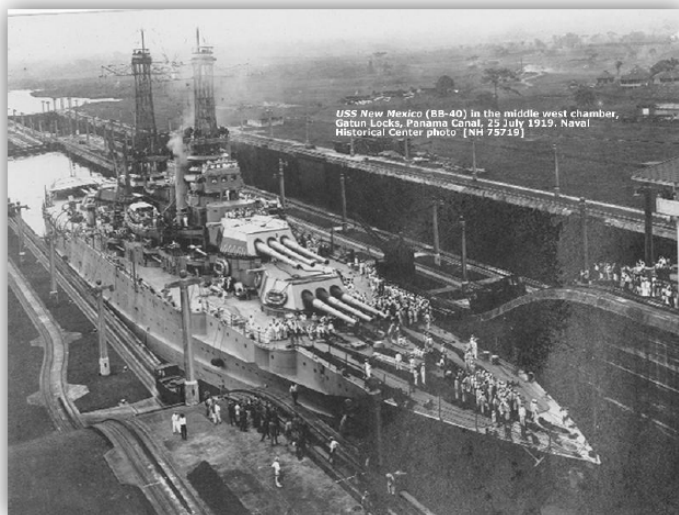


Технически Университет-София, Филиал Пловдив

УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯТА

доц. д-р Иван Костов
маг.инж. Георги Иванов



Учебно пособие за курсово проектиране

Пловдив 2014

В учебното пособие са разгледани въпроси от проектирането на системи за автоматично управление на електрозадвижванията. Разгледани са тиристорни и транзисторни електрозадвижвания за постоянен ток, а също така транзисторно асинхронно електрозадвижване за променлив ток. Предложено е описание на функционалните схеми на постояннотокови и асинхронни електрозадвижвания и инженерни методики за избор на силовите елементи и параметрите на регулаторите им. Разгледани са въпроси на моделирането на системите за електрозадвижване.

Пособието е предназначено за студентите, които се обучават по направлението "Електротехника, електроника и автоматика" и по специалността "АИУТ". Може да се ползва и от студенти от други специалности и по други дисциплини.

© И.Й. Костов, 2014; Г.И. Иванов, 2014

© Технически университет - София, Филиал Пловдив, 2014

На корицата: USS New Mexico, Панамският канал, 25.07.1919 г. - по времето, когато е оборудван с насочващи ПИД системи за управление на инж. Н.Минорски.

Технически университет - София, Филиал Пловдив
ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОНИКА И АВТОМАТИКА

И. Й. КОСТОВ Г. И. ИВАНОВ

**УПРАВЛЕНИЕ
НА
ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯТА**

Учебно пособие за курсово проектиране

за студентите от АИУТ на ФЕА по едноименната дисциплина

ПЛОВДИВ
ИЗДАВА «УЧИ»
2014

Рецензент: **доц. д-р Александър Вучев**

Учебното пособие е подготовено в катедра Системи за управление и отпечатано с Решение на ФС на ФЕА от 06.11.2014/Протокол № 2.

Костов, И.Й., Иванов, Г.И.

Управление на електрозадвижванията: Учебно пособие за курсово проектиране

© И.Й. Костов, © Г.И. Иванов, Пловдив, 2014.

© Издава: «УЧИ», Пловдив, 2014.

Първо издание

ISBN 978-619-90128-6-4

В учебното пособие са изложени въпроси от проектирането на системи за автоматично управление на електрозадвижванията. Разгледани са тиристорни и транзисторни електрозадвижвания за постоянен ток, а също така и транзисторно асинхронно електрозадвижване за променлив ток. Представени са инженерни методики за избор на параметрите на регулаторите. Дадено е описание на функционалните схеми на електрозадвижвания тип "DC4QR", "TMS320C2000F28335", "КЕМТОР" и "КЕМЕК". Разгледани са въпроси на моделирането на системите за електрозадвижване.

В това първо издание авторите са засегнали основни въпроси, свързани с анализа, проектирането, избора и защитата на електрозадвижвания, залегнали в учебната програма и лекционния курс по дисциплината; съзнателно са пропуснали някои съществени и важни страни и въпроси от теорията на обобщената електрическа машина и електрозадвижванията със синхронни двигатели с постоянни магнити, които са цел и задача на специализираните курсове. Ще приемат с благодарност всички бележки и препоръки, които имат за цел да подобрят качеството на изданието.

Пособието е предназначено за студентите, които се обучават по направлението "Електротехника, електроника и автоматика" и по специалността "АИУТ". Може да се ползва от студенти от други специалности и по други дисциплини и в инженерната практика.

© И.Й. Костов, 2014; © Г.И. Иванов, 2014

ISBN 978-619-90128-6-4

© Технически университет - София,
Филиал Пловдив, 2014

СЪДЪРЖАНИЕ

Съдържание.....	3
Въведение.....	5
Изисквания към оформянето на материалите на курсовия проект.....	6
Съдържание на курсовия проект.....	6
Учебно-методически указания за изпълнение на курсовия проект.....	9
1. Избор на системата за електрозадвижване и нейната функционална схема...9	
ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК ПО СХЕМАТА "ТИРИСТОРЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ–ДВИГАТЕЛ".....	13
2. Изчисляване и избор на елементите на силовата част на електрозадвиж- ването.....	13
2.1. Изчисляване на параметрите на трансформатора.....	15
2.2. Избор и проверка на тиристорите.....	16
2.3. Електрическо оразмеряване на анодните реактори.....	19
2.4. Електрическо оразмеряване на уравниелните реактори.....	20
2.5. Електрическо оразмеряване на катодния дросел.....	21
3. Изчисляване на основните параметри на силовата верига на електрозадвижването	24
4. Синтез и изчисляване на параметрите на регулаторите в линеаризираните системи за управление на скоростта на електрозадвижването.....	25
4.1. Синтез на система с подчинено регулиране на скоростта на електрозадвижването.....	27
ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК ПО СХЕМАТА "ШИРОЧИННО- ИМПУЛСЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ – ДВИГАТЕЛ".....	34
5. Изчисляване и избор на елементите на силовата част на електрозадвижването.....	34
5.1. Изчисляване на захранващия източник и силовия филтър.....	34
5.2. Избор на транзисторите и обратните диоди.....	38
5.3. Защита на транзисторите от пренапрежения.....	40
5.4. Изчисляване на статичните параметри на системата ШИП–ДПТ.....	41
6. Синтез на регулаторите в линеаризираната система за управление на електрозадвижване по схемата ШИП-ДПТ.....	43

6.1. Общи положения.....	43
6.2. Метод за синтез на регулаторите чрез разделяне на движенията.....	48
6.3. Методи за синтез на регулаторите с ШИМ.....	56
6.3.1. Метод за модално управление.....	56
6.3.2. Система с подчинено регулиране на скоростта по схемата ШИП-ДПТ.....	62
ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК ПО СХЕМАТА "ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ НА ЧЕСТОТА - АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ".....	64
7. Пресмятане на параметрите и избор на елементите на силовата част на електрозадвижването.....	64
7.1. Изчисляване на параметрите на асинхронния двигател.....	64
7.2. Механични и електромеханични характеристики.....	69
7.3. Избор на типа електрозадвижване.....	72
7.4. Изчисляване на силовата част на електрозадвижването.....	79
7.5. Изчисляване на параметрите на регулаторите.....	83
8. Моделиране на синтезираната система за управление на електрозадвижването.....	95
8.1. Моделиране на линеаризираните структури на електрозадвижването.....	95
8.2. Моделиране на нелинейните структури на електрозадвижването.....	96
9. Изчисляване на регулаторите на тока и на скоростта.....	102
10. Елементи, характеристики и защита на системата за управление на преобразувателя.....	105
11. Принципна схема на електрозадвижването и описанието ѝ в курсовия проект.....	106
12. Спецификация на електрооборудването.....	107
13. Заключение.....	107
14. Списък с използвана литература.....	107
Литература.....	108
Приложения.....	111

ВЪВЕДЕНИЕ

Основната цел на курсовото проектиране е да научи студентите самостоятелно да взимат инженерни решения на базата на съвременната полупроводникова техника при проектирането и пресмятането на системите за автоматично управление на електрозадвижванията. За изпълнението на курсовия проект студентите трябва активно да работят с техническа литература и точно да разбират прилаганите методики за изчисляване. Курсовият проект носи учебен характер, затова списъкът с въпросите, решавани в проекта, е по-широк, отколкото изборът на серийно произведено комплектно електрозадвижване за удовлетворяване на изискванията на дадено техническо задание.

Ръководството съответства на учебната програма по учебната дисциплина като фокусът е насочен основно към онези въпроси, които в една или друга степен са по-малко засегнати в лекционния материал, семинарните упражнения или лабораторните упражнения. В този смисъл то, заедно с лекциите и ръководството за лабораторни упражнения, допълва до цялост знанията и уменията, които трябва да придобият студентите, преминавайки през този курс.

Структурата на ръководството е изградена от въведение, изисквания за оформянето на материалите на курсовия проект, съдържание на курсовия проект, 14 учебно-методически указания за изпълнение на курсовия проект, литература и приложения.

Учебното помагало може да бъде полезно на студентите при изпълнение и на някои раздели от дипломното проектиране. Състои се от 144 страници с 53 фигури, 25 таблици и 16 Приложения.

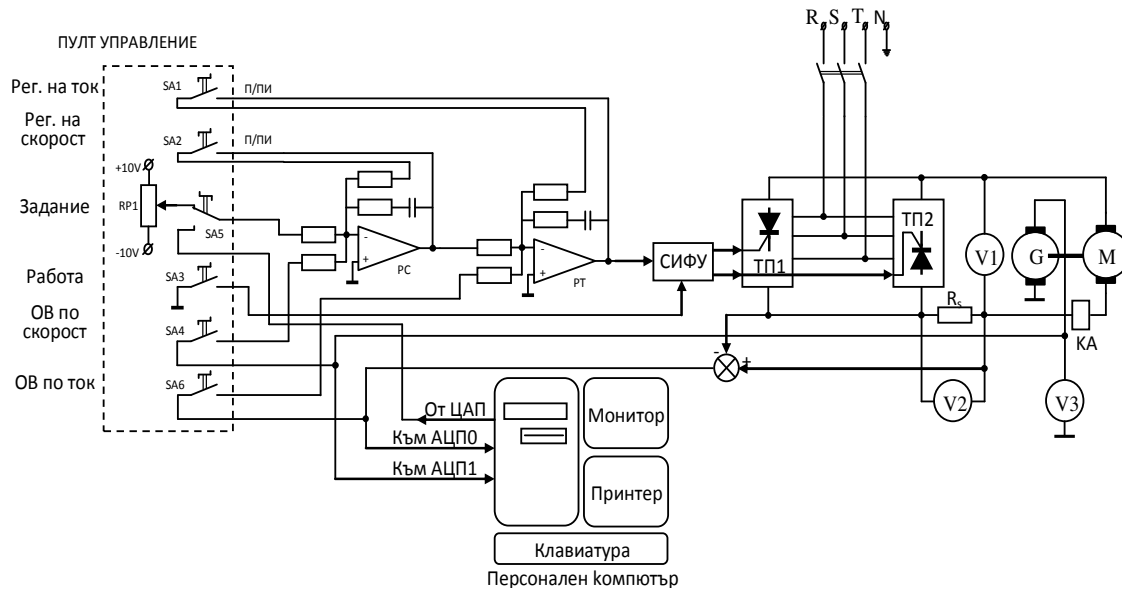
ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ОФОРМЯНЕТО НА МАТЕРИАЛИТЕ НА КУРСОВИЯ ПРОЕКТ

Курсовият проект по дисциплината "Управление на електрозадвижванията" се състои от обяснително-изчислителна записка и чертежи, оформени в съответствие с изискванията на действащите стандарти. Всички изчисления трябва да бъдат изпълнени в системата СИ, а принципните схеми на отделни възли в системата за управление на преобразувателя – в съответствие със стандартите и трябва да запазват обозначенията и маркировката, дадени в каталозите. Чертежите се оформят на листове формат А4. На единия лист се чертае принципната схема на системата за управление на електрозадвижването, на другия – неговата структурна схема, характеристики на елементите на системата за управление на преобразувателя, статични и динамични характеристики на анализирания автоматизирано електрозадвижване.

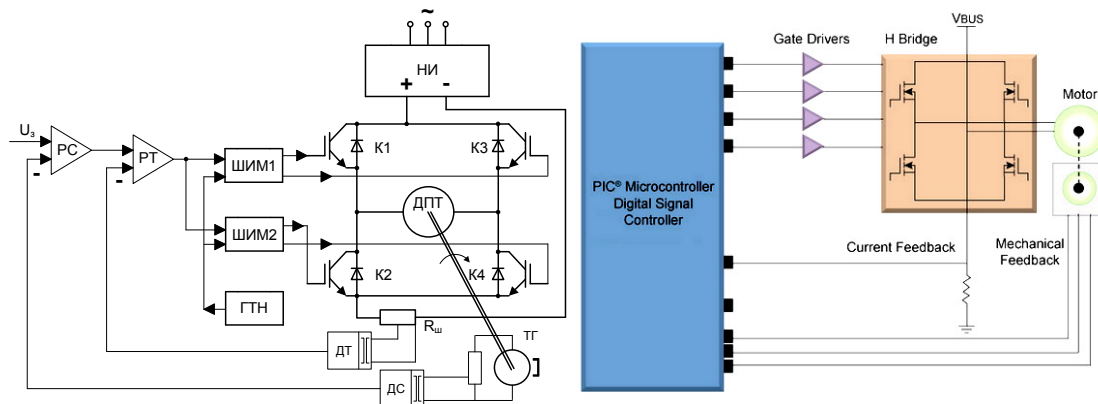
СЪДЪРЖАНИЕ НА КУРСОВИЯ ПРОЕКТ

В съответствие с работната програма на учебната дисциплина "Управление на електрозадвижванията" в курсовия проект се предвижда разработка на автоматизирани електрозадвижвания, осигуряващи стабилизация на скоростта или управление на положението. Както системата за стабилизация на скоростта на въртене, така и системата на следящото електрозадвижване могат да бъдат реализирани на базата на серийно произвеждани комплектни

електрозадвижане с двигател за постоянен ток (ДПТ) и тиристорен преобразувател тип КЕМЕК23А, включено в стенд за изпитване на електрозадвижвания, а на фиг. 1б също в качеството на пример за



Фиг. 1а. Функционална схема на комплектно електрозадвижане с тиристорен преобразувател тип КЕМЕК23А



Фиг. 1б. Функционална и модулна схема на транзисторно четриквартно електрозадвижане

комплектно електрозадвижане на базата на ШИП е показана функционалната схема на електрозадвижане DC4QR за ДПТ тип P18.06, 3P12.06(12) и 4MTB и модулната структура на постоянноотокково електрозадвижане с PIC микроконтролер. Различни схеми на свързване на съвременни електрозадвижвания с

ДПТ, техни функционални схеми и структури на регулаторите на ток и скорост са показани в Приложение 14.

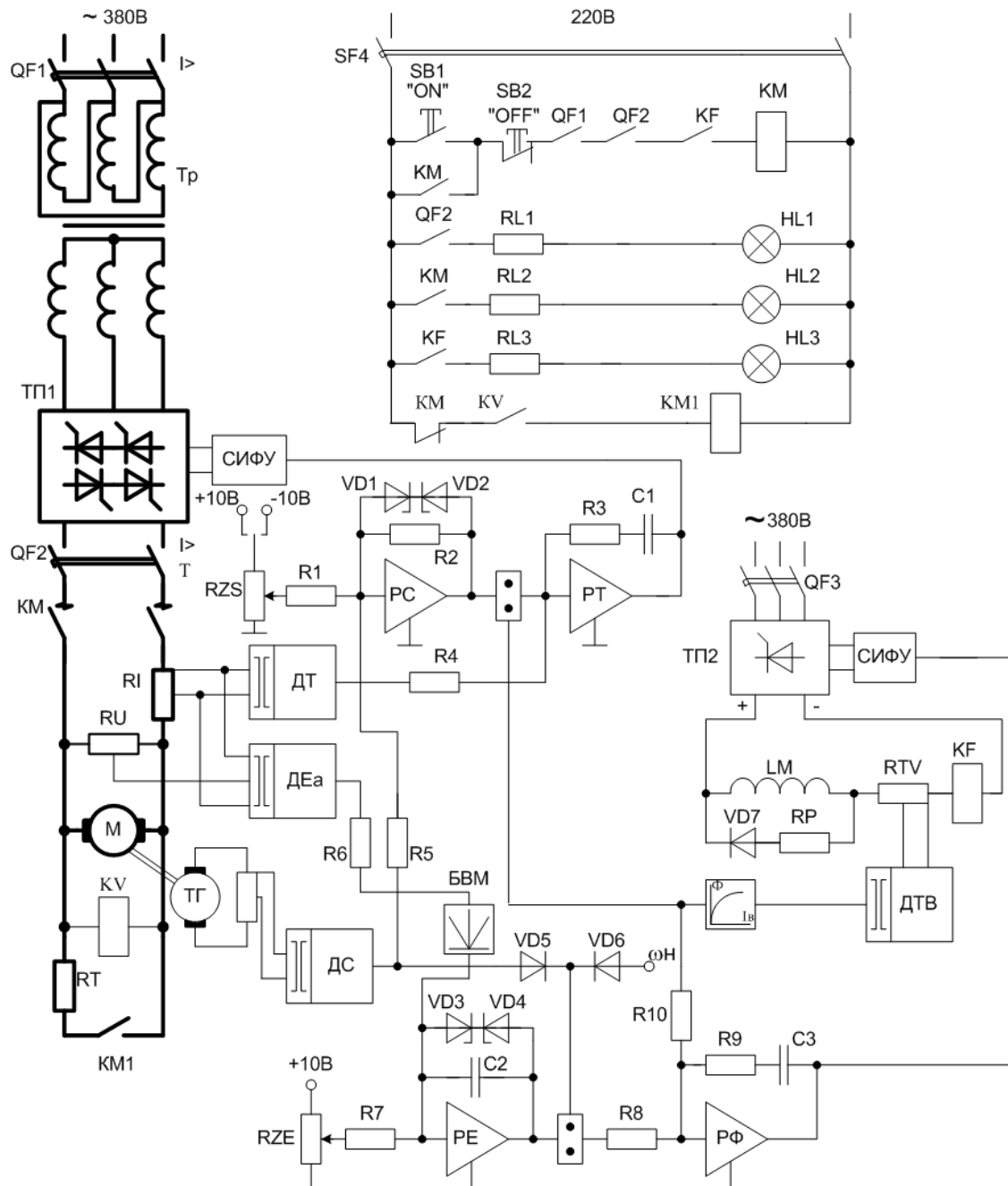
ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК ПО СХЕМАТА "ТИРИСТОРЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ–ДВИГАТЕЛ"

2. ИЗЧИСЛЯВАНЕ И ИЗБОР НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА СИЛОВАТА ЧАСТ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО

В този раздел за тиристорния вариант на електрозадвижването се извършват: избор на типа и изчисляване на параметрите на силовия трансформатор (при безтрансформаторния вариант се избират анодния реактор (комутационния дросел) и неговите параметри); проверка на тиристорите, приети в реализацията на типовия преобразувател; избор на типа на уравнилителните реактори при съвместно управление на реверсивните групи на вентилния преобразувател; избор на катодния дросел и определяне на нивото на пулсациите на първата хармонична на тока на котвената верига; определяне на граничния ток и избор на устройства за защита на преобразувателя от токове на късо съединение, продължително претоварване и комутационни пренапрежения [11, 15, 16].

Подробности за електрическите параметри на трансформатори за токоизправителни схеми за управление на електрозадвижвания с ДПТ са дадени в Приложение 1. Характерна величина на тези трансформатори е напрежението на късо съединение и съответната индуктивност на разсейване, която е съществен елемент в осъществяването на комутационните процеси в управляемия изправител. При липса на данни за нейното пресмятане, може да се използват методиките, дадени в [11, 15, 16]. На фиг.2 е показана

силова схема на електрозадвижване тип КЕМТОР, заедно с функционалните връзки между отделните силови елементи в системата за управление.

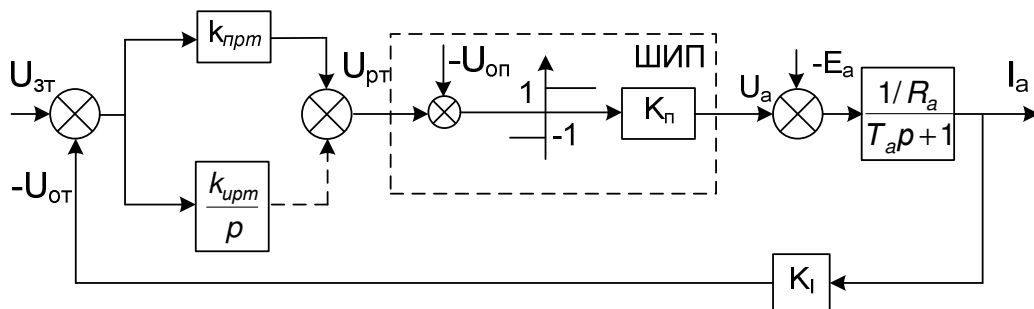


Фиг. 2. Функционална схема на комплетно реверсивно двузонно електрозадвижване с тиристорен преобразувател тип КЕМТОР

на комутацията; $\beta = \frac{U_H}{I_H R_a}$; $k_{зн}$ – коефициент на форсиране на напрежението (запас по напрежение на преобразувателя, $k_{зн} = E_{пр\ max}/U_H$); $\Delta u = \frac{\Delta U R_a}{U_H k_I}$ – относителна стойност на ширината на хистерезисния цикъл.

Променливата честота на комутациите в релейния контур за регулиране на тока представлява основен негов недостатък. Към предимствата на такъв начин на организация на контура на тока следва да се отнесе преди всичко максималното бързодействие в сравнение с другите варианти на синтез, а така също високата степен на нечувствителност на контура към смущения и изменения на параметрите (робастност).

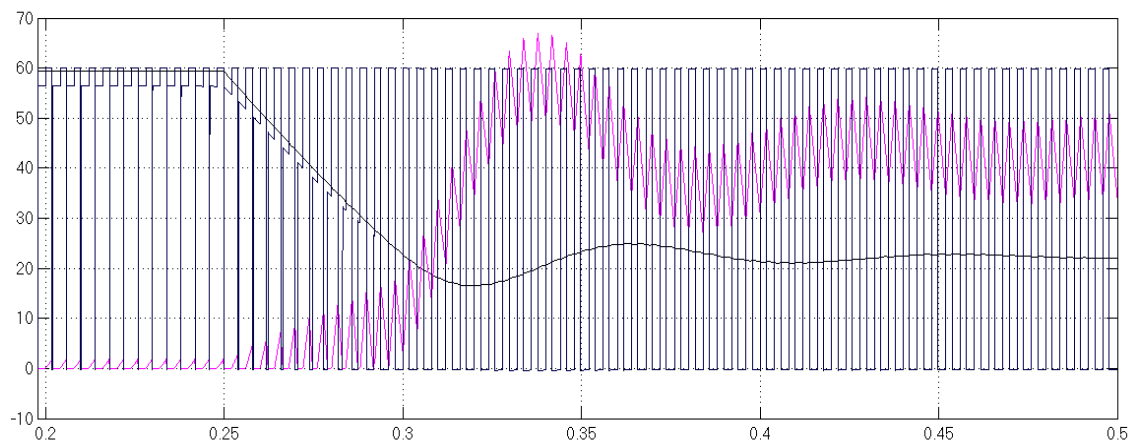
2. *Контур за регулиране на тока с широчинно-импулсна модулация на управляващия сигнал* (структурна схема и графика на преходни процеси в такъв контур при подаване на единично стъпално въздействие на входа му са показани на фиг. 8 и 9 съответно).



Фиг. 8. Структурна схема на контура на тока с широчинно-импулсна модулация на управляващия сигнал

Опорното напрежение на широчинно-импулсната модулация $U_{оп}$, трябва да има синусоидална или тригонообразна форма и честота,

равна на честотата на комутациите на силовите ключове на транзисторния преобразувател.



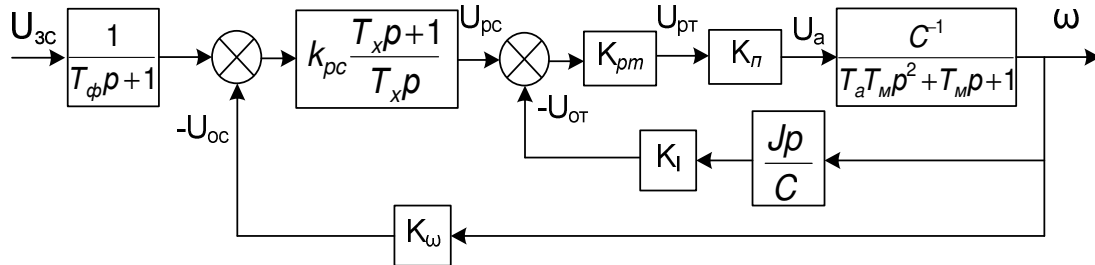
Фиг. 9. Преходни процеси на скоростта и тока с широчинно-импулсна модулация на управляващия сигнал (при натоварване)

Регулаторът на тока в контура с ШИМ може да се изпълни като пропорционален или пропорционално-интегрален (пунктирната линия).

Необходимо е също така да се отбележат предимствата и недостатъците на контура за регулиране на котвения ток с широчинно-импулсна модулация на управляващия сигнал. Безусловното преимущество в сравнение с релейния контур на тока – това е постоянната честота на комутациите при произволни условия на работа на контура. Към недостатъците следва да бъдат отнесени намаленото бързодействие в контура с ШИМ при малки разсъгласования и наличие на статична грешка в контура с пропорционален регулатор.

В курсовия проект могат да бъдат използвани двата начина за построяване на контура за регулиране на тока, обаче при избор на типово комплектно ЕЗ типа следва да се приеме втория вариант, тъй като именно той се използва при реализация на електрозадвижванията от дадения тип.

пропорционално-интегрален регулатор на скоростта има вида, показан на фиг. 12. ШИП в линеаризираната структура на управлението на първия етап се заменя с безинерционно звено k_{π} .



Фиг. 12. Структурна схема на електрозадвижването

За структури с П-регулатор на тока и ПИ-регулатор на скоростта (изборът на ПИ-регулатора е продиктуван от изискването за астатизъм на системата по смущение) се задава предавателна функция на затворената системи за управление на скоростта от вида:

$$W(p) = \frac{k_{\omega}^{-1}}{T_{\omega}^3 p^3 + A_1 T_{\omega}^2 p^2 + A_2 T_{\omega} p + 1}. \quad (79)$$

Предавателната функция на вътрешния контур при П-регулатор на ток и безинерционен преобразувател $\left(k_{\pi} = \frac{U_H}{U_{3 \max}} \right)$ в съответствие със структурната схема (фиг. 12) има вида:

$$W_{km}(p) = \frac{k_{pm} k_{\pi} C^{-1}}{T_a T_M p^2 + T_M z p + 1}, \quad (80)$$

където $z = 1 + \frac{k_I k_{pm} k_{\pi}}{R_a}$.

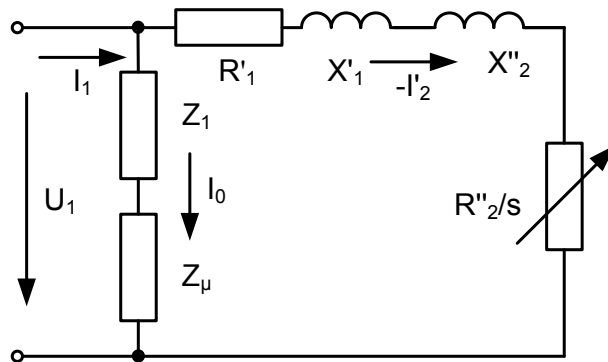
Предавателната функция на затворения контур за регулиране на скоростта при ПИ-регулатора на скорост съгласно (71) ще има вида:

ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК ПО СХЕМАТА "ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ НА ЧЕСТОТА - АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ"

1. ПРЕСМЯТАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ И ИЗБОР НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА СИЛОВАТА ЧАСТ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО

7.1. ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА АСИНХРОННИЯ ДВИГАТЕЛ

По каталожни данни. В справочната литература по асинхронни двигатели обикновено се дават параметрите на Г-образната заместваща схема (фиг. 13) в относителни стойности - Приложение 8. В Приложение 8 са показани и редица допълнителни величини като номиналната мощност P_{2H} , коефициента на полезно действие и фактора на мощността $\cos\phi$ при натоварване 25%...125% от номиналната мощност.



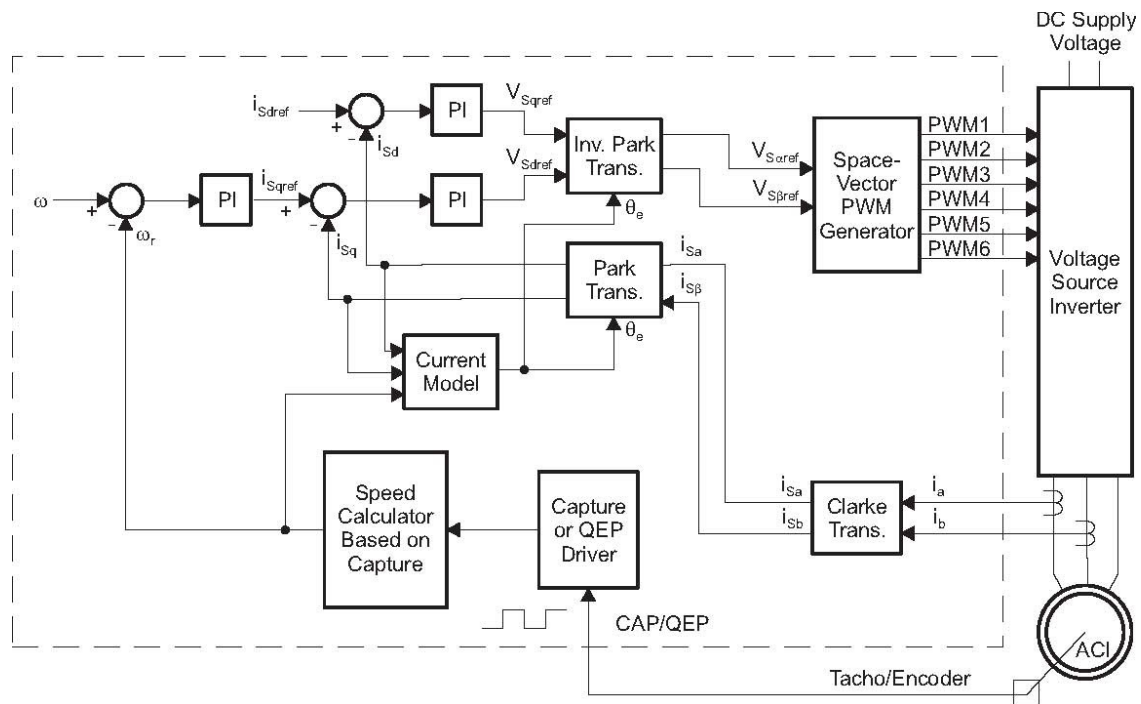
Фиг. 13. Г-образна заместваща схема на АД

При преход към Т-образна заместваща схема (фиг.14), с помощта на данните от Приложение 8 и предложените в [2] формули се определят относителните стойности на параметрите както следва:

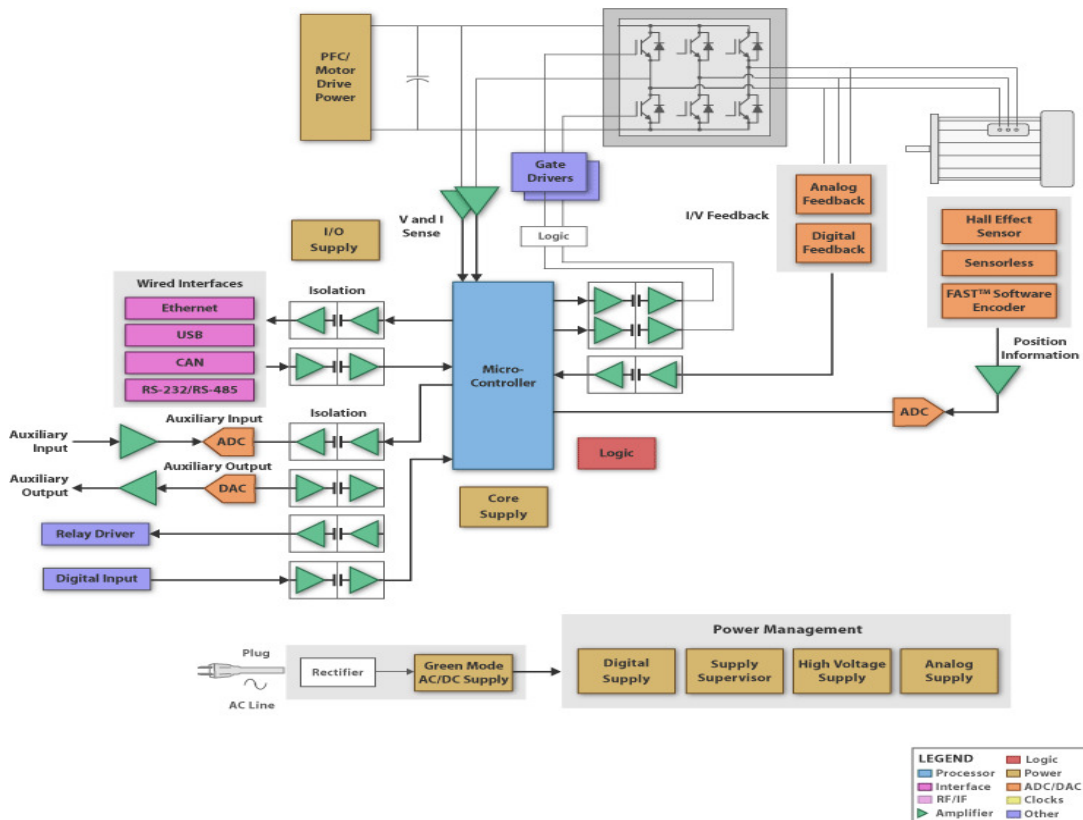
7.3. ИЗБОР НА ТИПА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ

Понастоящем съществуват голям брой типове преобразуватели за асинхронни електрозадвижвания, особено чуждо производство. Информация обаче, освен рекламна, за много типове отсъства. В ръководството са показани базови функционални схеми на транзисторни преобразуватели на фирмата Texas Instruments (TI). Асинхронно регулируемо електрозадвижване тип "C2000" може да бъде намерено на сайта на TI [22].

На фиг. 19а,б са показани структурна и функционална схеми на асинхронно електрозадвижване тип "TMS320C2000", системата за управление на което е реализирана на принципа на ориентация на координатната система по полето на ротора [7, 14, 19, 23, 24].



Фиг. 19а. Структурна схема на асинхронно електрозадвижване с TMS320C2000F280(3)35

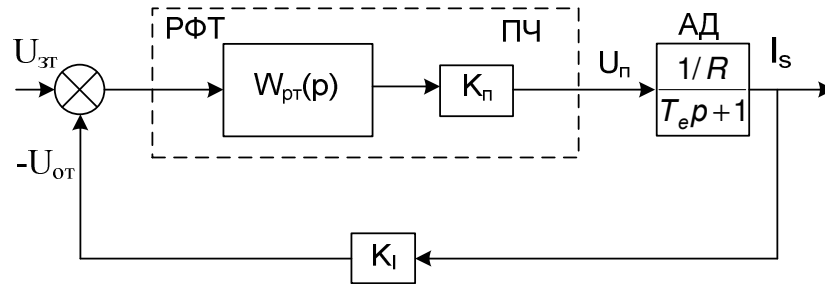


Фиг. 196. Функционална на асинхронно електрозадвижане с TMS320C2000F280(3)35

Системата за управление представлява изчислително устройство, програмното осигуряване на което позволява по аналоговите сигнали от първичните измервателни преобразуватели на фазните токове и напрежения да се изчислят регулируемите координати и да се реализират затворени контури за регулиране на различни компоненти на **вектора на състоянието** на електрозадвижането. А именно, изпълняват се изчисленията, свързани с фазните и координатните преобразувания на тока и напрежението на статора на реалния АД към координатите на изобразяващите вектори на токовете, напреженията и потокосцепленията на двуфазната машина. Тези изчисления се реализират с помощта на блокове за прави и обратни фазни и координатни преобразувания. Скоростта на ротора ω и положението

ПЧ – преобразувател на честота;

АД – фаза на статорната намотка.



Фиг. 24а. Структурна схема на контур за регулиране на фазния статорен ток

При построяване на контура за регулиране на тока са възможни различни варианти на регулатори на ток.

Вариант 1. Регулаторът на ток е пропорционален с коефициент на пропорционалност K_{pm} .

Предавателната функция на затворения контур на тока:

$$W_{km}(p) = \frac{K_e}{T_e p + 1}. \quad (130)$$

Тук K_e – еквивалентен коефициент на пропорционалност, равен на

$$\frac{K_{pm} K_n R_s^{-1}}{1 + K_{pm} K_n R_s^{-1} K_I} \approx \frac{1}{K_I}; \quad T_{eq} - \text{еквивалентна времеконстанта на}$$

$$\text{апериодичното звено, } T_{eq} = \frac{T_e}{1 + K_{pm} K_n R_s^{-1} K_I}.$$

В резултат от изискванията към динамиката на затворената система се задава честотата на пропускане на контура на ток $\Omega_{крт}$; обикновено параметърът се задава по такъв начин, че лентата на пропускане на контура на тока да бъде няколко пъти по-голяма от лентата на пропускане на контура на скорост и три-четири пъти по-малка в сравнение с честотата на широчинно-импулсната модулация на транзисторния инвертор.

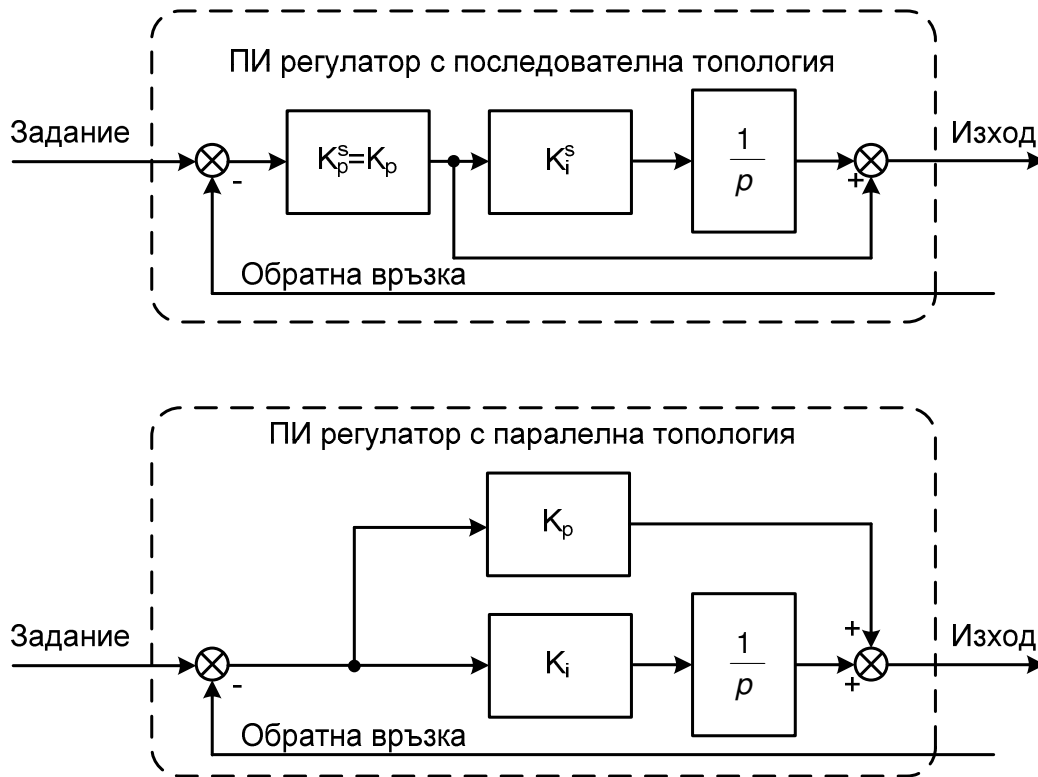
Лентата на пропускане на апериодичното звено е свързана с еквивалентната времеконстанта със следното съотношение:

$$\Omega_{крт} = \frac{1}{T_{eq}}.$$

Оттук се намира коефициентът на усилване на регулатора на ток:

$$K_{рт} = \frac{\Omega_{крт} T_e - 1}{K_n R_s^{-1} K_I}. \quad (131)$$

Вариант 2. Регулаторът на тока е пропорционално-интегрален. Разглежда се структура с последователна топология на РТ, показана на фиг. 24б. Параметрите на регулаторите са K_p^s и K_i^s . Ако топологията е паралелна, то $K_p = K_p^s$, $K_i = K_p K_i^s$.



Фиг. 24а. Структурна схема на ПИ регулатори с последователна и паралелна топологии

Предавателната функция на регулатор с последователна топология е:

$$W_{pm}(p) = \frac{K_p^s K_i^s}{p} + K_p^s = \frac{K_p^s K_i^s}{p} \left(1 + \frac{p}{K_i^s} \right). \quad (132)$$

Обектът за управление е със следната предавателна функция:

$$\frac{I(p)}{U(p)} = \frac{R^{-1}}{\frac{L}{R}p + 1}. \quad (133)$$

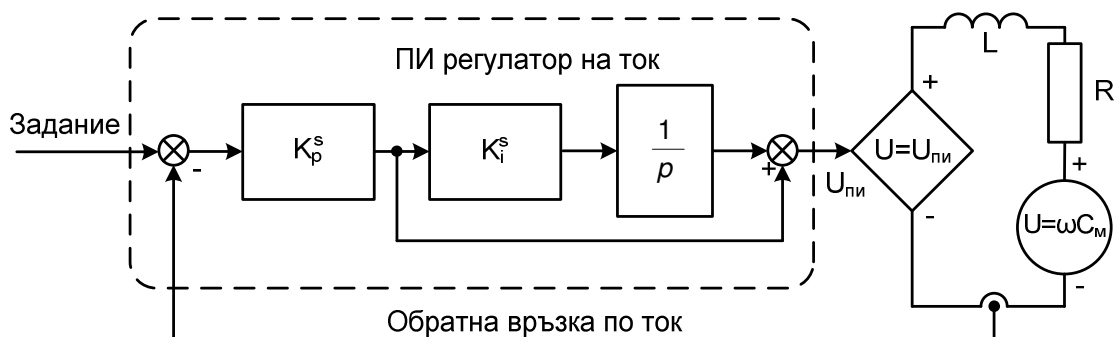
$$\text{За асинхронните двигатели } L = L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) = L_s \sigma.$$

Тук: - L - еквивалентна последователна индуктивност; L_s - индуктивност на статорната намотка; L_r - приведена индуктивност на роторната намотка; L_m - индуктивност на намагнитващата верига; -

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) - \text{коэффициент на разсейване на двигателя.}$$

Трябва да се отбележи, че за токовите регулатори съществува разлика в параметрите на обекта за осите d и q на управлението. За d -оста $R = R_s$, за q -оста $R = R_s + R_r$.

На фиг. 24в е показана структурната схема на системата за управление.



Фиг. 24в. Структурна схема на затворена система за управление на обект с аperiодична предавателна функция и ПИ регулатор с последователна топология

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архангельский Н.Л.* Электроприводы постоянного тока с импульсными преобразователями: – Иваново: ИГЭУ, 1995. –123 с.
2. *Асинхронные двигателя серии 4А: Справочник/Кравчик А.Э., М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.* - М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с.
3. *Белов М.П.* Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004.– 576 с.
4. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие – Спб., 2001. – 320 с.
5. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
6. *Ильинский Н.Ф.* Основы электропривода: Учебное пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. –134 с.
7. *Ключев В. И.* Теория на электродвигателя, Техника, С., 1989, с.560.
8. *Ковчин А.С., Сабинин Ю.А.* Теория электропривода: Учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
9. *Костов И.* Ръководство за лабораторни упражнения по системи за управление на электродвиганията, Пловдив, 2002, с.85.
10. *Костов И., Г. Даскалов.* Проектиране на полупроводникови электродвигания, ръководство за проектиране (решени примери и задачи), Технически университет – Пловдив, 2001, с.106, ISBN 954-8779-27-7.
11. *Личев Р. П.* Проектиране на полупроводникови электродвигания, Технически университет - София, 2005, с.208, ISBN 954-438-527-4.
12. *Михов, М.* Системи за управление на электродвиганията, 2007 г., изд. на ТУ - София.
13. *Панкратов В.В.* Модальное управление и наблюдатели // Методические указания и расчетно-графическая работа / В.В. Панкратов, О.В. Нос. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 54 с.
14. *Панкратов В.В.* Векторное управление асинхронными электроприводами: Учебное пособие для студентов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998.

15. *Семенов Б.Ю.* Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: Солон-Р, 2001.
16. *Силовые полупроводниковые приборы: Справочник / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин.* – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
17. *Спиров Д., Вучев А.* Изследване на динамиката на асинхронен генератор със самовъзбуждане. Габрово: Международна конференция Unitech 11, стр. I-73-I-78.
18. *Усынин Ю.С.* Системы управления электроприводов.– Челябинск: Изд-во ЮурГУ, 2004. – 328 с.
19. *Шрейнер Р.Т.* Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
20. *Шрейнер Р.Т.* Системы подчиненного регулирования электроприводов. – Екатеринбург: Изд-во УГПУ, 1997. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат. – 279 с.
21. *Abhijit D. Pathak.* MOSFET/IGBT DRIVERS. THEORY AND APPLICATIONS, 2002. pp.26, IXYS, Application note.
22. *Internet addresses and links:* Siemens, MathWorks, Allen Bradley, SEW-Eurodrive, Omron, Danfoss, Philips; <http://batarseh.cecs.ucf.edu/kss/>, <http://www.ece.umn.edu/users/riaz/>; <http://www.nxp.com/acrobat/applicationnotes/APPCHP1.pdf>; <http://www.namc.danfoss.com/literature/factsworth.pdf>; <http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1a/spruhj1a.pdf>; <http://arteh-bg.com/wp-content/uploads/2013/03/SDC1VMANrus.pdf>.
23. *Krishnan R.* Electric motor drives, Pearson Education, Singapore, 2003.
24. *Leonhard W.* Control of electrical drives, Springer, 3rd ed., ISBN 3-540-41820-2, 2001, pp.600.
25. *Mohan N., Undeland T. and Robbins W.* Power Electronics 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 2003, pp.802, USA ISBN 0-471-22693-9, WIE ISBN 0-471-42908-2.
26. *P. Sen.* Principles of Electric Machines and Power Electronics, 2nd ed. New York: Wiley, 1997, p. 265.
27. *Power Semiconductor Applications/Philips Semiconductors.* - Chapter 3 – Motor Control, pp.241-282.
28. *Vuchev A. S., N. D. Bankov, Y. K. Madankov.* Current Control for a CO₂ Laser using LCC Resonant DC-DC Converter. – Sofia: ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2012, ISSN 1314-0078, Volume 6, Number 1. –140-143 pp.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Технически данни за трансформатори

Тип	K_{TP}	R_a	X_a	U_k
	-	Ohm	Ohm	%
ТСТ 1-230/40-M1	1.86	0.069	0.063	2.44
ТСТ 1-230/63-M1	1.82	0.065	0.059	3.8
ТСТ 1-230/100-M1	1.8	0.023	0.065	4.75
ТСТ 1-230/160-M1	1.79	0.014	0.05	5.7
ТСТ 1-230/250-M1	1.79	0.008	0.031	5.3
ТСТ 1-230/320-M1	1.73	0.006	0.033	6.8
ТСТ 1-230/40-H1	0.82	0.32	0.23	3.4
ТСТ 1-230/63-H1	0.79	0.14	0.4	5.6
ТСТ 1-230/100-H1	0.77	0.09	0.3	6.4
ТСТ 1-230/160-H1	0.79	0.054	0.17	6.0
ТСТ 1-230/250-H1	0.8	0.02	0.12	6.4

$U_k \% = 2, U_1 = 380 V$

Тип	S_T	U_2	P_{XX}	P_{K3}	I_k
	kVA	V	W	W	%
ТСТ-6.3	6.3	104	75	175	12
ТСТ-10	10	200	105	220	10
ТСТ-16	16	416	120	340	6
ТСТ-25	25	416	200	380	6

$U_k \% = 8...10, U_1 = 380 V$

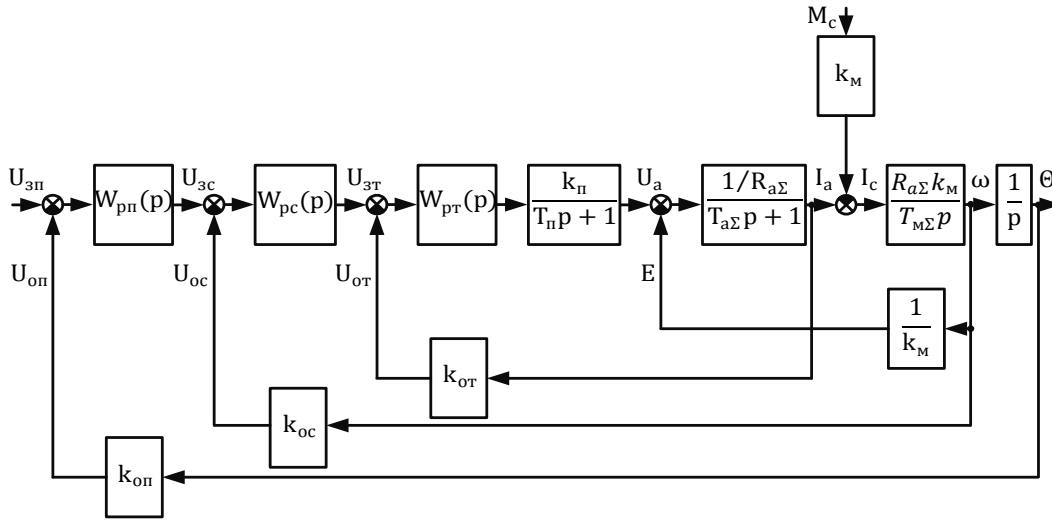
Тип	S_T	U_2	I_2	L
	kVA	V	A	mH
T6T-2/0.104-04	2.06	60	9	1.97
T6T-4/0.208-04	4.15	120	9	4.75
T6T-8/0.104-04	8.2	60	36	0.675
T6T-16/0.208-04	16.5	120	36	1.42
T6T-20/0.104-04	20.6	60	90	0.218

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

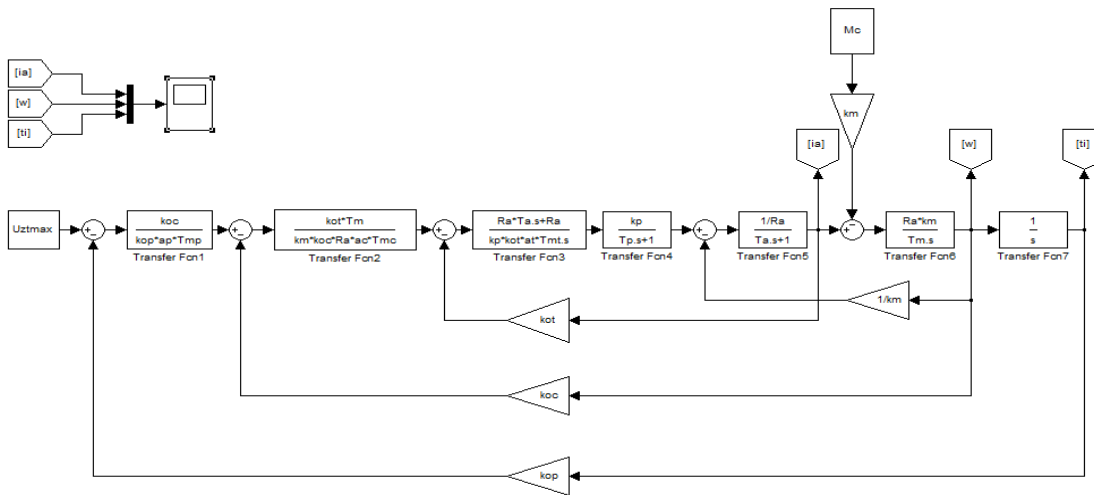
Технически данни за анодни реактори

Тип	R_a	X_a	U_k
	Ohm	Ohm	%
PC-25/1.9	0.068	0.18	1.9
PC-40/1.4	0.083	0.08	1.4
PC-63/2.3	0.097	0.1	2.3
PC-100/4.5	0.12	0.12	4.5
PC-160/6.3	0.1	0.1	6.3

Структура и модел на позиционно електрозадвижане



Фиг. П13-1. Структурна схема на позиционно електрозадвижане с последователна корекция на контурите



Фиг. П13-2. Модел на позиционно електрозадвижане с последователна корекция на контурите

```

clear;clc;      Omegamax=183;      Tm=J*Ra/cf^2;
La=0.016;      kp=22;          Tmt=Tp;
Ra=0.78;       Tp=0.0016;    km=1/cf;
J=0.05;        ac=2;         koc=Uzcmax/Omegamax;
cf=1.234;      at=2;         Titamax=10;
Uztmax=10;     ap=6;         kop=Uzpmx/Titamax;
Uzcmax=10;     Mc=16.5;      Tmp=ac*at*Tmt;
Uzpmx=10;      Ta=La/Ra;     Tmc=at*Tmt;
lamax=40;      kot=Uztmax/lamax;
    
```

Фиг. П13-3. Примерен m-файл на позиционно електрозадвижане с последователна корекция на контурите

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Таблица П15-1. Типични нива на настройка на напрежение, температура и изолационно съпротивление R_{ins} на защитни устройства по механизми, режими на работа и условия на експлоатация.

Входен сигнал		Напрежение			Температура		Rins
Ниво на:		$u_{>1}$	Прекъсната фаза	u_{+}	Позистор Термистор	Термодвойка	Тор.тр-р (Holmgreen)
Задание	Обхват	60-120%	<60%	5-80%	-	50-200 °C	5-500mA (0.1-1mA)
	Настройка	-	-	35%	-	50 °C	5mA (0.5mA)
Времезак.	Обхват	0.2-30s	-	1-5s	-	-	-
	Настройка	-	2s	2.5s	-	<0.8s	(0.1-5s)
Предупр.	Обхват	-	-	-	-	0.5-1.0 T_{nom}	-
	Настройка	-	-	-	-	0.75 T_{nom}	-
Механизми							
Помпи			■	■	■		
Потопяеми помпи			■	■	■		■
Компресори			■	■	■		
Хлад. Компресори			■	■	■		
Хидравлични у-ва			■	■	■		
Транспортни ленти			■	■	■		■
Кранове, асансьори					■		■
Вентилатори					■		
Центрофуги					■		
Дробилки, мелници					■		■
Смесители					■		■(○)
Преси,валцови мелници					■		■(○)
Режими на работа							
Тежък пуск					■		
Лек пуск					■		
“Звезда-триъгълник”					■		
Двигатели високо U		■					
Взривозащитени двиг.					■		
Условия на експлоатация							
Колебания на T_{amb}		■			■		
Висока T_{amb}		■			■		
Запрашеност		■			■		
Влага							○ (■)
Мобилни съоръжения			■	■	■		■

Забележка. $u_{>}$ – отклонение на захранващото напрежение, u_{+} – неправилна фазова поредност, спрямо номиналното напрежение. T_{amb} - температура на околната среда. ○(■) – частично (напълно) приложима защита.

Таблица П15-2. Типични нива на настройка на ток на защитни устройства по механизми, режими на работа и условия на експлоатация.

Ниво на:		i_{max}^1	i_{st}	$i_{>>}$	$i_{>}$	$i_{<}$	i_{ub}
Задание	Обхват	4-12	2.5-12	1-6	1.05-1.15	0.25-1	0.05-0.8
	Настройка	10	6	2.4	-	0.75	0.35
Времезак.	Обхват	20-990ms	1-600s	0.1-5s		1-60s	1-5s
	Настройка	50ms	10s	0.5s		10s	2.5s
Предупр.	Обхват	-		1-6	-	0.25-1	0.05-0.8
	Настройка	-		2	-	0.75	0.2
Механизми							
Помпи		■			■		
Потопяеми помпи		■	■		■	■	
Компресори		■			■		
Хлад. Компресори		■	■		■		
Хидравлични у-ва		■			■		
Транспортни ленти		■	■	■	■	■	
Кранове, асансьори		■	■	■	■		
Вентилатори		■	■		■		
Центрофуги		■	■		■		
Дробилки, мелници		■	■	■	■		
Смесители		■	■	■	■		
Преси, валцови мелници		■	■	■			
Режими на работа							
Тежък пуск				■	■		
Лек пуск				■	■		
“Звезда-триъгълник”				■	■		
Двигатели високо U					■		
Взривозащитени двиг.					■		
Условия на експлоатация							
Колебания на T_{amb}							
Висока T_{amb}							
Запрашеност							
Влага							
Мобилни съоръжения							

Забележка. i_{max} – ток на късо съединение, i_{st} – пусков ток, i_{ub} – ток на несиметрия, всички спрямо номиналния.

доц. д-р инж. Иван Йосифов Костов
маг. инж. Георги Иванов Иванов

УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯТА

Учебно пособие за курсово проектиране

Първо издание

Редактор: *доц. д-р инж. Иван Костов*

Технически редактор: *доц. д-р инж. Иван Костов*

Компютърна обработка: *доц. д-р инж. Иван Костов*

На корицата: USS New Mexico, Панамският канал, 25.07.1919 г. - по времето, когато е оборудван с насочващи ПИД системи за управление на инж. Н.Минорски.

—
Издава: «УЧИ» Пловдив

4023, Пловдив

Редактор и графично оформление на корицата:

инж. Георги Учкунов

Печатни коли 4,5

Формат 32/64/94

ISBN 978-619-90128-6-4