още по-голяма точност при оценяване на възможните решения и ще се премахнат съмненията за това, кое решение трябва да бъде предпочетено пред останалите възможни.

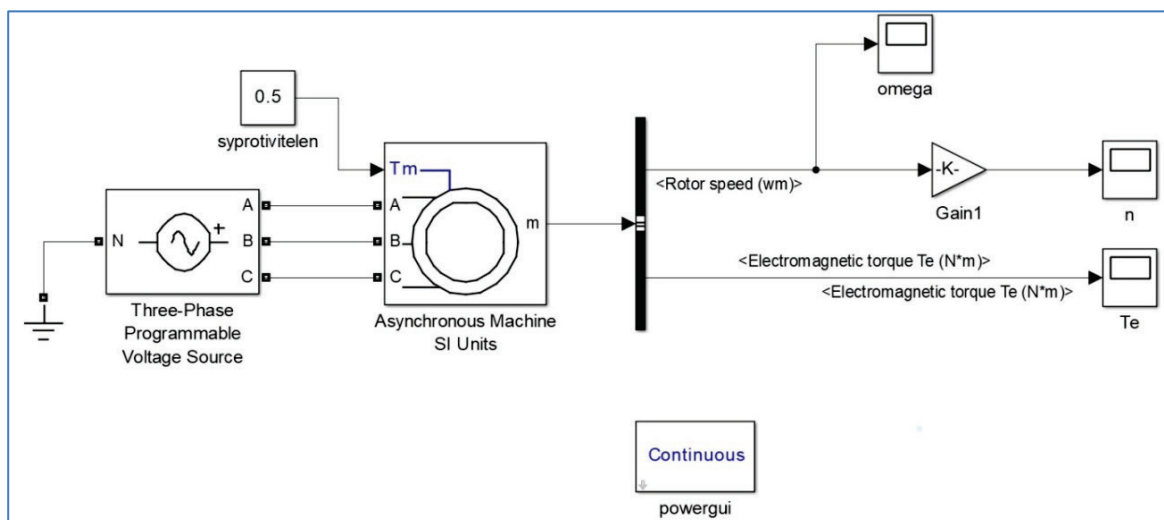
ГЛАВА ЧЕТВЪРТА – ДИНАМИЧНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ МОДУЛИ

Въз основа на направеното проучване в дисертационния труд са представени разработените (1) модел на динамиката на електромеханичен модул с трифазен асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор, използвайки готовите блок-модули на Matlab и средата Simulink и (2) модел на динамиката на електромеханичен модул чрез решаване на съставеното диференциално уравнение на движение в средата Simulink на Matlab.

4.1. Модел на динамиката на електромеханичен модул с трифазен асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор

Въз основа на направеното проучване на литературните източници е разработен модел за изследване динамиката на ЕММ с трифазен асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор, показан на фиг. 4.1. Моделът е съставен от готови блок-модули, налични в библиотеката на програмния продукт [106]. Изследват се два случая - при $M_c = \text{const}$ и при $M_c \neq \text{const}$.

Блокът Асинхронна машина SI система (Asynchronous Machine SI units) се използва за моделиране динамиката на асинхронен електродвигател. Налични са три варианта: с накъсо съединен ротор, с навит ротор и с двоен накъсо съединен ротор. Блокът може да работи в генераторен или в двигателен режим. В него се задават електрическите и механични параметри на електродвигателя, като е възможно те да се изчислят предварително и да се въведат или да се използват наличните в блока зададени модели на електродвигатели.



Фиг. 4.1 Модел на динамиката на ЕММ с трифазен асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор – Matlab/ Simulink

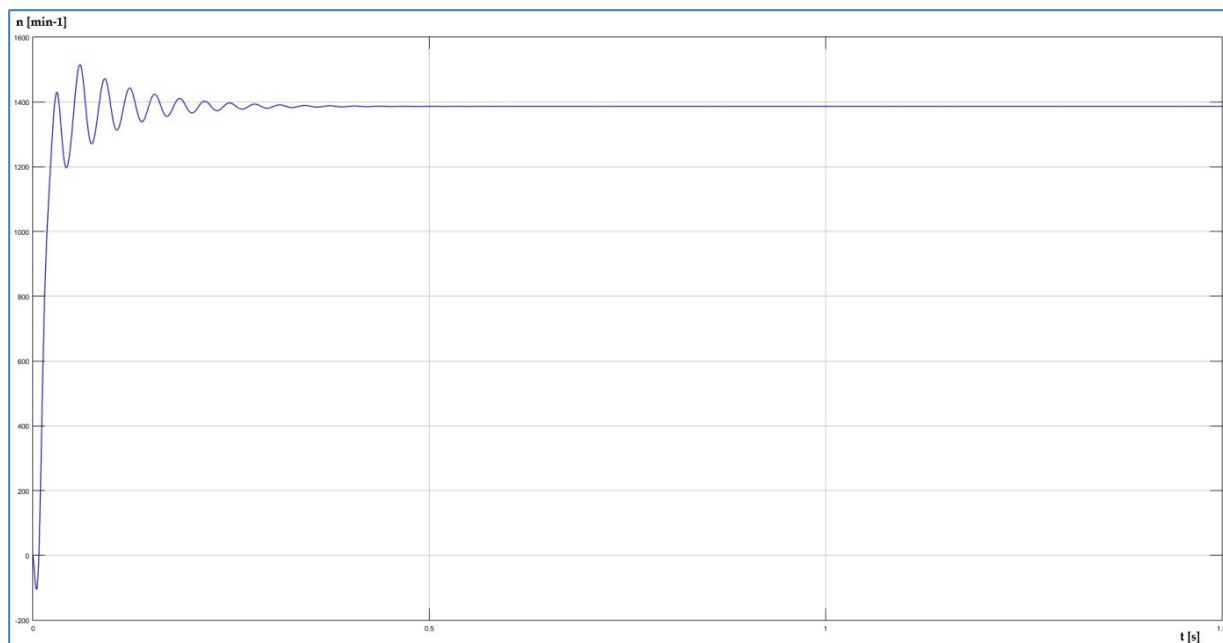
4.1.2. Пример 2

Проведени са две симулации - при постоянен съпротивителен момент ($M_c = \text{const}$) и при променлив съпротивителен момент ($M_c \neq \text{const}$). За извършване на симулацията са пресметнати предварително електрическите и механични характеристики на електродвигателя и са въведени в блок-модула Асинхронна машина, както следва:

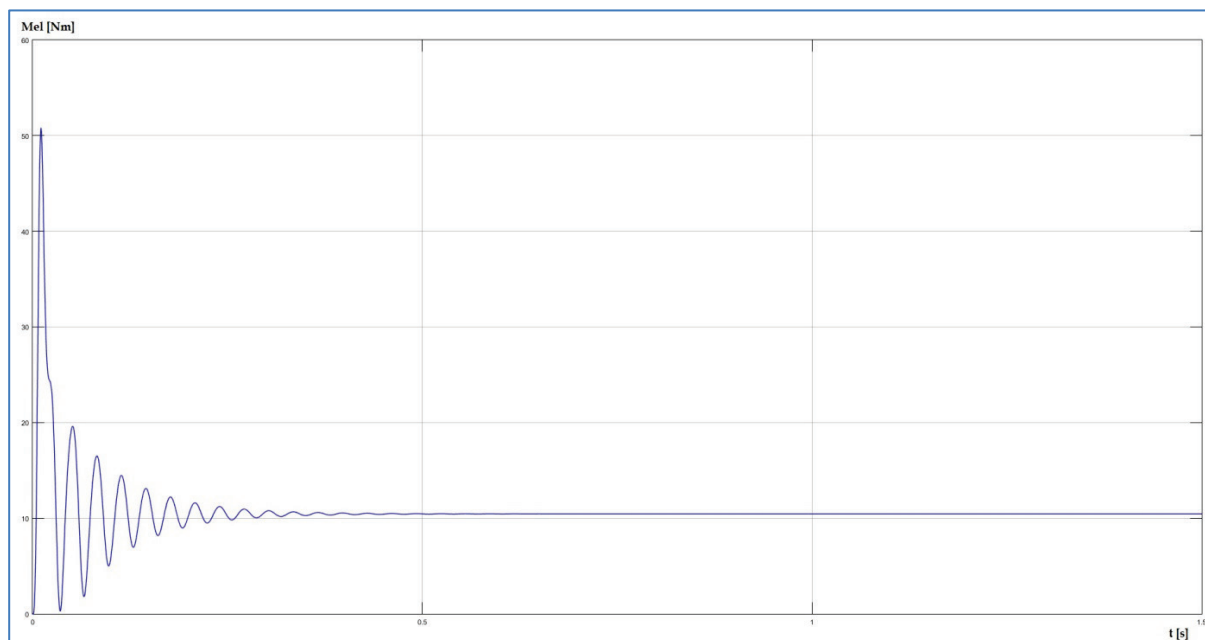
Параметър	Мерна единица	Стойност
Номинална мощност P_n	[kW]	1,5
Номинална честота на въртене на вала n_n	[min ⁻¹]	1455
Инерционен момент J	[kg.m ²]	0,0031
Номинално захранващо напрежение V_n	[V]	400
Мрежова честота f	[Hz]	50
Съпротивление на статора R_s	[Ω]	5,439
Съпротивление на ротора R'_r	[Ω]	6,316
Индуктивност на статора L_s	[H]	0,0094522
Индуктивност на ротора L'_r	[H]	0,0201146
Взаимна индуктивност L_m	[H]	0,449363

На фиг. 4.6 са изобразени графично резултатите от проведената симулация при постоянен съпротивителен момент, а на фиг. 4.7 – при променлив съпротивителен момент. Представено е изменението на честотата

на въртене на вала на електродвигателя n [min^{-1}] във функция от времето t [s] (фиг. 4.6 а) и фиг. 4.7 а) и изменението на електрическия въртящ момент M_{el} [Nm] във функция от времето t [s] (фиг. 4.6. б) и фиг. 4.7 б).

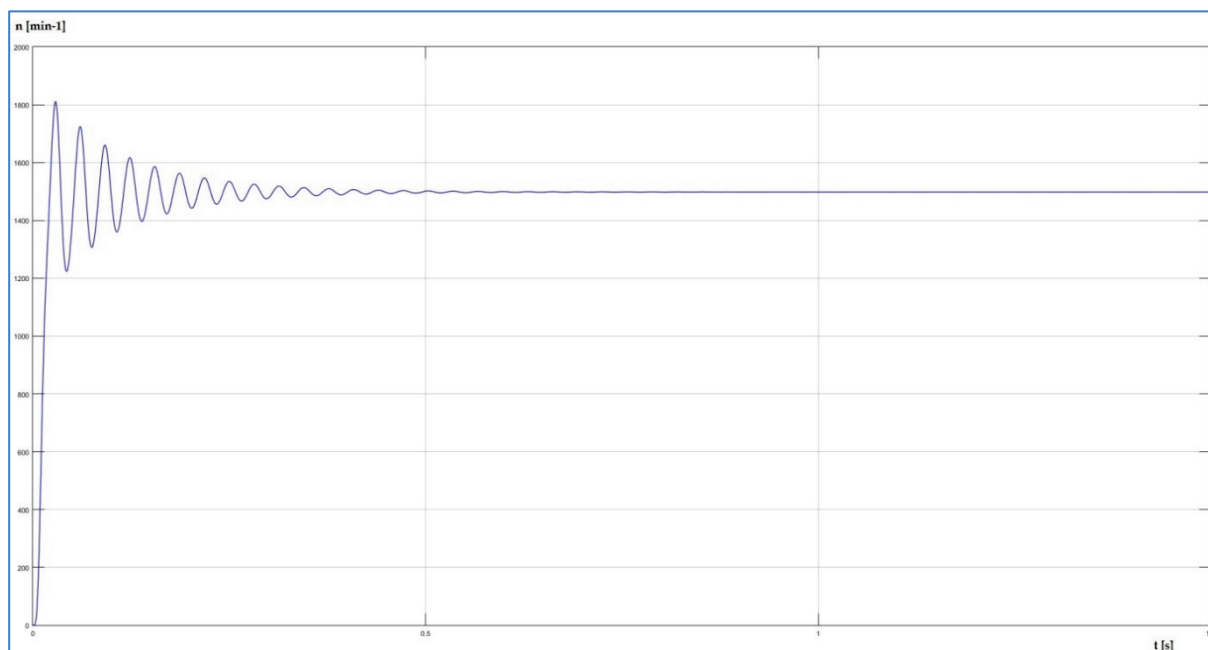


а)

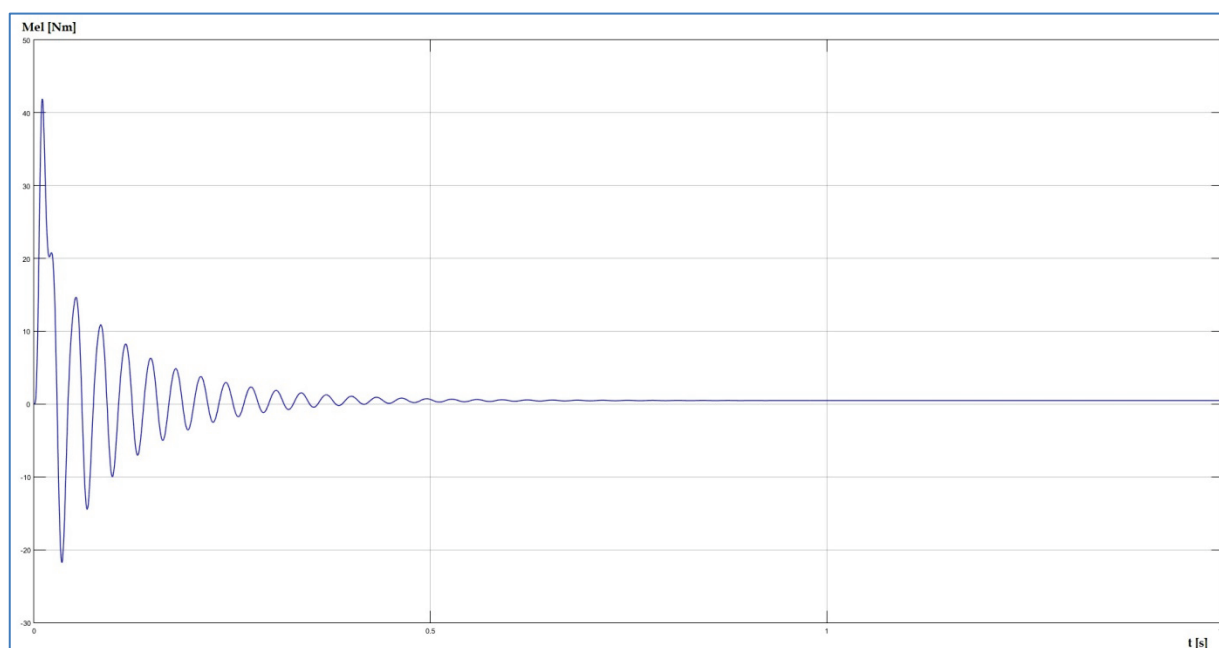


б)

Фиг. 4.6 Резултати от проведената симулация при постоянен съпротивителен момент – пример 2



а)



б)

Фиг. 4.7 *Резултати от проведената симулация при променлив съпротивителен момент – пример 2*

4.2. Модел на динамиката на EMM в средата на Matlab/ Simulink по съставен математичен модел

В средата на Matlab е разработен модел на динамиката на електромеханичен модул, състоящ се от трифазен асинхронен електродвигател

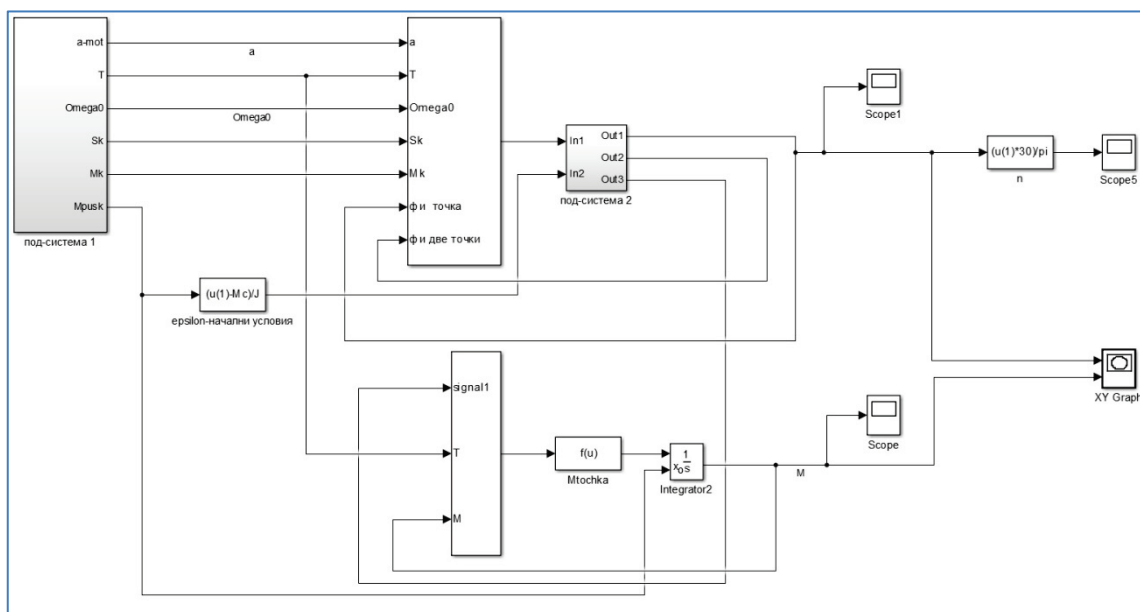
с накъсо съединен ротор и редуктор. За целта е съставен математичен модел на динамиката на ЕММ, който се свежда до едно нелинейно диференциално уравнение от III^{ти} род (при постоянен съпротивителен момент - $M_c \approx \text{const}$), както следва [1]:

$$(4.14) \quad (J + \Delta J)\ddot{\varphi} + M_c + \frac{1}{T} [(J + \Delta J)\dot{\varphi} + M_c] = \frac{1}{T} \frac{2M_k(\omega_0 - \dot{\varphi})S_k\omega_0(1+a)}{(\omega_0 - \dot{\varphi})^2 + (S_k\omega_0)^2 + 2aS_k\omega_0},$$

където

- $J + \Delta J$ - инерционен момент на електромеханичната система, $[\text{kgm}^2]$;
- T – времеконстанта, $[\text{s}^{-1}]$;
- M_k – критичен (максимален) въртящ момент, $[\text{Nm}]$;
- S_k - критично хлъзгане;
- a - отношението на активното съпротивление в статора и ротора;
- ω_0 - синхронна ъглова скорост, $[\text{s}^{-1}]$.

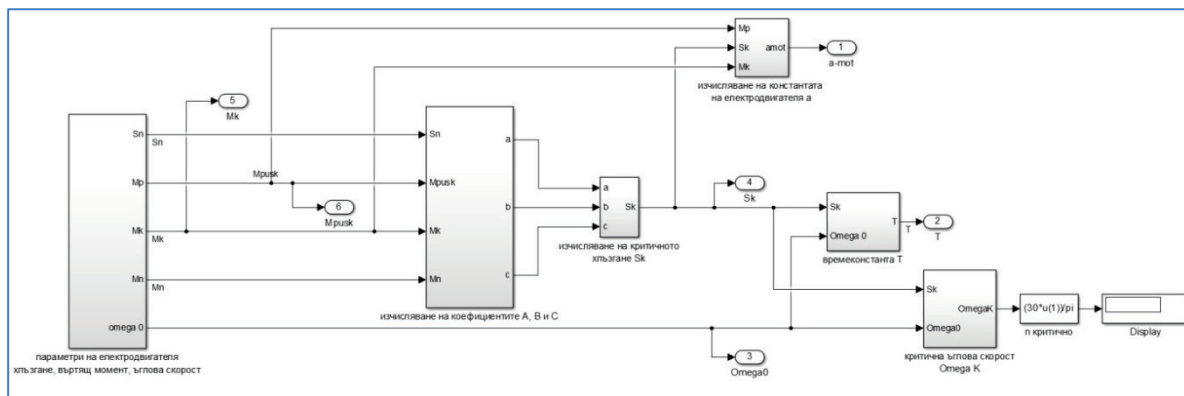
На фиг. 4.8 е представен общият вид на създадения в Matlab модел на динамиката на ЕММ. За улеснение на визуализацията моделът е представен като съвкупност от под-системи във всяка от които се решават съответните уравнения и зависимости.



Фиг. 4.8 Общ вид на разработеният в Matlab модел на динамиката на ЕММ

На фиг. 4.9 е представен общият вид на под-система 1 (subsystem 1). В този блок са зададени всички зависимости за изчисляване на основните параметри на модела. За целта предварително са зададени и заредени в модела посредством т.нар. m-файл стойностите на номиналната мощност на електродвигателя в $[\text{kW}]$, номиналната и синхронната честота на вала на

електродвигателя в $[\text{min}^{-1}]$, инерционният момент на електродвигателя и на електромеханичната система в $[\text{kg.cm}^2]$ и съпротивителният момент в $[\text{Nm}]$.



Фиг. 4.9 Общ вид на под-система 1

В Под-система 1 са въведени зависимостите за изчисляване на синхронната ъглова скорост ω_0 $[\text{s}^{-1}]$, номиналната ъглова скорост ω_n $[\text{s}^{-1}]$, критичната ъглова скорост ω_k $[\text{s}^{-1}]$, номиналното хлъзгане S_n $[-]$, константите A , B и C за определяне на критичното хлъзгане S_k $[-]$, номиналният въртящ момент M_n $[\text{Nm}]$, пусковият въртящ момент M_p $[\text{Nm}]$, критичният въртящ момент M_k $[\text{Nm}]$, константата a и времеконстантата T , посредством наличните в Matlab/ Simulink блок-модули, както следва:

$$(4.15) \quad \omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$$

където n_0 е синхронната честотата на въртене на вала/

$$(4.16) \quad \omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$$

където n_n е номиналната честотата на въртене на вала.

$$(4.17) \quad \omega_k = \omega_0(1 - S_k)$$

$$(4.18) \quad S = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}$$

$$(4.19) \quad M_n = \frac{1000 P_n}{\omega_n}$$

където P_n е номиналната мощност на електродвигателя.

$$(4.20) \quad n_k = \frac{30 \omega_k}{\pi}$$

$$(4.21) \quad a = \frac{M_n(1 + S_k^2) - 2M_k S_k}{2(M_k - M_n)S_k}$$

$$(4.22) \quad T = \frac{1}{S_k \omega_0}$$

$$(4.23) \quad AS_k^2 + 2BS_k + C = 0,$$

където

$$A = M_H(M_k - M_\Pi) - S_H M_\Pi(M_k - M_H);$$

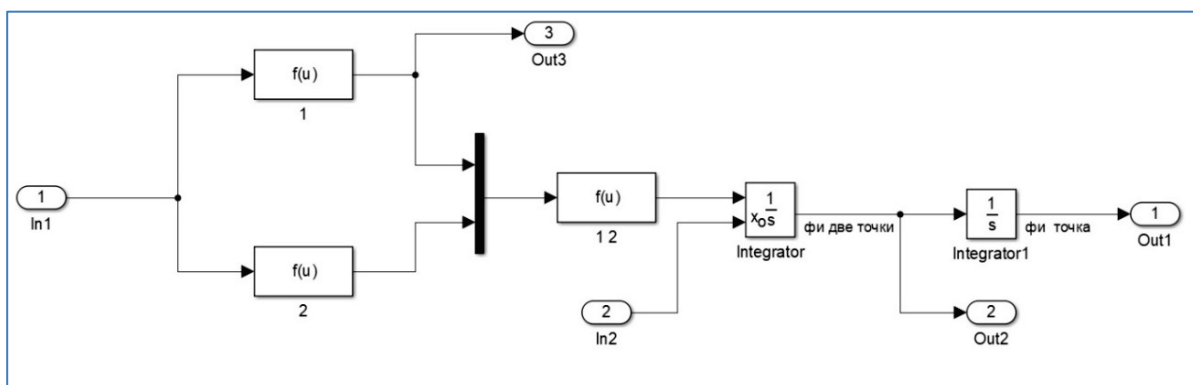
$$B = S_H M_k(M_\Pi - M_H);$$

$$C = S_H[S_H M_H(M_k - M_\Pi) - M_\Pi(M_k - M_H)].$$

Квадратното уравнение за определяне на стойността на критичното хлъзгане S_k се решава в блок от типа Matlab Function.

В под-система 2 на модела (фиг. 4.10) се решава ДУД от III-ти род чрез изразяване на третата производна $\ddot{\phi}$. На изхода на блока се извеждат три сигнала:

- ъгловата честота на въртене на вала ω в $[s^{-1}]$ – сигнала се въвежда в блок от типа Function и се изчислява честотата на въртене на вала в $[min^{-1}]$;
- $\ddot{\phi}$, което се връща обратно към блока от типа Mux и се зарежда в под-система 2;
- зависимост (signal 1) чрез която в последствие се получава въртящият момент.



Фиг. 4.10 Общ вид на под-система 2

Сигналят от третия изход от под-система 2 (signal 1), заедно с времеконстантата T се въвеждат в блок от типа Mux. Чрез блок от типа Function и блок от типа integrator се получава въртящият момент, който се зарежда в блока Mux, заедно със сигнал 1 и T .

Графичната визуализация на честотата на въртене на вала и въртящия момент се осъществява чрез блокове от типа Scope, а чрез блок от типа XY Graph се визуализира характеристиката въртящ момент – честота на въртене на вала.

Проведени са две симулации при следните начални условия:

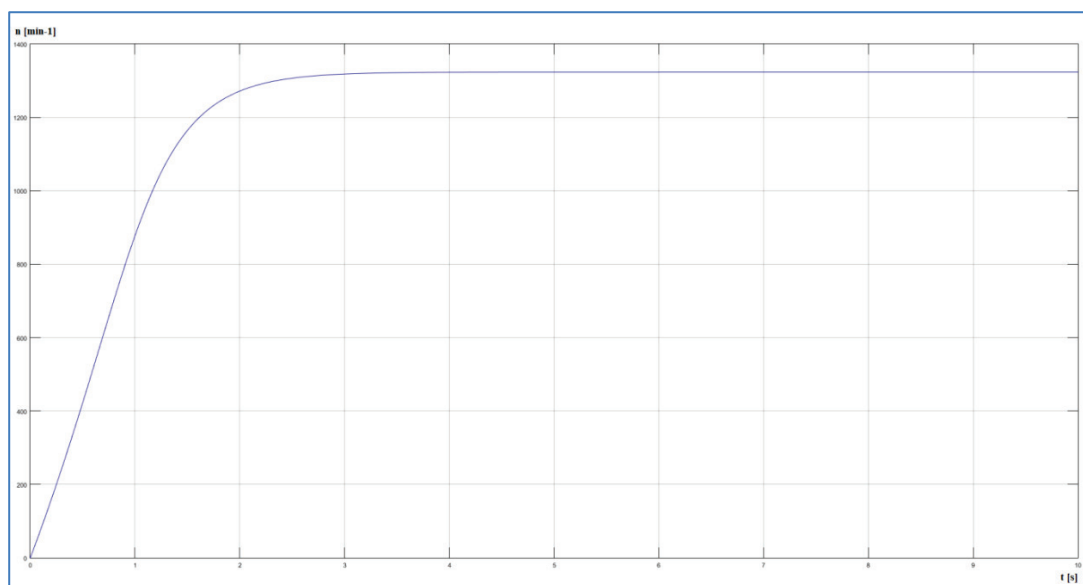
$$\ddot{\varphi} = \varepsilon = \frac{M_{\text{п}} - M_{\text{с}}}{J}; \quad \dot{\varphi} = \omega = 0; \quad \varphi_0 = 0.$$

4.2.1. Пример 1

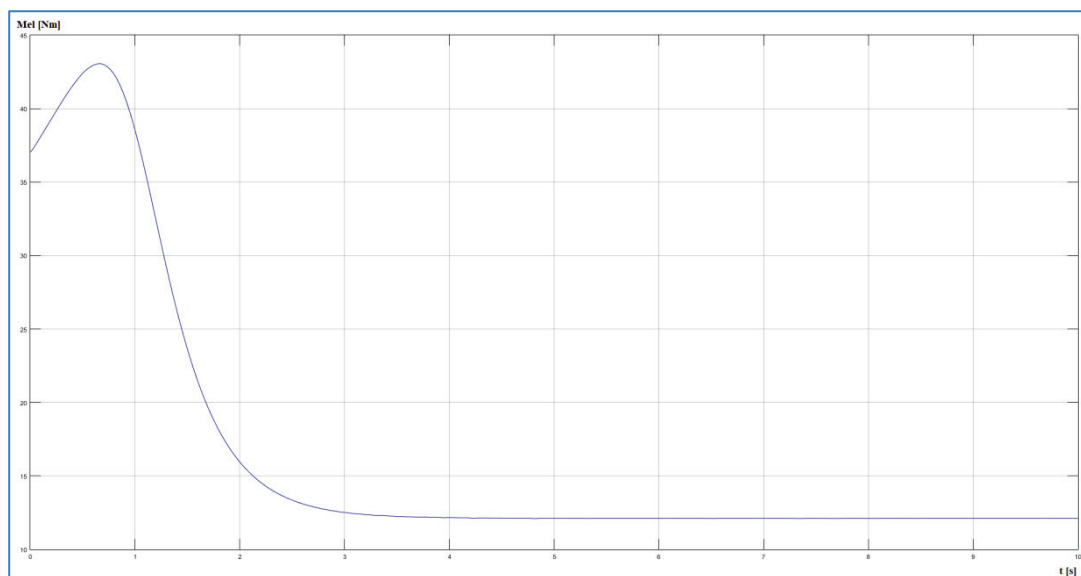
Проведена е симулация при следните входни данни, които се зареждат в модела чрез m-файл:

Параметър	Мерна единица	Стойност
Номинална мощност $P_{\text{н}}$	[kW]	1.5
Синхронна честота на въртене на вала n_0	[min ⁻¹]	1500
Номинална честота на въртене на вала $n_{\text{н}}$	[min ⁻¹]	1430
Инерционен момент на електродвигателя $J_{\text{дв.}}$	[kg.m ²]	0.005
Инерционен момент на системата J	[kg.m ²]	0,313
Съпротивителен въртящ момент $M_{\text{с}}$	[Nm]	12
Съотношение между пусковия и номиналния въртящ момент $\lambda_{\text{н}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$	[-]	3.7
Съотношение между критичния и номиналния въртящ момент $\lambda_{\text{к}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}}$	[-]	4.3

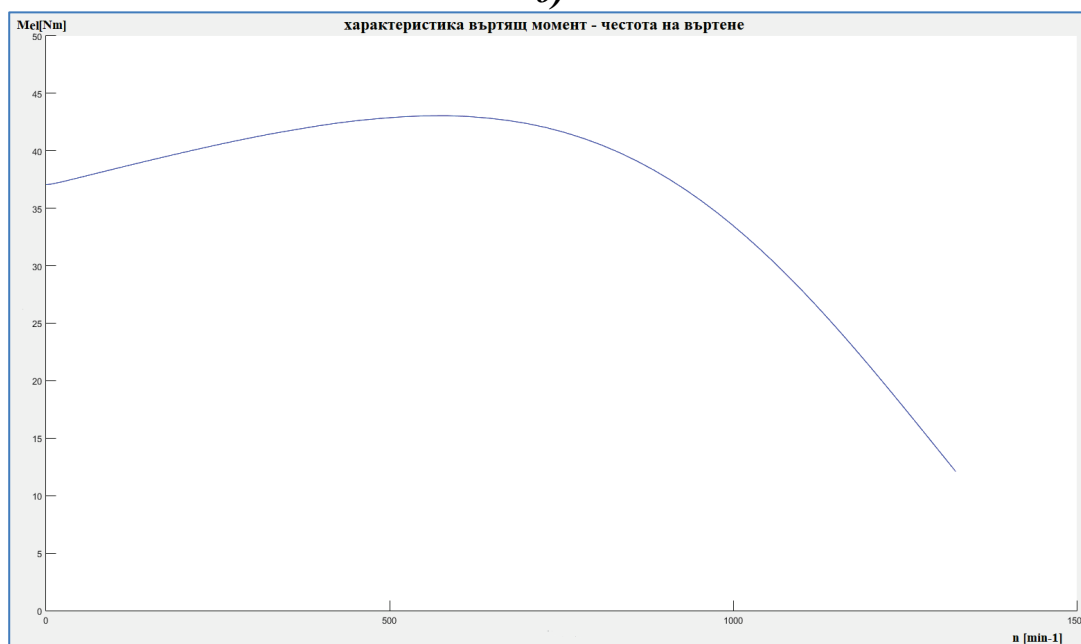
На фиг. 4.11 са представени графично изменението на честотата на въртене на вала на електродвигателя n [min⁻¹] във функция от времето t [s] (фиг. 4.11 а), изменението на електрическия въртящ момент $M_{\text{ел}}$ [Nm] във функция от времето t [s] (фиг. 4.11 б) и характеристиката „честота на въртене на вала на електродвигателя – въртящ момент“ (фиг. 4.11. в).



а)



б)



в)

Фиг. 4.11 Резултати от проведената симулация – пример 1

4.3. Оптимизация на електромеханични модули по динамични критерии

В случай, че ЛВР се колебае в избора на ЕММ след извършване на оптимизация по избрани статични критерии, то е възможно да се извърши и допълнителна оптимизация по динамични критерии, т.е по критерии, които описват динамични характеристики на ЕММ.

В настоящата работа е представена многокритериална оптимизация вариантите на ЕММ от Числен пример 4 (т. 3.2.4. от Трета глава) в средата на

софтуерния продукт Microsoft Excel по метод PROMETHEE и при следните динамични критерии:

- k_{d1} – бързодействие или времето, необходимото за достигане на стационарен режим t_n , [s];
- k_{d2} - коефициент на динамично претоварване в пусков режим – отношение на максималната стойност на момента и стойността на пусковия момент, [-];
- k_{d3} - коефициент на динамично претоварване спрямо стационарен режим – отношение на максималната стойност на момента и стойността на момента в стационарен режим M_n (респ. M_c), [-].

Поради съвпадащите стойности на динамичните критерии на алтернативи 10, 11, 12 и 13 в настоящия пример са използвани само алтернативите от a_1 до a_{11} .

В таблица 4.2 са представени изчислените стойности на динамичните критерии на ЕММ. Оптимизацията е извършена по функция на предпочитание тип V (с линейно предпочитание и област на безразличие) за всички критерии при стойностите за праговете на предпочитание и безразличие представени в таблица 4.3. Типа функция на предпочитание, както и стойностите за праговете са избрани въз основа на следните данни:

	k1	k2	k3
минимална стойност	0,00251	1,13793	2,80
максимална стойност	0,13775	1,40741	4,30
средно аритметично	0,03309	1,23279	3,63
стандартно отклонение	0,05228	0,13141	0,51

В таблица 4.4 са дадени получените стойности за входящия, изходящия и нетния потоци, за рейтинга на алтернативите и класирането по ранг на алтернативите по двата метода от типа ауоранжиращи. На фиг. 4.13 а) са представени графично резултатите от проведената оптимизация по метод Promethee, а на фиг. 4.13 б) - резултатите от проведената оптимизация по метод RAZOR.

Таблица 4.2 Стойности на динамичните критерии на ЕММ

№	ID	k_{d1}	k_{d2}	k_{d3}
a1	G12ADM90LC4	0,01755	1,13793	3,30
a2	G22ADM90LC4	0,01784	1,13793	3,30
a3	F22ADM90LC4	0,01802	1,13793	3,30
a4	K12DDM90LC4	0,01767	1,13793	3,30
a5	G22ADM90LB4	0,00988	1,16216	4,30

продължение

№	ID	k _{d1}	k _{d2}	k _{d3}
a6	G32ADM90LB4	0,01021	1,16216	4,30
a7	K12DDM90LB4	0,00982	1,16216	4,30
a8	F32ADM90SB2	0,13775	1,40741	3,80
a9	S12ADM90SB2	0,11830	1,40741	3,80
a10	HG 51E3B 90S/L-04F	0,00443	1,40000	2,80
a11	HG 51E3C 90S/L-04F	0,00251	1,30769	3,40

Таблица 4.3 Тип на функцията на предпочитание и стойности за праговете на предпочитание и безразличие – оптимизация по динамични критерии

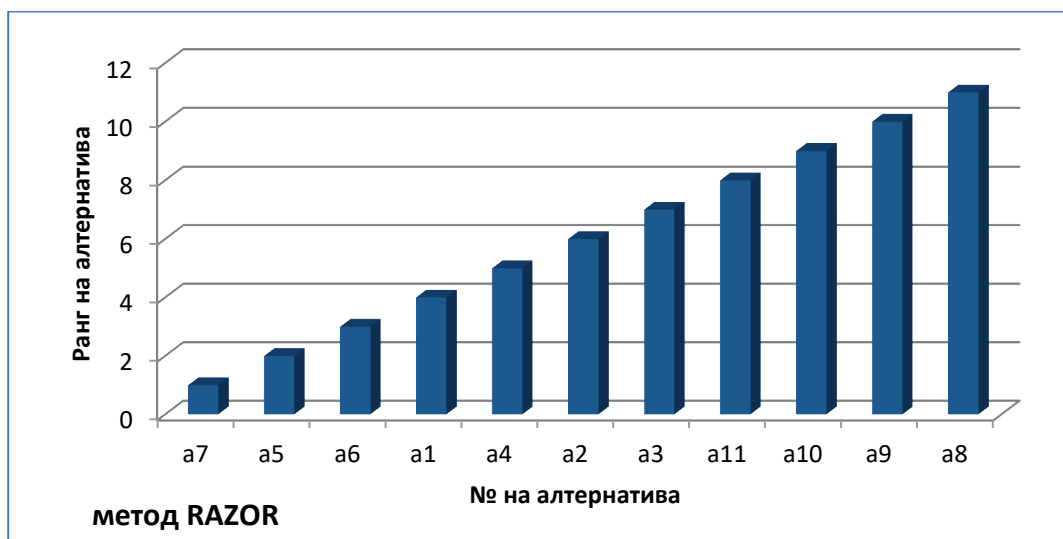
Критерии	Екстремум	Функция на предпочитание	q	p
k _{d1}	min	V	0,00251	0,12000
k _{d2}	min	V	1,13000	1,40600
k _{d3}	max	V	2,70000	4,00000

Таблица 4.4 Стойности за входящия, изходящия и нетния потоци, за рейтинга на алтернативите класиране на алтернативите по ранг – динамични критерии

№	PROMETHEE				RAZOR	
	φ +	φ -	φ (a _i)	ранг	R _n	ранг
a1	0,06121	0,01088	0,05033	6	2,23936	4
a2	0,06110	0,01129	0,04981	8	2,24494	6
a3	0,06100	0,01154	0,04945	9	2,24838	7
a4	0,06117	0,01105	0,05012	7	2,24177	5
a5	0,06948	0,00221	0,06727	4	0,32531	2
a6	0,06902	0,00240	0,06662	5	0,33159	3
a7	0,06957	0,00218	0,06739	3	0,32420	1
a8	0,00000	0,30470	-0,30470	11	5,61341	11
a9	0,00481	0,26503	-0,26023	10	5,24134	10
a10	0,07980	0,00000	0,07980	2	4,95862	9
a11	0,08415	0,00000	0,08415	1	3,04848	8



а)



б)

Фиг. 4.13 Графично представяне на резултатите от извършената оптимизация по динамични критерии

4.4. Сравнение между разработените модели, резултати и изводи

В настоящата глава са представени разработените в средата на ПП MatWorks Matlab модел на динамиката на ЕММ с трифазен асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор при използване на готови блок-модули и модел на динамиката на ЕММ въз основа на съставеното диференциално уравнение (зависимост 4.14).

При първия модел се използват наличните в библиотеката на Matlab блок-модули, в които са въведени предварително зависимостите чрез които се изчисляват съответните параметри на електродвигателя за описване на динамиката му. Използването на модела изисква предварително да бъдат

определени/ изчислени и след това въведени в блока Асинхронна машина някои параметри на електродвигателя, като номинална мощност и номинална честота на въртене на вала, инерционен момент, съпротивление на статора и на ротора, индуктивност и т.н. Правилното определяне на тези параметри ще доведе до максимално точни резултати при провеждане на симулациите. Разбира се, потребителят може да използва и наличните в Matlab модели на електродвигатели, но техният брой е ограничен.

За провеждането на симулации при втория модел е необходимо потребителят предварително да изчисли/ определи и след това да въведе в m-файл в Matlab следните входни данни:

- номинална мощност;
- синхронна честота на въртене на вала;
- номинална честота на въртене на вала;
- инерционен момент на електродвигателя;
- инерционен момент на системата;
- съпротивителен въртящ момент;
- съотношение между пусковия и номиналния въртящ момент;
- съотношение между критичния и номиналния въртящ момент.

Както е видно от направените симулации и двата модела показват сходни резултати при провеждането на динамичното изследване и могат да се използват при извършването на анализ на динамиката на електродвигатели с различни параметри и при различни условия.

Моделирането посредством готовите блок-модули на софтуерния продукт Matlab улеснява значително извършването на анализа на динамиката и е надежден инструмент за анализиране на поведението на асинхронни електродвигатели и ЕММ.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В резултат на решаването на поставените в дисертационния труд основни задачи, могат да бъдат формулирани следните приноси:

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. В дисертацията е представена идея за многокритериален анализ на електромеханични модули чрез решаване на оптимизационната задача, с помощта на нов метод – метода RAZOR, основаващ се на математически и статистически подходи.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е подход за проектиране и оптимизация на различни електромеханични модули по статични и динамични критерии.

2. Проектирани са три варианта на релационна база данни в средата на програмния продукт Microsoft Access.

3. Създадена е възможност чрез проектираната база данни за лесно извличане на информация за варианти на електромеханични модули в подходящ файлов формат, което ще улесни значително решаването на оптимизационната задача.

4. Многокритериалната оптимизационна задача е решена чрез два метода за оптимизация от типа ауторанжиращи – представеният нов метод RAZOR и световно утвърденият метод PROMETHEE, осигуряващи подходяща методика чрез подреждане по ранг на зададения брой алтернативи съобразно зададените критерии и при необходимост – тегла на критериите.

5. Създадени са два модела на динамиката на електромеханични модули – при използване на готовите блок-модули, налични в Matlab и чрез решаване на съставеното диференциално уравнение на динамиката на електромеханични модули.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Чрез използване на наличните езици за програмиране, разработената база данни може да стане достъпна и през интернет, което ще осигури достъп до информацията в нея до по-широк кръг потребители.

2. Възможността за надграждане и актуализиране на съдържанието на базата данни чрез въвеждане на информация от различни фирми, позволява потребителите да бъдат насочени към най-подходящите за техните цели задвижвания, съобразени с предпочитанията им към различни критерии за оценка.

3. Проектираната база данни може да намери приложение в учебния процес. Нагледно могат да бъдат показани възможни комбинации между структурните компоненти на електромеханичните модули, техните механични, технически и електрически параметри и графична тримерна визуализация на структурните компоненти, налични за свободно ползване.

НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Dahterova, D., Nikolova, I., „Database design at synthesis of electromechanical modules”. XXIV International Scientific Conference trans&MOTAUTO'16. Публикувана в „Научни известия на HTC по машиностроене”, ISSN 1310-3946, и в International journal ”Machines, Technologies, Materials”, ISSN 1313-0226, 2016.

2. Nikolova, I., Dahterova, D., Ivanov, V., Lemu, H., „Multi-criteria optimization of electromechanical modules: Part 1 - PROMETHEE method“. 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (IWAMA 2016), University of Manchester, UK, 10-11 November 2016.
 3. Nikolova, I., Dahterova, D., Ivanov, V., Lemu, H., „Multi-criteria optimization of electromechanical modules: Part 2 - RAZOR method“. 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (IWAMA 2016), University of Manchester, UK, 10-11 November 2016.
 4. Nikolova, I., Dahterova, D., Ivanov, V., Lemu, H., „Comparative study of PROMETHEE II and RAZOR methods for multi-criteria optimization of electromechanical modules“. Tehnički vjesnik IF: 0,670, 25 (5), pp. 1330-1338. <https://doi.org/10.17559/TV-20170111011555>.
- Статията е цитирана в:* Žgaljić, D., Tijan, E., Jugović, A., Poletan Jugović, T., “Implementation of Sustainable Motorways of the Sea Services Multi-Criteria Analysis of a Croatian Port System”. Sustainability 2019, 11, 6827. <https://doi.org/10.3390/su11236827>.
5. Дахтерова, Д., Николова, И., „Модел на динамиката на електродвигател в средата на програмен продукт MATLAB“. Сп. „Механика на машините“, ISSN 0861-9727, бр. 123, Година XXVII, Книга 1, Варна 2019 г., с. 32-35.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Генова П., Дахтерова Д., Цонева М., “Теория на проектирането на машините”. ТУ – София, 2011.
- [26] Bellure A., Aspalli M., “Dynamic d-q Model of Induction Motor Using Simulink”. International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 24 (5), pp. 252-257, 2015.
- [42] El Amine M., Pailhes J., Perry N., „Critical Review of Multi-criteria Decision Aid Methods in Conceptual Design Phases: Application to the Development of a Solar Collector Structure“. 24th CIRP Design Conference, Procedia CIRP, vol. 21, pp. 497-502, 2014.
- [59] Kamali M. & Hewage K., “Life cycle performance of modular buildings: a critical review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 62, pp. 1171-1183, 2016.
- [76] Moosavian A. & Xi F., “Modular design of parallel robots with static redundancy”. Mechanism and Machine Theory, vol. 96 (1), pp. 26-37, 2016.

- [84] Rothgang S., Baumhöfer T., van Hoek H., Lange T., De Doncker R. & Sauer, D., „Modular battery design for reliable, flexible and multi-technology energy storage systems“. Applied Energy, vol. 137, pp. 931-937, 2015.
- [86] Salonitis K., “Modular design for increasing assembly automation”. CIRP Annals – Manufacturing technology, vol. 63 (1), pp. 189-192, 2014.
- [94] Wang P., Liu Y., Ong S. K. & Nee A. Y. C., “Modular design of machine tools to facilitate design for disassembly and remanufacturing”. Procedia CIRP, vol. 15, pp. 443-448, 2014.
- [100] Zhang C., Zhang T., Chen N. & Jin T., “Reliability modelling and analysis for a novel design of modular converter system of wind turbines”. Reliability Engineering & System Safety, vol. 111, pp. 86-94, 2013.
- [106] <https://www.mathworks.com/help/>

БЛАГОДАРНОСТИ

Издавам своята искрена признателност и благодарност на научния си ръководител доц. д-р инж. Димитринка Славова Дахтерова за търпението, ценните напътствия и препоръки при съвместната ни работа по дисертацията.

Благодаря на доц. д-р Ваньо Иванов за насоките и оказаното съдействие.

Благодаря на проф. Хирпа Лему и колегите от катедра „Машинно и строително инженерство и материалознание“ към Университета на Ставангер за гостоприемството и помощта, които ми оказаха по време на престоя ми в Норвегия.

Благодарности изказвам и на колегите от Инженерно-педагогически факултет – Сливен, които ме подкрепяха по време на разработването на дисертацията.

ANNOTATION

**Dissertation title: Design and optimization of electromechanical modules
suitable for drives of reconfigurable and mechatronic systems**

Author: Eng. Ina Nikolova, MSc

The vast variety of machines and components enforces the need for fast and diverse development of drive systems for them. The large variety of variants of electromechanical modules requires the modern engineers to use multi-criteria optimization for quick selection between multiple options when evaluating them in relation to pre-set criteria. The outranking methods for multi-criteria optimization offer suitable methodology for solving such types of problems.

The review of available publications shows that no unified system has been developed to cover the processes of selection of electromechanical modules for given application, optimization of appropriate variants for equipment, as well as dynamic analysis of electromechanical modules.

The aim of the dissertation is developing an approach for design, selection of given application and optimization of electromechanical modules, suitable for drives of reconfigurable and mechatronic systems. Main requirement is the approach to allow also optimal selection of company electromechanical modules based on catalogs and internet data with technical parameters and indicators, as well as components for them. The following tasks have been performed to achieve the aim of the dissertation:

1. Relational database at synthesis of electromechanical modules have been developed, that includes some technical and geometrical parameters of electromechanical modules, aiming to facilitate the solving of the multi-criteria optimization task.

2. The multi-criteria optimization task has been solved by applying two outranking methods - the world-renowned method PROMETHEE and the new method RAZROR, which has been demonstrated in the dissertation. The two methods provide suitable algorithm for ranking a set number of alternatives based on selected criteria.

3. Two models of the dynamic of electromechanical modules have been developed: (1) dynamic model of electromechanical module with three-phase asynchronous electric motor with squirrel-cage rotor using the ready-made modules of MathWorks Matlab and (2) dynamic model of electromechanical module by solving the compiled differential equation of motion in MathWorks Matlab.