



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И
ЕЛЕКТРОНИКА”

Маг. инж. Ивайло Димитров Иванов

**ВЗАИМНО ВЛИЯНИЕ МЕЖДУ ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ,
ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАРИ ЗА
СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника,
електроника и автоматика

Докторска програма: Електроснабдяване и
електрообзавеждане

Габрово, 2021 г.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ГАБРОВО

Факултет „ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И
ЕЛЕКТРОНИКА”

Маг. инж. Ивайло Димитров Иванов

**ВЗАИМНО ВЛИЯНИЕ МЕЖДУ ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ,
ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАРИ ЗА
СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователна и научна степен „доктор”

Област на висше образование: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника,
електроника и автоматика

Докторска програма: Електроснабдяване и
електрообзавеждане

Научни ръководители: 1. доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев
2. доц. д-р Милена Радославова Рачева

Рецензенти: проф. д-р инж. Васил Димитров Димитров
доц. д-р инж. Ивайло Стефанов Стоянов

Габрово, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за официална защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово, проведен на 15.04.2021 г.

Дисертационният труд съдържа 208 страници. Научното съдържание е представено в увод, 5 глави и 4 приложения и включва 150 фигури и 55 таблици. Цитирани са 187 литературни източника. Номерацията на фигурите, таблиците и формулите в автореферата е в съответствие с тази в дисертацията.

Разработката/изследванията на/по дисертационния труд е/са извършена/и в катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане” към факултет „Електротехника и електроника” на Технически университет – Габрово и във фирма Водоснабдяване и канализация ЕООД – Стара Загора.

Официалната защита на дисертационния труд ще се състои на
..... Г. ОТ Ч. В
.....

Благодарности: Авторът изказва благодарност на научните ръководители доц. д-р инж. Свилен Радославов Рачев и доц. д-р Милена Радославова Рачева за цялостната дейност при съвместната работа.

Реализацията на настоящата дисертация бе подпомогната и от участия в научно-изследователски проекти, финансирани целево от държавния бюджет:

2016 г. „Анализиране и използване на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния сектор”

2017 г. „Изследвания и използване на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния сектор”

2018 г. „Изследвания на работни режими на съвременни енергийно-ефективни електрокомпоненти и системи с приложение в индустриалния и публичния сектор”

2019 г. „Съвременни енергийно ефективни приложни решения за интегриране на електромобил и инфраструктура за зареждане и съхранение на енергия в градски условия”

2020 г. „Съвременни енергийно ефективни приложни решения за интегриране на електромобил и инфраструктура за зареждане и съхранение на енергия в градски условия”

Автор: Ивайло Димитров Иванов

Заглавие: ВЗАИМНО ВЛИЯНИЕ МЕЖДУ ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ, ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ И ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ТОВАРИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

Тираж: 35 бр.

Място на отпечатване: Университетско издателство „Васил Априлов” – Габрово

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Важен аспект през последните години е ефективността на ЕЗ. Всеобщ стремеж е минимизиране на растящите производствени разходи за електрическа енергия (ЕЕ), която е една трета от консумираната енергия в световен мащаб. Тези технологични нужди поставят ред нови задачи пред конструкторите на ЕМ. При ЕЗ за СН повишаването на ефективността на отделна ЕМ дори с 1% води до спестяване на големи разходи за електроенергия през целия експлоатационен живот на АДНСР за СН.

Цел и задачи на дисертационния труд

Цел на настоящата дисертация е разработка и анализ на инженерни подходи, методи, модели, алгоритми и методики за изследване на електромеханичните преходни процеси, методите за диагностика и контрол на състоянието, както и практическото определяне на възможността за самопускане на АДНСР за СН от гледна точка на взаимното влияние между електроснабдяването и електрообзавеждането.

За постигане на тази цел трябва да се решат широк кръг задачи. Главните от тях са:

1. Нужно е да се изследва влиянието на стойността на захранващото напрежение и сумарния инерционен момент на ЕЗ върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане.
2. Да се изведат зависимостите на загубите на мощност и енергия в АДНСР за СН в симулационна среда от захранващото напрежение, които са с голяма практическа важност.
3. Необходимо е да се създаде симулационен модел, с помощта на който да се извършат изследвания за съчетаното влияние на едновременно изменение на захранващото напрежение и честотата, осъществявано по определен закон, върху загубите на ЕЕ за различни стойности на началния съпротивителен момент в мощни АДНСР за СН, управлявани с помощта на честотен преобразувател.
4. Протичането на преходните процеси при самопускане на АДНСР за СН не е задълбочено разглеждано в специализираната литература у нас. Нужно е те да се изследват при различни механични характеристики на куплираните механизми в различни условия и да се избере метод за опростено изчисляване на самопускане.
5. Необходимо е и да се анализират функционалните възможности на ЦРЗ. Тези съвременни устройства са от изключителна необходимост за осигуряване на качествена експлоатация не само на АДНСР за СН, но и на цялата ЕСС на различните предприятия, които експлоатират този тип ЕМ. Анализът трябва да обхване и изчисляването на необходимите настройки за осигуряване на самопускане на различните агрегати, участващи в него.
6. Необходимо е да се систематизират изискванията към АВР и да се предложат съвременни системи с висока надеждност и най-вече бързодействие, което да осигури високо качество на преходния процес.
7. Необходимо е данните за аварийността на АДНСР за СН, получени от изследваната литература, да се обработят и систематизират в единни графично представени модели, които да служат за онагледяване на разпределението на аварийността според мястото ѝ на проявяване.

8. Да се систематизират и опишат типичните честотни диапазони за откриване на определена неизправност при използване на различни вибродиагностични методи.
9. Да се извършат практически измервания със съвременен диагностичен комплекс за изследване на поведението и анализ на техническото състояние на АДНСР за СН, намерили приложение в индустрията.

Методи на изследване

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените задачи са свързани с теоретичен анализ, експериментални изследвания, моделиране и изследвания в симулационна среда. Съвременна измервателна и диагностична апаратура.

Научна новост

Получените резултати от моделни изследвания са с пряко приложение при изследване и оптимизиране на динамичните характеристики при проектиране (синтез) на силови електрозадвижвания и системи за управление от гледна точка на механична част, конструкция на електродвигател и регулирането му при различни цикли на работа.

Приложимост

Разработените и предложени модели могат да се използват освен за анализ и за намиране на решение на обратната задача – разработване на електродвигатели и управляващи системи с параметри, гарантиращи динамични процеси при определени от потребителя изисквания. Това детайлно изучаване на електромагнитните и електромеханичните процеси води до по-рационално и целесъобразно проектиране на електрозадвижвания за различни приложения.

От своя страна практическите изследвания са полезни от гледна точка на оценка на текущото състояние на електротехнически обекти и вследствие на това – оформяне на предложения за евентуални подобрения за оперативната дейност при експлоатация.

Апробация на дисертационния труд

Значителна част от резултатите на работата са представени в публикации на следните научни форуми:

- Международен симпозиум "ISFEE" 2016г. ,Букурещ, Румъния;
- Международна конференция "СИЕМ" 2017г. ,Букурещ, Румъния;
- Международна конференция "ICATE" 2018г. ,Крайова, Румъния;
- Конференция "ТИЕМ" 2019г. ,Кавала, Гърция;
- Международна конференция "Унитех" 2019г. ,Габрово, България;

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационния труд е разработен в 5 глави и съдържа 209 страници, в които са включени 122 формули, 150 фигури, 55 таблици и четири приложения. Списъкът на литературните източници е съставен от 187 заглавия, от които 99 на кирилица, 64 на английски език и 22 източника в Internet.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава първа. ЛИТЕРАТУРНО ПРОУЧВАНЕ И АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПРОБЛЕМА

1.1. Общи сведения. Практическото приложение на високоволтови ЕМ е разнообразно и широко налично. В индустрията те се срещат като двигателно устройство, произвеждащо въртящ момент за широк набор от присъединени към тях работни машини, механизми и работни органи. Такива са: лентови транспортъори, багери за откритите рудници, вентилатори, задвижки за мощни компресорни агрегати, дробилки за каменна и дървесна маса, топкови мелници в циментовата индустрия, въртящи се пещи, мощни мелиоративни системи, помпи с различна степен на сигурност за термични електрически централи (ТЕЦ) и атомни електрически централи (АЕЦ), помпи при пречистването на води, както и за различни приложения в нефтено-газовата, химическата, хранително-вкусовата, хартиено-целулозната индустрия и миннодобивния сектор и др. [4, 24, 45, 100, 176].

Начините за присъединяване на този тип ЕД към захранващата мрежа са посредством: директно присъединяване; включване „звезда-триъгълник“; включване с постоянно присъединен токоограничаващ реактор чрез мощни контактори и разединители; с понижено напрежение и използването на автотрансформатор; реакторно пускане и присъединяване блок „трансформатор-двигател“; пускане със софтстартър и кондензаторно включване [3, 6, 14, 38, 53, 73, 74, 75]. Това разнообразие на начините за присъединяване е продиктувано най-вече от едни от основните недостатъци на АД, а именно от големия пусков ток и малкия начален въртящ момент.

Към надеждната работа на високоволтовите ЕД има ред изисквания, породени от голямата технологична отговорност, която носят тези машини към работния процес в предприятията, в които са монтирани. Отказите на тези ЕД предизвикват значителни загуби поради престоите на задвижваните от тях съоръжения. Голямата експлоатационна надеждност на АД е техният най-важен показател, в сравнение с който всички останали качества на машината са второстепенни [45].

1.2. Анализ на състоянието на проблема. За да се направи качествен анализ на цялостната работа на АДНСР за СН, е необходимо да се систематизират показателите за качеството на електрическата енергия (ПКЕЕ), които имат пряко влияние върху нормалната и дълговременна работа на този тип ЕМ. **Именно тук се явява важна двупосочната връзка между електроснабдяването (в случая захранващите мрежи) и електрообзавеждането (въртящите ЕМ) с различни проявления на взаимното им влияние.**

Основният нормативен документ за ПКЕЕ в Република България е приет от Държавна комисия за енергийно и водно регулиране (ДКЕВР) с Решение №П-3/30.06.2004 на база на стандарт EN 50160, който от 2006 г. е БДС EN 50160 и изцяло замени стандарт БДС 10 694-80. ПКЕЕ, които се номинират в него, са следните: отклонение на честотата, отклонение на напрежението, бързи изменения на напрежението, несиметрия на напрежението, несинусоидалност на напрежението, краткотрайни спирания на напрежението, краткотрайни и продължителни прекъсвания. Отнасят се за мрежи НН и СН (до 35 kV) [18].

Влиянието на ПКЕЕ върху работата на АДНСР за СН е подробно разгледано в [9, 12, 59, 82, 94]. Информацията обаче, е систематизирана по различни приоритети, които са стояли пред съответните автори. Нужно е тя да бъде допълнително обработена и подредена във вид, удобен за ползване и от по-широк кръг изследователи и практиканти в това направление. Същевременно трябва да се

отчете фактът, че изследването на поведението на АДНСР за СН при възможна работа на високоволтовото ЕЗ при ненормални и несиметрични режими извън препоръчителните от стандартите параметри не е задълбочено разглеждано в изложението на класическата литература за ЕМ.

Неизменна част от експлоатацията на АДНСР за СН са и аварийните режими, които могат да се разделят в две категории: проява на неизправности вътре в самата ЕМ и проява на различни влияния, породени от к.с. Класификацията на видовете к.с. (надлъжни и напречни несиметрии), режимите на работа на неутралата, практически методи за изчисляване на к.с., както и специфично систематизиране и съпоставяне на данните е направено в [10, 28, 31, 32, 84].

За експлоатационния персонал, който обслужва такъв тип ЕД, е от първостепенна важност да разполага с утвърдена методика, която да му помага бързо да се ориентира при анализ на аварийността в системата на собствени нужди (с.н.) в ЕЦ.

За осигуряване на качество и надеждност на технологичния процес за производство на ЕЕ в ЕЦ е нужно осигуряване на поне едно резервно захранване за отговорните механизми, задвижвани от АДНСР за СН. Резервното захранване е присъединено към шини високо напрежение (ВН) (110-400 kV) или от третичната (терциерна) намотка на автотрансформаторите (АТ), свързващи две разпределителни уредби ВН [77]. Преминването към него става чрез система, обезпечаваща *автоматичното включване на резерва* (АВР). При превключването към резервното захранване напрежението на АД за кратко време се изключва [9].

Необходимо е да се систематизират изискванията към АВР и да се предложат съвременни системи с висока надеждност и най-вече бързодействие, което да осигури качество на преходния процес, което пък от своя страна е гаранция за безопасна и качествена експлоатация на АДНСР за СН. Такива например са системите за *бързо автоматично включване на резерва* (БАВР).

В експлоатацията на системата за с.н. на ЕЦ често се поставя въпросът за осигуряване на самопускане на АДНСР за СН. Този процес се характеризира с някои особености [95].

Главната задача за осигуряване на самопускане е да се съхрани работоспособността на агрегата при кратковременно нарушаване на електроснабдяването. Нужно е да се отчете, че нередко възстановяването на захранващото напрежение след негово аварийно прекратяване се извършва в условията на снижена сумарна мощност на захранващия източник. Процесът на самопускането, режимите на работа на ЕД, на механизмите, както и влиянието на самия процес върху техните работни характеристики са разглеждани в [9, 56, 57, 60, 66, 77, 78, 86, 97, 99].

Протичането на преходните процеси при самопускане на АДНСР за СН не е задълбочено разглеждано в специализираната литература у нас. Нужно е детайлно те да се изследват при различни механични характеристики на куплираните механизми в различни условия и да се избере метод за опростено изчисляване на самопускане.

Протичането на преходните процеси в ЕМ не може да бъде мигновено, а винаги е свързано с определен краен промеждутък от време [61]. Това време зависи от активните съпротивления на намотките, които при АД са сравнително големи и затихват бързо [13]. По време на тези процеси се развиват значителни електромагнитни моменти, както и ударни токове, няколко пъти превишаващи номиналните, пусковите и дори максималните. Тези моменти са пропорционални на тока в квадрат и са причина за поява на значителни механични напрежения в отделни части на ЕМ, както и в самите намотки. Те трябва да се вземат предвид при

оценка на надеждността на работата на самата ЕМ, която е част от цялостна електромеханична система [92].

При анализа се приема система от означения, в която принадлежността на променливата към една или друга намотка се определя с индексите, с които са означени осите, свързани с намотките на обобщената ЕМ и с показване дали се отнасят към статора или към ротора [39, 76].

Преходът към модел с взаимно неподвижни намотки опростява съществено математическото описание на динамичните процеси на електромеханичното преобразуване на енергията. Коефициентите на взаимната индукция и на пълния поток на взаимно неподвижните намотки стават независими от механичната координата, а движението на реалните намотки и въртенето на координатните оси се отчита в уравненията на електрическото равновесие чрез въвеждане на допълнителни е.д.н. на въртенето. Значително се опростява уравнението на електромагнитния момент на ЕД, в което се отстранява непосредствената зависимост от ъгъла φ_{el} и електромеханичната връзка се проявява чрез зависимостта на токовете и пълните магнитни потоци (потокосцепленията) на намотките от скоростта на ЕД.

При преходните процеси в електромеханичната система възникват значителни ударни токове, които предизвикват ударни моменти и натоварвания на ЕД и на елементите на задвижвания механизъм. По-точното определяне на тези динамични натоварвания позволява при проектирането на ЕД, при избирането му по мощност и при проверката му по загряване и претоварване те да се отчитат заедно със статичните му натоварвания. От динамичните натоварвания зависят и правилното якостно оразмеряване на елементите на механизма, и неговата надеждност.

Нужно е да се изследва влиянието на стойността на захранващото напрежение и сумарния инерционен момент на ЕЗ върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане; зависимостите на момента от захранващото напрежение също имат голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АДНСР за СН.

От гледна точка на *енергийна ефективност* е целесъобразно да са известни загубите на енергия при работата на ЕЗ за СН на помпени агрегати (ПА) като масово използвани технически решения, като се акцентува върху съвместната работа на производствения механизъм и задвижващия ЕД, с изследвания на цялостната електромеханична система.

Проектирането на въртящо се оборудване е силно зависимо от необходимостта за уравнивяване на възникващите динамични натоварвания [131]. От друга страна, в някои индустриални зони могат да възникнат много често отклонения с дълбочина между 10% и 15% от номиналното напрежение в резултат на превключване на електрически товари в системите на потребителите.

Отклоненията в напрежението на ЕСС могат да повлияят на избора на ЕД. Съгласно предположенията на индустриалния стандарт за отклонение на напрежението, отклонението от номиналното напрежение е $\pm 10\%$. В случай, че отклонението е по-голямо от споменатото по-горе, изборът на ЕД може да бъде повлиян от преобладаващото захранващо напрежение [121]. Всичко това обуславя необходимостта от изследване на влиянието на отклонението на напрежението върху работата на специфични АД като част от ЕЗ. При това може да се приемат различни интервали и отклонения на номиналното напрежение от определените в EN 50160:2010 ($\pm 10\%$), за да се получат общи закономерности.

Необходимо е да се създаде симулационен модел, с помощта на който да се извършат изследвания за съчетаното влияние на едновременното изменение на захранващото напрежение и честотата, изменяни по определен закон, върху загубите

на ЕЕ за различни стойности на началния съпротивителен момент в мощни АДНСР за СН, управлявани с помощта на честотни преобразуватели. Този модел би бил подходящ и за реализиране на решенията и на други поставени в изложението на настоящата глава въпроси, имащи голяма практическа стойност.

Продължителната експлоатация на АДНСР за СН, е доказала необходимостта от превантивна поддръжка и контрол на техническото състояние на самата машина. Взимането на превантивни мерки само ще спести бъдещи по-големи разходи от извънпланови спирания или разрастващи се неизправности.

Диагностиката има за цел своевременно откриване и определяне на неизправностите според местата на тяхното проявление, евентуалната причина за определено аварийно събитие/отказ и възможност за предвиждане на следваща такава с оглед превантивна поддръжка [128].

Задълбочени изследвания за процентното разпределение на проявените неизправности и откази са направени в [25, 45, 70, 85, 136, 158, 163]. Надеждността на ЕМ зависи в много голяма степен от условията на работната среда и условията на експлоатацията (температура, относителна влажност и загаденост на въздуха, наличие на агресивни газове, непосредствено въздействие на вода, вибрационни и ударни натоварвания, интензивност на появата на атмосферни пренапрежения и земни съединения в захранващата мрежа и др.).

Необходимо е изложените в цитираната литература данни да се обработят и систематизират в единни графично представени модели, които да служат за онагледяване на разпределението на аварийността според мястото ѝ на проявяване.

При изграждането на стратегия за диагностика и мониторинг на помпени агрегати, задвижвани от АДНСР за СН, е нужно тя да бъде съобразена с конструктивните им особености, базирани на внимателен анализ на възможните проявления на дефекти и неизправности на едни и същи или конструктивно близки аварийращи части или възли.

В специализираните съвременни литературни източници на български език не са в достатъчна степен и задълбоченост разгледани и подробно описани методите за диагностика и контрол на техническото състояние на АДНСР за СН.

Това поставя изискването да се систематизират и опишат типичните честотни диапазони за откриване на определена неизправност при използване на различни вибродиагностични методи. Направена е оценка за тяхната ефективност при определяне на различни неизправности както по място на възникване, така и по стадий на развитие.

Необходима е и оценка на най-съвременните методи за спектрален анализ на статорния ток – в обобщен вид да се покажат математическите методологии в тази област.

Много важен дял, свързан с експлоатацията, заемат практическите измервания със съвременни диагностични комплекси за изследване на поведението и анализ на техническото състояние на АДНСР за СН, намерили приложение в индустрията. Полезното в тези случаи е възможността за сравняване с теоретично получени резултати и оттам – формулиране на определени препоръки.

Глава втора. ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ОБЕКТИ ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ – ОСОБЕНОСТИ ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА МАШИНИ И СЪОРЪЖЕНИЯ

2.1 Показатели за качеството на електрическата енергия на електроснабдителната система в електрически централи

Във всички типове ЕЦ изключително разпространение са получили АДНСР. Тези ЕД допускат директно включване от ЕСС за СН на ЕЦ без регулираща апаратура при коефициент на натоварване, близък до 1. Тези положителни свойства на АДНСР

се получават за сметка на високата кратност на пусковия ток, достигаща стойности в границите на 4÷7 пъти номиналния ток на ЕД. Използването на такива ЕД изисква осигуряването на мощни захранващи мрежи 6 (10) kV, издържащи големите токове на к.с., бързодействащи и надеждни килии на комплектни разпределителни устройства (КРУ), осигуряващи висока включвателна и изключвателна способност, както и съвременни средства за РЗА, оборудвани с микропроцесорни устройства (ЦРЗ) с висока степен на надеждност и възможност за изграждане на собствена логика на действие при различни оперативни превключвания и аварийни ситуации [97].

АДНСР, директно захранени от шините СН в ЕЦ, намират приложение най-вече в ТЕЦ и АЕЦ [15].

Също така, трябва да се отчете фактът, че изследването на поведението на АДНСР за СН при възможна работа на високоволтовото ЕЗ при ненормални и несиметрични режими, извън гарантираните от стандартите параметри, не е задълбочено разгледано в изложението на класическата литература за ЕМ. Всяко изменение на номиналните захранващи параметри води директно до промяна на установените електромеханични и топлинни състояния на АД. Протичането на топлинните процеси и техният контрол са неизменна част от качествената експлоатация на високоволтовите електрозадвижвания. Работата на АДНСР за СН при номинални захранващи параметри в близост до граничните условия, зададени от стандартите за качество на ЕЕ, не води до съществени изменения в установените топлинни и електромеханични константи на машината. От страна на производителите обаче липсват реалните граници на параметрите на електроснабдяването, които създават конкретни опасности за надеждността на работа на АД. Става въпрос за топлинните времеконстанти на статорната и роторна намотка. Това важи най-вече за настройка на зададени стойности на контролираните параметри от релейната защита, които при коректни настройки биха гарантирали на високоволтовите ЕД минимизиране на отказите и аварийните изключвания през целия гарантиран от производителите експлоатационен срок [4, 13, 28, 31, 73, 87].

2.2. Анализ на механичната част на система за собствени нужди на електрически централи.

Устойчивата работа на ЕД в системата на електроснабдяването на СН във всички експлоатационни режими (пускане, изменение на товара на вала, самопускане, изменение на честотата и напрежението на захранващата мрежа, кратковременно претоварване и др.) е възможна само в случаите на правилен избор на електромеханичните характеристики на механизмите и ЕД [82].

Основната характеристика на механизмите за СН в ЕЦ е механичната. Тя изразява зависимостта на съпротивителния момент на механизма (M_c) от честотата му на въртене. За голяма част от механизмите, които работят в ЕЦ, механичната характеристика може да се изрази с уравнение (2.14):

$$M_c = M_{co} + (M_{сн} - M_{co}) \left(\frac{n}{n_n} \right)^p \quad (1.14)$$

където: M_{co} – начален съпротивителен момент на механизма (без момента на триене при неподвижно състояние); $M_{сн}$ – номинален съпротивителен момент; n – действителна честота на въртене на механизма; n_n – номинална честота на въртене на механизма, която се приема за равна на синхронната честота на въртене на ротора на ЕД; p – степенен показател, който се определя от характера на механизма.

Като се разделят двете части на (2.14) с номиналния съпротивителен момент $M_{сн}$ и се изрази действителната честота на въртене на механизма с хлъзгането на ротора на двигателя, се получава уравнение (2.15):

$$m_c = m_{co} + (1 - m_{co})(1 - s)^p \quad (2.15)$$

където $m_c = \frac{M_c}{M_{сн}}$ е съпротивителният момент в о.е. а $m_{с0} = \frac{M_{с0}}{M_{сн}}$ – началният съпротивителен момент в о.е.

За вентилаторите и помпите с малко противоналягане началният съпротивителен момент може да се приеме за равен на $m_{с0} = 0.15$. За тези механизми зависимостта на съпротивителния момент от честотата на въртене може да се изрази с уравнение (2.16) [9, 82]:

$$m_c = 0.15 + 0.85(1 - s)^p \quad (2.16)$$

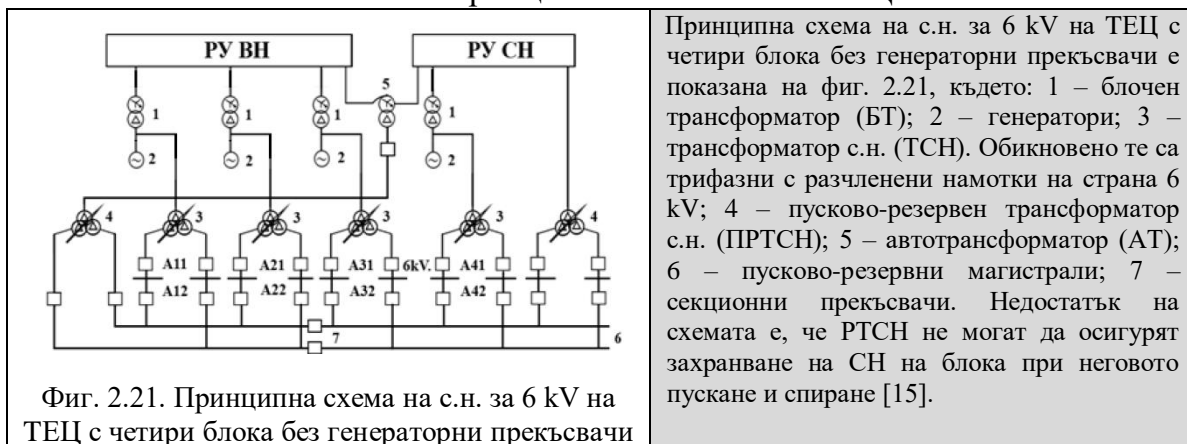
В ЕЦ се използват групи механизми, които се различават както по съпротивителните си характеристики, така и по спиращите си характеристики (спиране по инерция). Инерционното машинно спиране представлява процес на снижаване на собствената честота на въртене, предизвикана от изключване на ЕД от ЕСС или от резки снижения на напрежението.

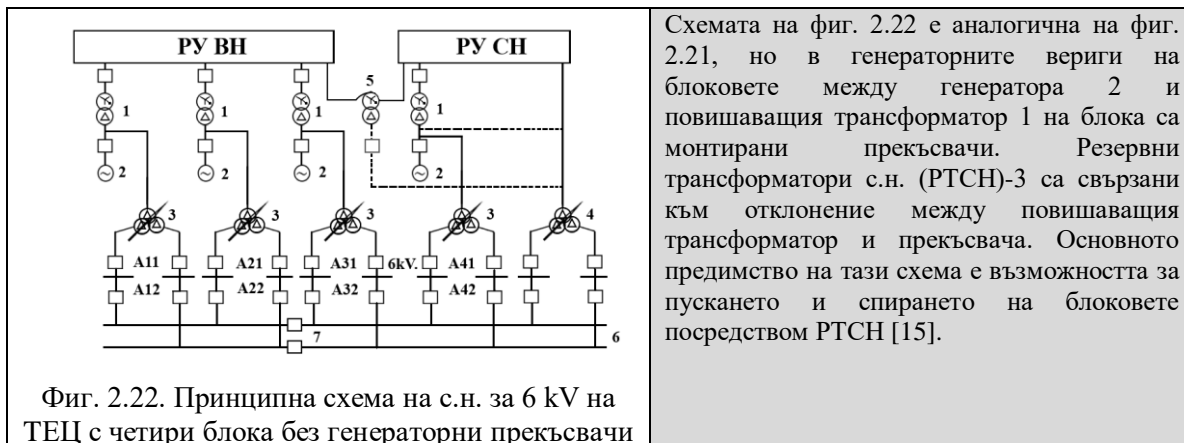
В [51] подробно е изложен изчислителният път за построяване на кривите на инерционното спиране на различните механизми в ЕЦ, класифицирани по стойността на степенния показател p от формули (2.15) и (2.16).

2.3. Анализ на системата за собствени нужди на електрически централи.

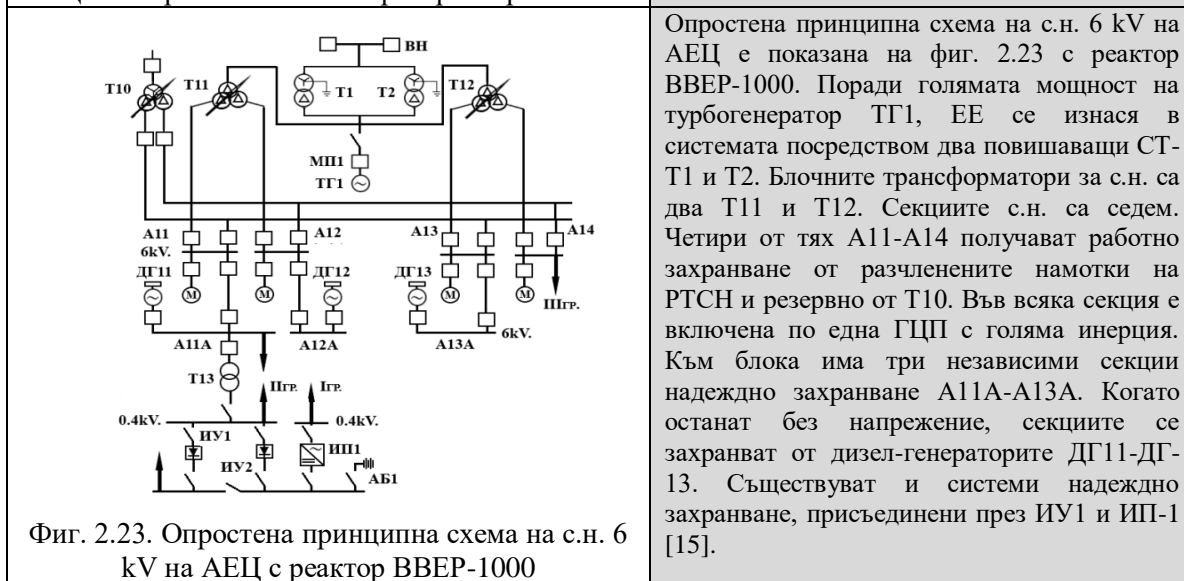
Производството на ЕЕ в ЕЦ е сложен технологичен процес с висока степен на автоматизация. За неговото поддържане и за нормалната работа на основните агрегати (парни котли, атомни реактори, турбини, генератори, трансформатори) и системите към тях (подготовка и подаване на гориво и вода, охлаждане, вентилация и др.) се използва комплекс от спомагателни механизми, съоръжения, устройства и уредби, които образуват системата на с.н. на ЕЦ. Тази система е важен елемент на всяка ЕЦ, поради което при повреда в нея може да се наруши не само работата на самата ЕЦ, а в отделни случаи и на цялата ЕЕС.

Табл. 2.3. Принципни схеми на СН в ЕЦ





Фиг. 2.22. Принципна схема на с.н. за 6 kV на ТЕЦ с четири блока без генераторни прекъсвачи

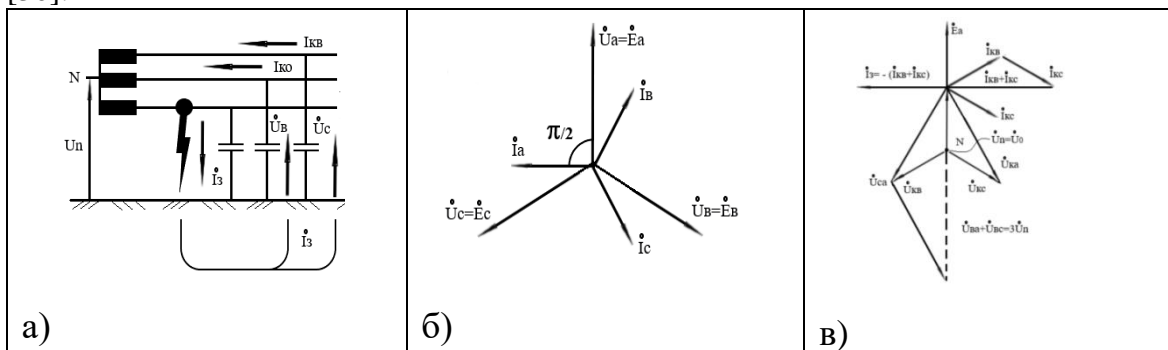


Фиг. 2.23. Опростена принципна схема на с.н. 6 kV на АЕЦ с реактор ВВЕР-1000

2.3.1. Аварии и повреди според вида и мястото на късо съединение.

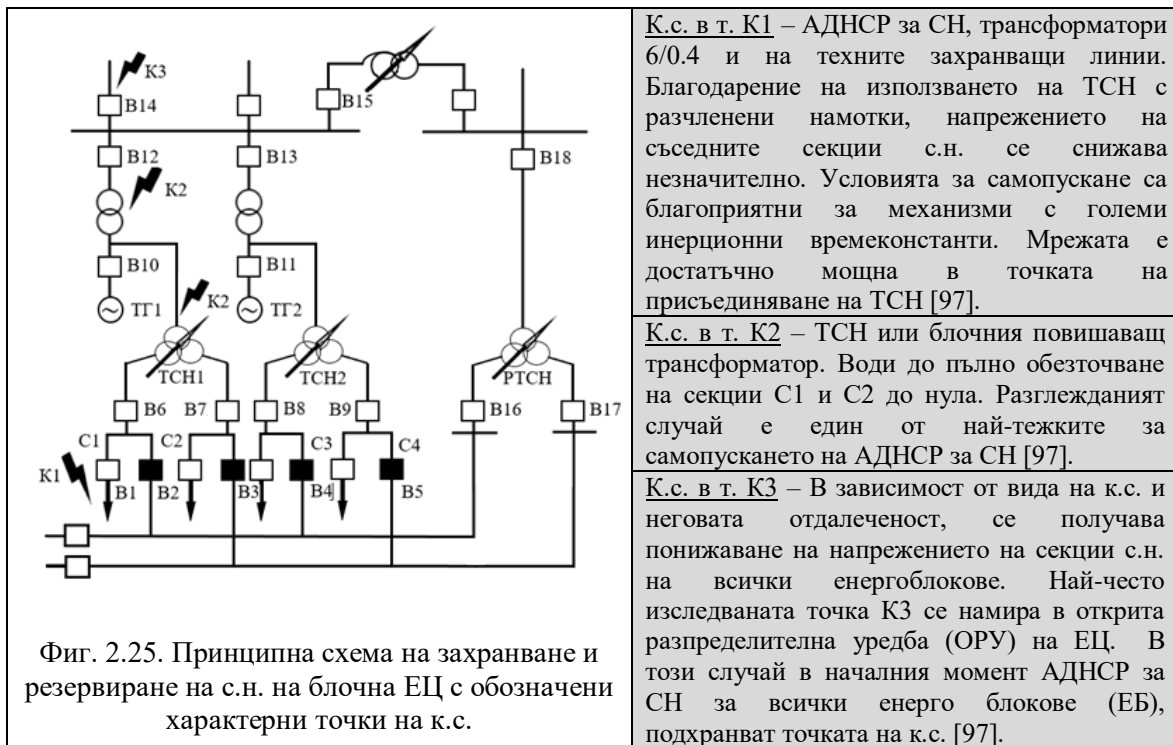
Разпределителните мрежи с напрежение $6 \div 20$ kV по правило работят с изолирана неутрала или с неутрала, заземена през голямо съпротивление. Свързването на една от фазите при този режим на неутралата със земя се нарича просто земно съединение (з.с.) [31].

Такива електроснабителни мрежи при наличие на въртящи се ЕМ могат да работят с изолирана неутрала при ток в мястото на з.с. до 5 А. При ток над 10 А в мястото на з.с., неутралата на електроснабителната мрежа трябва да се заземи по един от начините, предвидени в действащите у нас наредби [8]. Такава е Наредба №3 [30].



Фиг. 2.24. Разпределение на токове и напрежения в режим с изолирана неутрала: а) - схема; б) - векторна диаграма за напреженията и токовете в номинален режим; в) - векторна диаграма за токовете и напреженията при з.с.

Неутралите на всички трансформатори в мрежата са изолирани, $Z_N = \infty$. Токът в мястото на з.с. е сравнително малък. При пренебрегване на активната съставляваща на проводимостта на изолацията спрямо земя, токът на з.с. $I_{з.с.}$ се определя от сумата на капацитивните токове на цялата галванично свързана мрежа. Селективното откриване и изключване на участъка със з.с. е практически невъзможно. Големината на тока в мястото на повредата е $I_{з.с.} = j3\omega C_0 U_\phi$ [8].



Фиг. 2.25. Принципа схема на захранване и резервиране на с.н. на блочна ЕЦ с обозначени характерни точки на к.с.

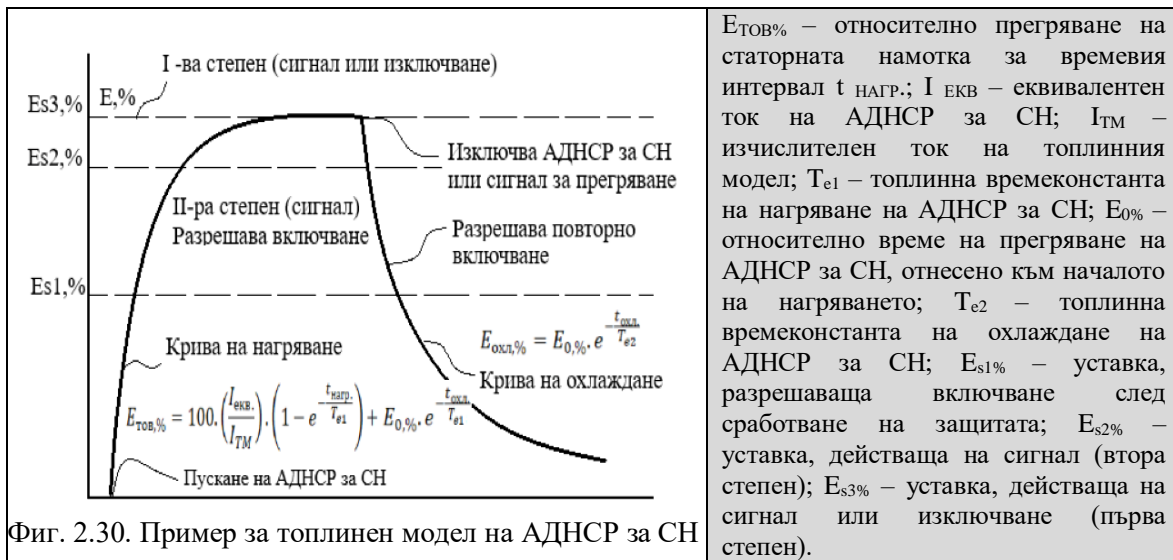
За да се определи периодичната съставка на тока на к.с. в сложна резервирана схема и с подчертан двигателен товар във вериги, захранвани от мощни синхронни генератори (СГ), са необходими по-сложни и точни методи за изчисления.

В [10, 28, 32, 84] като един от практическите методи за изчисляване на к.с. се предлага използването на т.нар. *метод на типовите криви*. Този метод предвижда използването на номограми. **Тези номограми са резултат на изчисления, които се основават на прилагането на прецизен математически модел за описването на преходните процеси в СГ (уравненията на Park).**

Типовите криви представляват фамилия от криви, които характеризират изменението на периодичната компонента на тока на к.с. до 4 s от началото на к.с. Показаните типови криви са за турбогенератори с мощност от 12.5÷800 MVA и хидрогенератори с мощност до 500 MVA. При параметрични стойности $I_G''_{*(i)} = I_{GT}/I_n = \text{const}$. Вижда се, че за определяне на търсените токове е необходимо най-напред да бъде изчислен свръхпреходният ток I_G'' . Най-подходящо е използването на тези криви, когато к.с. е на генераторните шини или шините ВН на ЕЦ. Предлагат се два изчислителни начина, които са описани в [32]

2.3.2. Топлинен модел на асинхронен двигател с накъсосоединен ротор за средно напрежение.

При АДНСР за СН, които са изпълнени с голяма дебелина на изолацията и големи топлинни времеконстанти, този тип защита се отличава с неголямо бързодействие. За да се повиши чувствителността и бързодействието, са разработени топлинни защити, които работят на принципа на *топлинен модел*. Такъв модел е показан на фиг. 2.30 [62].



$E_{тов\%}$ – относително прегряване на статорната намотка за времеви интервал $t_{нагр.}$; $I_{екв}$ – еквивалентен ток на АДНCR за СН; $I_{тм}$ – изчислителен ток на топлинния модел; T_{e1} – топлинна времекопстанта на нагрояване на АДНCR за СН; $E_{0\%}$ – относително време на прегряване на АДНCR за СН, отнесено към началото на нагрояването; T_{e2} – топлинна времекопстанта на охлаждане на АДНCR за СН; $E_{s1\%}$ – уставка, разрешаваща включване след сработване на защитата; $E_{s2\%}$ – уставка, действаща на сигнал (втора степен); $E_{s3\%}$ – уставка, действаща на сигнал или изключване (първа степен).

Определянето на стойностите на T_{e1} и T_{e2} се препоръчва да се изпълни на два етапа. По време на проектирането (първи етап) да се изпълнят теоретични изчисления, а по време на инсталационните и пусковите дейности (втори етап) чрез експеримент на място да се уточнят стойностите на времекопстантите на нагрояване и охлаждане. Получените стойности се въвеждат в настройките на ЦРЗ и тяхното изчисление в експлоатационен режим се осъществява автоматично, с голяма точност и бързодействие [62, 68, 69].

2.4. Обзор на съвременни изисквания към автоматично включване на резервата в системата за собствени нужди на електрически централи.

Захранването на системата за СН в ЕЦ винаги е свързано с електроенергийната система и се нарича работно захранване. ТСН на високата си страна, са присъединени директно към шини генераторно напрежение. По правило те са с някои от следните напрежения: 10.5; 13.8; 15.75; 18; 20; 24 kV. За да се повиши надеждността на работата на механизмите за собствени нужди, те винаги имат поне едно резервно захранване. Резервното захранване е присъединено към шини ВН (110÷400 kV) или от третичната (терциерна) намотка на автотрансформаторите, свързващи две разпределителни уредби ВН [77]. Преминването към него става чрез система, обезпечаваща АВР. При превключването към резервното захранване напрежението на АД за кратко се изключва [9]. За най-отговорните консуматори според ред изисквания се предвижда и получаване на резервно захранване и от мобилни дизел-генератори с автоматично пускане при трайна загуба на напрежение.

2.4.1. Самопускане на АДНCR за СН

Пред проектантите на електрическата част на ЕЦ стои нелеката задача да се проектира такава система за собствените нужди, че да се осигури надеждна работа на всички агрегати и механизми при всички експлоатационни режими. Осигуряването на качествено самопускане на отговорните потребители, предварително разделени в категории, е една от първостепенните задачи, които трябва качествено да бъдат решени. През годините методологията за изчисляване на самопускането и определянето на граничните времена е претърпяла сериозно развитие. Причина е и бързото разработване и усвояване на компютризираните системи за изчисляване и моделиране. За широк кръг специалисти става достъпно моделиране на поведението както на единичен агрегат, така и моделиране на самопускане на двигателни товари, намиращи се на една секция или на различни

секции от системата за СН, предварително заложи в микропроцесорните системи за управление на самопускането и АВР.

В техническите спецификации и ръководства за експлоатация на някои производители на честотни управления за асинхронни двигатели се използва „летящ старт” като термин.

След отпадането от работа на АДНСР за СН, натрупаната в него кинетична и електромагнитна енергия се изразходва постепенно, вследствие на което стойността на напрежението рязко намалява. Пропорционално намалява и магнитният поток по експоненциален закон, а честотата на напрежението се изменя пропорционално на честотата на въртене на ротора, т.е. по линеен закон [56].

В Таблица 2.8 са показани основни зависимости, спомагащи за изчисление на самопускането.

Табл. 2.8. Зависимости за изчисления при самопускането [9, 97]

Опростено изчисляване на самопускането		
Определяне на хлъзгането s и фазата на остатъчното напрежение φ към момента на възстановяване на захранването.	$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_{j*(s)}} (M_{c*(s)} - M_{c*(s)})$ $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_{s*} \cdot s$	$T_{j*(s)}$ – инерционна константа в о.е. ω_{s*} – синхронна ъглова скорост на въртене в о.е.
Определяне на напрежението на АДНСР за СН при самопускането.	$U_{1.05 \cdot U_{ном.}} = \frac{U_{мп}}{1 + x_T \cdot \frac{S_{н\sigma}}{S_{HI}}}$	S_{HT}, x_T – номинални стойности на пълната мощност и индуктивното съпротивление на СТ. $S_{н\sigma}$ – сумарна пускова мощност на СТ.
Изчисленията се правят само за товар с вентилаторен характер.	$M_{c*(s)} = M_{c0*(s)} (1 - s)^2$ $M_{c0k*(s)} = \frac{(k_{рам} \cdot P_{дв.k})}{S(s)}$	$M_{c*(s)}$ – съпротивителен момент в о.е.; $M_{c0k*(s)}$ – съпротивителен момент в края на установения режим за k-тия ЕД.
Изчисляване на хлъзгането s_t по време на спирането на ЕД. Изчисляване на инерционната константа на механизма $T_{jk*(s)}$; $s_{изх.}$ – работно хлъзгане в изходен режим.	$s_t = s_{изх.} + s_c = \frac{M_{c*(s)} \cdot (1 - s_{изх.})^2 \cdot t}{T_{j*(s)} + (1 - s_{изх.}) M_{c0*(s)} \cdot t}$ $T_{jk*(s)} = T_{jk} \cdot \frac{P_{дв.k}}{S(s)}$ $s_{изх.} = K_{нат.} \cdot s_{н.k.}$	
При малки стойности на s_t изразът може да се опрости.	$s = \frac{K_{нат.} \cdot t}{T_j + K_{нат.} \cdot t}$	$K_{нат.}$ – коефициент на натоварване.
Изчисляване на продължителността на самопускане $t_{сп}$	$t_{сп} = T_i \sum_{k=1}^n \frac{\Delta S_k}{M_{дин.k}}$	ΔS_k – стойност на хлъзгането до достигане на $S_{ном.}$; $M_{дин.k}$ – динамичен момент на k-тия ЕД
Изчисляване на фазата на остатъчното напрежение.	$\varphi = \varphi_{нач.} + \omega_s \cdot s_{изх.} \cdot t \cdot \varphi_c$ $\varphi = \varphi_{нач.} + \omega_s \cdot t + \frac{\omega_s T_{j*(s)}}{M_{c0*(s)}} \cdot \ln \left[1 + \frac{M_{c0*(s)} \cdot (1 - s_{изх.})}{T_{j*(s)}} \cdot t \right]$	$\varphi_{нач.}$ – стойност на фазата в началния момент; φ_c – стойност по време на спиране при обезточване.
Термични изчисления		

Прегряването на намотката на статора и ротора $\Delta\theta_c$ за времето на самопускането t_c и това прегряване се сравнява с допустимото.	$\Delta\theta_c = \frac{\Delta\theta_{опр.}(k_i-1).t_c}{T_{нагр.}}$	$\Delta\theta_{опр.}$ е превишаване на температурата на намотката над тази на окръжаващата среда; k_i – кратност на тока на самопускането.
$T_{нагр.}$ – времекопстанта на нагриването на намотката може да се определи от уравнението.	$T_{нагр.} = \frac{150\Delta\theta_{опр.}}{k_r j_n^2}$	k_r – коефициент на изместването на тока в намотката; j_n – номинална плътност на тока в намотката.

2.4.2. Статична и динамична устойчивост на АДНСР за СН

2.4.2.1. Статична устойчивост на АДНСР за СН

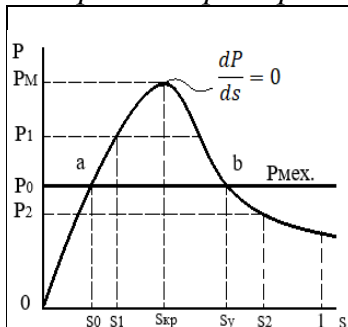
Свойствата на електрическите товари оказват непосредствено влияние върху устойчивостта на паралелната работа на ЕЕС. Очевидно товарите с положителен регулиращ ефект влияят благоприятно върху статичната устойчивост за разлика от тези с отрицателен ефект.

При определени режимни условия товарът сам може да се окаже неустойчив. Това се обуславя от поведението на двигателния товар и преди всичко на асинхронния.

С неустойчивостта на товарите се обясняват т.нар. *лавина на напрежението и лавина на честотата* в ЕЕС [31].

Основният вид нарушение на статичната устойчивост на ЕЕС е нарушението на устойчивостта на електродвигателния товар [54].

- *Първични критерии за оценка на статичната устойчивост*



Фиг. 2.41. Зависимост на електрическата и механична мощност от хлъзгането s

При анализа на зависимостта, показана на фиг. 2.41 на електрическата и механична мощност от хлъзгането се прави изводът, че установен режим в работата на АДНСР може да настъпи в точките на пресичане на характеристиките – а и б. Описанието на процесите и характерните точки е като на фиг. 2.41. Приемайки в о.е. $P = M$, хлъзгането на ротора ще се определя с уравнението

$$T_j \frac{ds}{dt} = P_{мех.} - P_{ем.} = P_0 - P$$

В разглеждания случай $P = P_1 > P_0$, при което на вала на ЕД ще възникне ускоряващ електромагнитен момент, под влиянието на който хлъзгането ще започне да намалява, а скоростта да се увеличава. В резултат на това се установява изходният режим в т. а. Друг изход има процесът при работа на АДНСР в т. б с хлъзгане s_y . При увеличаване на хлъзгането до s_2 , електрическата мощност P_2 , става по-малка от механичната P_0 , което обуславя по-нататъшен ръст на хлъзгането до пълното спиране на АДНСР.

Съхраняването на статичната устойчивост на АМ се осъществява не само в т. 'а' на фиг. 2.41, но и на целия възходящ участък от характеристиката на активната мощност, за който е валидно отношението $dP/ds > 0$. Следователно, критерий за статичната устойчивост се явява положителният знак на производната – формула (2.27).

$$\frac{dP}{ds} > 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{dP}{ds} - \frac{dP_{мех.}}{ds} > 0 \quad (2.28)$$

Следва да се отбележи, че в общия случай, т.е. когато $P_{мех.} \neq const$, критерият за устойчивост има вида (2.28). В повечето практически случаи

определянето на реалните механични характеристики е затруднено, поради което се приема $P_{\text{мех.}}=P_0=\text{const}$, следователно $dP_{\text{мех.}}/ds=0$ от фиг. 2.27 и се характеризират с максималната мощност P_M и критичното хлъзгане $S_{\text{кр.}}$.

При анализа на работата на АДНСР се установи, че има само една област на устойчива работа – област, лежаща между синхронната скорост и критичното хлъзгане.

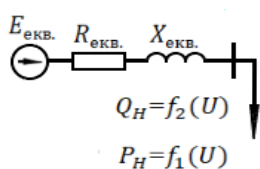
Нарушението на устойчивата работа може да се предизвика от увеличението на механичната мощност или от снижаване на напрежението. Напрежението, при което електромагнитната мощност, развивана от АДНСР, става равна на механичната мощност $P_{\text{мех.}}=P_0$, се нарича критично и се определя по (2.29). Нивото на статичната устойчивост на АДНСР, както и устойчивостта на електроснабдителните възли на електрическите товари, се определят с оценка на коефициента на запаса по напрежение по (2.30).

$$U_{\text{кр.}} = \sqrt{2P_0x_s} \quad (2.29)$$

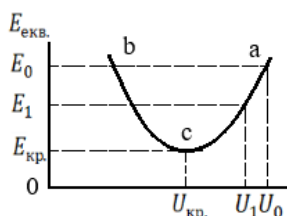
$$K_U = \frac{U_0 - U_{\text{кр.}}}{U_0} \quad (2.30)$$

$$\frac{dE}{dU} > 0 \quad (2.31)$$

$$E_{\text{екв.}} = \sqrt{\left(\frac{P_H R_{\text{екв.}} + Q_H X_{\text{екв.}}}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_H X_{\text{екв.}} - Q_H R_{\text{екв.}}}{U}\right)^2} \quad (2.32)$$



Фиг. 2.42 а). Заместваща схема на захранващата мрежа и генератора



Фиг. 2.42 б). характеристика на $E_{\text{екв.}}(U)$

За проверка на устойчивостта по критерия от формула (2.31) е необходимо да се начертае заместваща схема, показана на фиг. 2.42 а) и да се построи зависимостта $E_{\text{екв.}} = f(U)$. За тази схема еквивалентното е.д.н. се изчислява по формула (2.31), където $R_{\text{екв.}}$ и $X_{\text{екв.}}$ са еквивалентните съпротивления на захранващата мрежа и генератора. Началният режим се характеризира с е.д.н. E_0 , напрежението на товара U_0 , стойностите на активната и реактивната мощност P_0 и Q_0 . При промяна на напрежението до нова стойност U_1 по статичната характеристика могат да се определят P_1 и Q_1 . Извършвайки няколко такива изчисления, може да се построи характеристиката $E_{\text{екв.}}(U)$, показана на фиг. 2.42 б). При $E_{\text{екв.}}=E_0$ установените режими са възможни в т. 'а' ($dE/dU > 0$, следователно режимът е устойчив) и т. б ($dE/dU < 0$, режимът е неустойчив) Граничният режим има стойности на е.д.н. $E_{\text{кр.}}$ и на напрежението $U_{\text{кр.}}$ в т. 'с', където $dE/dU=0$.

Режимът $dE/dU < 0$ не може да бъде устойчив по условията на неговата физическа нереализируемост.

• *Вторични критерии за оценка на статичната устойчивост*

Един от тези критерии е знакът пред производната на е.д.н. на генератора в ЕЦ или еквивалентното е.д.н. на системата, захранваща комплексните товари (АДНСР за СН и др. консуматори, захранени от общи шини).

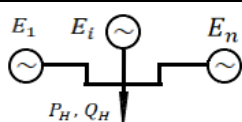
При изчисляване на устойчивостта на товара, получаващ захранване от няколко източника на електрическа мощност, е удобно да се използва практическият критерий, показан с (2.33) [71].

$$\frac{d\Delta Q}{dU} < 0 \quad (2.33)$$

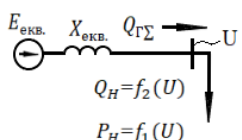
$$E_{\text{екв.}} = \sqrt{\left(\frac{E_{\text{екв.}} U}{X_{\text{екв.}}}\right)^2 - P_H^2 - \frac{U^2}{X_{\text{екв.}}}} \quad (2.34)$$

където: $\Delta Q = Q_{\text{ГΣ}} - Q_H$: небаланс на мощностите;

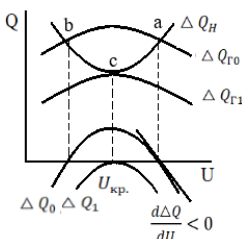
$Q_{Г\Sigma}$ – генерираната във възела сумарна реактивна мощност.



Фиг. 2.43 а). Генериращи източници.



Фиг. 2.43 б). Мощност, по-стъпваща от страната на генериращите източници към еквивалентния товар



Фиг. 2.43 в). Зависимост на генерираната реактивна мощност $Q_{Г\Sigma}$ и товара Q_H от напрежението U на товара

За оценка на устойчивостта по дадения критерий, е необходимо да се построи зависимостта на генерираната реактивна мощност $Q_{Г\Sigma}$ и товара Q_H от напрежението U на товара. Тази зависимост се представя с обикновена статична характеристика $Q_H = f(U)$, показана на фиг. 2.43 в). Характеристиката може да бъде построена с използване на серия от изчисления (необходимо е да се отбележи, че стойността на P_H , зависи от изменението на напрежението). Може да се отбележи, че $Q_{Г\Sigma}$ не е реактивната мощност на самите генератори. Това е мощността, постъпваща от страната на генериращите източници към еквивалентния товар. Това е показано на фиг. 2.43 б).

На фиг. 2.43 в) е показана графичната зависимост на $Q_{Г0} = f(U)$, съответстваща на е.д.н. E_0 , в началния момент. Построените графики $Q_{Г0}$ и Q_H имат две пресечни точки (т. 'а' и т. 'б'), характеризиращи възможните режими на работа при съответното е.д.н. E_0 . Точките а и б съвпадат с едноименните точки на мощностната характеристика. Точка 'а' съответства на по-високо напрежение, а следователно и по-малко хлъзгане, където $d\Delta Q/dU < 0$, се явява точка на устойчива работа. Точка б е в зоната на неустойчивата работа.

За определяне на критичните параметри във възела на товарите, напр. $U_{кр.}$, е необходимо да се изпълни постепенно стъпково утежняване на режима по различни параметри, напр.: увеличаване на мощността на товара, намаляване на е.д.н. на генериращия източник или увеличаване на реактивното съпротивление на захранващата мрежа.

Използването на критерия $d\Delta Q/dU < 0$ позволява нагледно и без големи разходи на средства и време да се направи практическа оценка на граничните стойности на влияещи положително или отрицателно на статичната устойчивост фактори, отнасящи се до двигателния товар и в частност на товари с АДНСР за СН [71].

2.4.2.2. Динамична устойчивост на АДНСР за СН

Под това понятие се разбира възможността за връщане на АДНСР за СН към нормалната си честота на въртене (или близка до нея) след резки смущения със стойности, близки до граничните в ЕСС на АД [54, 64, 71, 87, 89].

За изследване на динамичната устойчивост на АДНСР за СН при възникване на трифазно к.с. на въвода на ЕД е предложено да се използват приведените изчислителни криви, пример за които е даден в т. 2.3.1.

За изследване на динамичната устойчивост на АДНСР за СН при възникване на силни колебания на вала е разгледано приложението на съставяне на система диференциални уравнения при определени начални условия.

За изследване на динамичната устойчивост на АДНСР за СН при пускане и самопускане на мощни АСДНСР за СН е предложено използването на графоаналитичния метод и проверка за възможността за самопускане с опростения изчислителен метод, разгледан в т. 2.4.1. от настоящата дисертация.

Изводи към Глава втора:

1. Систематизирани са ПКЕЕ, които имат пряко влияние върху нормалната и дълговременна експлоатация на АДНСР за СН. Анализирано е конкретното им влияние върху работата на АДНСР за СН.
2. Направен е систематизиран анализ и класификация на видовете куплирани към АДНСР за СН механизми и техните характеристики, намерили най-широко приложение в системата на с.н. на ЕЦ като предприятия за производство на електрическа енергия.
3. Направен е задълбочен обзор върху видовете АВР, специфичната нужда от въвеждането му, както и съвременните изисквания към АВР в ЕЦ. Предложена е и схема и обосновка за въвеждане на БАВР.
4. Направен е обзор върху работата на съвременните цифрови устройства за релейна защита и автоматика, намерили приложение при АДНСР за СН. Определени са функционалните възможности на различните защиты, както и различното им въздействие върху защитавания обект.
5. Установена е липса на конкретна информация за избор и определяне на настройки на устройствата за РЗА, които да осигурят високо качество на преходния процес в различни работни условия.
6. Избран е метод за приблизително определяне на токовете на к.с. в ЕСС, който удовлетворява изискванията за точност при инженерни изчисления.
7. Изследван е процесът на самопускане на АДНСР за СН при различни механични характеристики на куплираните механизми в различни условия и е избран метод за опростено изчисление на самопускане.
8. Изследвани са аналитичните методи за определяне на статична и динамична устойчивост на АДНСР за СН с различно приложение в индустрията като основен работен орган за задвижване на различни по своите механични характеристики механизми.
9. Изследвано е влиянието на мястото на к.с. в ЕСС върху динамичната устойчивост на АДНСР за СН.
10. Направен е задълбочен литературен обзор върху проблемите на взаимното влияние между електроснабдяване и електрообзавеждане на АДНСР за СН в системата на ЕЦ.

Глава трета. ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНАТА СИСТЕМА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

3. 1. Общи сведения за математически модели на асинхронната машина

Индивидуалното ЕЗ образува с привеждания в движение механизъм единна електромеханична система. Затова като обект за изучаване ЕЗ представлява електромеханична система, електрическата част на която се състои от електромеханичен преобразувател на енергия и система за управление, а механичната обхваща всички свързани движещи се маси на ЕЗ и механизма. Главната особеност е разделянето на ЕД на две части – механична и електрическа.

При анализа се приема система от означения, в която принадлежността на променливата към една или друга намотка се определя с индексите, с които са означени осите, свързани с намотките на обобщената машина и с показване дали се отнасят към статора или към ротора. Най-често се използват следните индекси [39, 76]:

- s , когато се отнася за статора;

- r , когато се отнася за ротора;
- α, β , когато се отнася за координатна система, твърдо свързана с неподвижния статор;
- d, q , когато се отнася за координатна система, свързана с ротора;
- u, v , когато се отнася за координатна система, въртяща се с произволна скорост спрямо статора;
- x, y , когато се отнася за координатна система, въртяща се със синхронна скорост спрямо статора.

Динамиката на обобщената машина се описва с четири уравнения на електрическото равновесие във веригите на намотките и с уравнението на електромеханичното преобразуване на енергията, което изразява електромагнитния момент M като функция на електрическите и механичните координати на системата [22, 39].

Уравненията на *Kirchhoff*, изразени чрез пълните потоци Ψ , са:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + d\Psi_{s\alpha} / dt \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + d\Psi_{s\beta} / dt \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + d\Psi_{rd} / dt \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + d\Psi_{rq} / dt \end{cases} \quad (3.1)$$

където R_s и R_r са съответно активното съпротивление на една фаза на статора и приведеното активно съпротивление на една фаза на ротора на ЕМ.

В общ вид пълният магнитен поток на всяка намотка се определя от резултантното действие на токовете на всички намотки на ЕМ:

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha} = L_{s\alpha,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{s\alpha,s\beta} i_{s\beta} + L_{s\alpha,rd} i_{rd} + L_{s\alpha,rq} i_{rq} \\ \Psi_{s\beta} = L_{s\beta,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{s\beta,s\beta} i_{s\beta} + L_{s\beta,rd} i_{rd} + L_{s\beta,rq} i_{rq} \\ \Psi_{rd} = L_{rd,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{rd,s\beta} i_{s\beta} + L_{rd,rd} i_{rd} + L_{rd,rq} i_{rq} \\ \Psi_{rq} = L_{rq,s\alpha} i_{s\alpha} + L_{rq,s\beta} i_{s\beta} + L_{rq,rd} i_{rd} + L_{rq,rq} i_{rq} \end{cases} \quad (3.3)$$

В системата (3.3) за собствените и взаимните индуктивности на намотките е прието еднакво означение $L_{i,j}$ с долен индекс, чиято първа част $i = s\alpha, s\beta, rd, rq$ показва в коя намотка се индуцира е.д.н., а втората $j = s\alpha, s\beta, rd, rq$ – от тока на коя намотка то се създава. Например, $L_{s\alpha,s\alpha}$ е собствената индуктивност на фазата α на статора; $L_{s\beta,rd}$ – взаимната индуктивност между фазата β на статора и фазата d на ротора и т.н.

Приетите в системата (3.3) означения и индекси осигуряват еднотипност на всички уравнения, което позволява да се прибегне към удобна за по-нататъшно приложение обобщена формулировка на тази система:

$$\Psi_i = \sum_{j=s\alpha}^{rq} L_{i,j} i_j. \quad (3.4)$$

При работата на ЕМ взаимното положение на намотките на статора и ротора се изменя, затова собствените и взаимните индуктивности на намотките в общия случай са функции на електрическия ъгъл на завъртане на ротора $L_{i,j} = f(\varphi_{ел})$. За симетричната неявнополюсна ЕМ собствените индуктивности на намотките на статора и ротора не зависят от положението на ротора: $L_{s\alpha,s\alpha} = L_{s\beta,s\beta} = L_s = \text{const}$; L_{rd} ,

$rd = L_{rq}, rq = L_r = \text{const}$, а взаимните индуктивности между намотките на статора или ротора са равни на нула: $L_{s\alpha, s\beta} = L_{s\beta, s\alpha} = L_{rd, rq} = L_{rq, rd} = 0$, тъй като магнитните оси на тези намотки са изместени в пространството една спрямо друга на ъгъл $\varphi_{el} = 90^\circ$. Взаимните индуктивности на намотките на статора и ротора получават пълен цикъл на изменение при завъртане на ротора на ъгъл $\varphi_{el} = 2\pi$.

Диференциалното уравнение на електромеханичното преобразуване на енергията се получава чрез известната формула:

$$M = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_{i=s\alpha}^{rq} i_i \Psi_i = \frac{1}{2} \sum_{i=s\alpha}^{rq} i_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial \varphi}. \quad (3.5)$$

С помощта на (3.4) електромагнитният момент на машината (3.5) се изразява чрез токовете на намотките:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{i=s\alpha}^{rq} i_i \sum_{j=s\alpha}^{rq} \frac{\partial L_{i,j}}{\partial \varphi} i_j. \quad (3.6)$$

Уравненията на електрическото равновесие и уравнението на електромагнитния момент представляват математическо описание на динамичните процеси на преобразуването на енергията във въртящите ЕМ, написано в общ вид и изразено чрез действителните променливи на двуфазния модел. Тези уравнения заедно образуват система от пет уравнения, установяващи взаимната връзка между процесите в механичната и електрическата част на електромеханичната система.

Проявите на тази взаимна връзка е прието в теорията на ЕЗ да се наричат *електромеханична връзка* [36, 73].

За разясняване на същността на това понятие се използват уравненията на електрическото равновесие. Както е показано в [36, 73], индуктивностите $L_{i,j}$ зависят от електрическия ъгъл на завъртане на ротора φ_{el} , а следователно и от времето t . Затова, след диференциране, тези уравнения се представят във вида:

$$u_i = R_i i_i + \sum_{j=s\alpha}^{rq} L_{i,j} \frac{di_j}{dt} + \omega \sum_{j=s\alpha}^{rq} \frac{dL_{i,j}}{d\varphi} i_j, \quad (3.7)$$

където $\omega = d\varphi/dt$ е ъгловата скорост на ротора на ЕД.

Първият член на всяко от уравненията (3.7) е падът на напрежение, свързан с активното съпротивление на веригата на съответната намотка, вторият – резултантното е.д.н. на самоиндукцията и на взаимната индукция $e_{L,i}$, предизвикано от изменението на токовете в намотките, а третият член отразява взаимодействието между механичната и електрическата част на ЕЗ, тъй като представлява резултантното е.д.н. e_i , индуктирано в намотката в резултат на механичното движение на ротора на ЕД:

$$e_i = \omega \sum_{j=s\alpha}^{rq} \frac{dL_{i,j}}{d\varphi} i_j. \quad (3.8)$$

Уравненията на електрическото равновесие изразяват математическата връзка между функциите $i_i(t)$ и $\omega(t)$ в динамичните процеси на електромеханичното преобразуване на енергията. Следователно, тези уравнения представляват обобщено математическо описание на електромеханичните характеристики на ЕД във всички режими на работа. Наричат се *уравнения на електромеханичната характеристика на двигателя*.

Системата, съставена от уравненията на електромеханичната характеристика и на електромагнитния момент, установява математическа връзка между функциите $M(t)$ и $\omega(t)$ във всички режими на работа, т.е. се явява обобщено математическо

описание на механичните характеристики на ЕД. Тези уравнения се наричат *уравнения на механичната характеристика* [22, 39].

Уравненията (3.6) заедно с (3.7) образуват система уравнения на механичната характеристика на ЕД:

$$\begin{cases} u_i = R_i i_i + \sum_{j=s\alpha}^{rq} L_{i,j} \frac{di_j}{dt} + \omega \sum_{j=s\alpha}^{rq} \frac{dL_{i,j}}{d\varphi} i_j \\ M = \frac{1}{2} \sum_{i=s\alpha}^{rq} i_i \sum_{j=s\alpha}^{rq} \frac{\partial L_{i,j}}{\partial \varphi} i_j \end{cases} \quad (3.9)$$

Множеството от електромеханични и механични характеристики, определени от (3.9), в зависимост от режимите на работа на ЕЗ се разделя на *динамични и статични* характеристики. На всички динамични процеси съответстват динамичните електромеханични $i_i = f(\omega)$ и механични $M = f(\omega)$ характеристики, а на статични – статичните. Уравненията на статичните характеристики се получават от общите уравнения на динамиката (3.9) чрез заместване в тях на условията, съответстващи на статичните режими на работа.

3.2. Система относителни единици

При изследването на ЕМ се използват много често *относителни единици* вместо физическите величини. Да се работи в относителни единици означава величините, които участвуват, да се дават като части от някаква величина, която има същата размерност. Тя се нарича базисна. Ясно е, че относителните единици, в които се дават величините, са безразмерни. Величините, изразени в относителни единици, ще се означават със същата буква, както физическите величини.

Независимо от изброените недостатъци, предимствата, които се получават при използването на относителните единици, са толкова съществени, че в последно време те се използват широко. За да се премине от физическите величини към система относителни единици, е необходимо да се определи еднозначно система от базисни величини. В съвременната теория на преходните процеси голяма част от базисните величини са общоприети. При изследванията ще се използват общоприетите базисни величини, дадени в [13, 39, 50, 88, 133]. За изменение на мащаба на времето се използва относително време.

3.3. Аналитично описание на процесите при асинхронни машини средно напрежение

Принципно няма разлика при създаването на модел на АМ за НН или за СН.

Уравненията за напреженията на намотките на АМ са представени в координатна система "x, y", въртяща се със синхронната ъглова скорост на въртящото се магнитно поле. Използването на тази координатна система дава удобството, че в системата диференциални уравнения присъства важният параметър на АМ хлъзгането s.

Като се изразят изобразяващите вектори на пълните потоци чрез изобразяващите вектори на токовете за съставлящите на изобразяващите вектори на напреженията в координатна система "x, y" се получава:

$$\begin{aligned}
u_{sx} &= L_s \cdot \frac{di_{sx}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{rx}}{dt} - L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sy} - L_m \cdot \omega_s \cdot i_{ry} + r_s \cdot i_{sx}; \\
u_{sy} &= L_s \cdot \frac{di_{sy}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{ry}}{dt} + L_s \cdot \omega_s \cdot i_{sx} + L_m \cdot \omega_s \cdot i_{rx} + r_s \cdot i_{sy}; \\
u_{rx} &= L_m \cdot \frac{di_{sx}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{rx}}{dt} - s \cdot L_m \cdot \omega_s \cdot i_{sy} - s \cdot L_r \cdot \omega_s \cdot i_{ry} + r_r \cdot i_{rx}; \\
u_{ry} &= L_m \cdot \frac{di_{sy}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{ry}}{dt} - s \cdot L_m \cdot \omega_s \cdot i_{sx} - s \cdot L_r \cdot \omega_s \cdot i_{rx} + r_r \cdot i_{ry};
\end{aligned} \tag{3.10}$$

където:

$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_1$, rad/s - кръгова честота на захранващото напрежение, ъглова скорост на статорното магнитно поле. Приемаме $\omega_b = \omega_s$.

За да се представят уравненията от системата (3.10) в относителни единици, се дели лявата и дясната им страна на: $u_b = \omega_b \cdot \Psi_b = z_b \cdot i_b$, където $\Psi = \frac{u_b}{\omega_b} = L_b \cdot i_b$.

Получава се:

$$\begin{aligned}
\frac{u_{sx}}{u_b} &= \frac{L_s \cdot di_{sx}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{L_m \cdot di_{rx}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} - \frac{L_s \cdot i_{sy} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} - \frac{L_m \cdot i_{ry} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{r_s \cdot i_{sx}}{z_b \cdot i_b} \\
\frac{u_{sy}}{u_b} &= \frac{L_s \cdot di_{sy}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{L_m \cdot di_{ry}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{L_s \cdot i_{sx} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{L_m \cdot i_{rx} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{r_s \cdot i_{sy}}{z_b \cdot i_b} \\
\frac{u_{rx}}{u_b} &= \frac{L_m \cdot di_{sx}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{L_r \cdot di_{rx}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} - \frac{s \cdot L_m \cdot i_{sy} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} - \frac{s \cdot L_r \cdot i_{ry} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{r_r \cdot i_{rx}}{z_b \cdot i_b} \\
\frac{u_{ry}}{u_b} &= \frac{L_m \cdot di_{sy}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{L_r \cdot di_{ry}}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b \cdot dt} + \frac{s \cdot L_m \cdot i_{sx} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{s \cdot L_r \cdot i_{rx} \cdot \omega_s}{L_b \cdot i_b \cdot \omega_b} + \frac{r_r \cdot i_{ry}}{z_b \cdot i_b}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Всяка именована величина, отнесена към базисната си, преминава в система относителни единици:

$$\begin{aligned}
u_{sx}^* &= L_s^* \cdot \frac{di_{sx}^*}{d\tau} + L_m^* \cdot \frac{di_{rx}^*}{d\tau} - L_s^* \cdot i_{sy}^* - L_m^* \cdot i_{ry}^* + r_s^* \cdot i_{sx}^*; \\
u_{sy}^* &= L_s^* \cdot \frac{di_{sy}^*}{d\tau} + L_m^* \cdot \frac{di_{ry}^*}{d\tau} + L_s^* \cdot i_{sx}^* + L_m^* \cdot i_{rx}^* + r_s^* \cdot i_{sy}^* \\
u_{rx}^* &= L_m^* \cdot \frac{di_{sx}^*}{d\tau} + L_r^* \cdot \frac{di_{rx}^*}{d\tau} - s \cdot L_m^* \cdot i_{sy}^* - s \cdot L_r^* \cdot i_{ry}^* + r_r^* \cdot i_{rx}^*; \\
u_{ry}^* &= L_m^* \cdot \frac{di_{sy}^*}{d\tau} + L_r^* \cdot \frac{di_{ry}^*}{d\tau} + s \cdot L_m^* \cdot i_{sx}^* + s \cdot L_r^* \cdot i_{rx}^* + r_r^* \cdot i_{ry}^*.
\end{aligned} \tag{3.12}$$

След преобразуване и представяйки получените изрази във форма на *Cauchy*, с оглед удобството при решаването им, се получава:

$$\frac{di_{sx}^*}{d\tau} = \frac{L_r^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sx}^*}{L_m^*} - \frac{u_{rx}^*}{L_r^*} - \frac{r_s^*}{L_m^*} \cdot i_{sx}^* + \frac{r_r^*}{L_r^*} \cdot i_{rx}^* + i_{sy}^* \cdot \left(\frac{L_s^* \cdot L_r^* - s \cdot L_m^{*2}}{L_r^* \cdot L_m^*} \right) + (1-s) \cdot i_{ry}^* \right]; \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}\frac{di_{sy}^*}{d\tau} &= \frac{L_r^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sy}^*}{L_m^*} - \frac{u_{ry}^*}{L_r^*} - \frac{r_s^*}{L_m^*} i_{sy}^* + \frac{r_r^*}{L_r^*} i_{ry}^* + i_{sx}^* \left(\frac{s \cdot L_m^{*2} - L_s^* \cdot L_r^*}{L_r^* \cdot L_m^*} \right) - (1-s) i_{rx}^* \right] \\ \frac{di_{rx}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sx}^*}{L_s^*} + \frac{u_{rx}^*}{L_m^*} + \frac{r_s^*}{L_s^*} i_{sx}^* - \frac{r_r^*}{L_m^*} i_{rx}^* + i_{ry}^* \left(\frac{s \cdot L_s^* \cdot L_r^* - L_m^{*2}}{L_s^* \cdot L_m^*} \right) - (1-s) i_{sy}^* \right]; \\ \frac{di_{ry}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sy}^*}{L_s^*} + \frac{u_{ry}^*}{L_m^*} + \frac{r_s^*}{L_s^*} i_{sy}^* - \frac{r_r^*}{L_m^*} i_{ry}^* + i_{rx}^* \left(\frac{L_m^{*2} - s \cdot L_s^* \cdot L_r^*}{L_s^* \cdot L_m^*} \right) + (1-s) i_{sx}^* \right].\end{aligned}$$

За моментната стойност на електромагнитния момент на ЕД, при удовлетворяване на условията за инвариантност на мощността, се получава:

$$M^* = \frac{M}{M_N} = \frac{p L_b i_b^2 L_m^*}{M_N} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*) = \frac{p u_b i_b L_m^*}{M_N \omega_b} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*); \quad (3.14)$$

Фазовите статорни напрежения в система относителни единици имат вида:

$$\begin{aligned}u_A^* &= k_V \cos(\tau + \varphi_0); \\ u_B^* &= k_V \cos\left(\tau + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_C^* &= k_V \cos\left(\tau + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right),\end{aligned} \quad (3.15)$$

където:

- с $k_V = \frac{U}{U_N}$ се отчита изменението на напрежението, т.е. това е кратност на напрежението спрямо номиналната стойност;
- φ_0 – начална фаза на захранващото напрежение.

Изискванията на инженерната точност при изследване на динамиката на широко прилагани механизми (напр. центробежни ПА) напълно могат да се удовлетворят с използване на едномасов динамичен модел.

Пълната система диференциални уравнения, представляваща математически модел на електромеханичната система на задвижван ПА с АД, след преобразуване на уравненията и представяйки получените изрази във форма на *Cauchy*, с оглед удобството при решаването им, е:

$$\begin{aligned}\frac{di_{sx}^*}{d\tau} &= \frac{L_r^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sx}^*}{L_m^*} - \frac{u_{rx}^*}{L_r^*} - \frac{r_1^*}{L_m^*} i_{sx}^* + \frac{r_2^*}{L_r^*} i_{rx}^* + i_{sy}^* \left(\frac{L_s^* \cdot L_r^* - s \cdot L_m^{*2}}{L_r^* \cdot L_m^*} \right) + (1-s) i_{ry}^* \right] \\ \frac{di_{sy}^*}{d\tau} &= \frac{L_r^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[\frac{u_{sy}^*}{L_m^*} - \frac{u_{ry}^*}{L_r^*} - \frac{r_1^*}{L_m^*} i_{sy}^* + \frac{r_2^*}{L_r^*} i_{ry}^* + i_{sx}^* \left(\frac{s \cdot L_m^{*2} - L_s^* \cdot L_r^*}{L_r^* \cdot L_m^*} \right) - (1-s) i_{rx}^* \right] \\ \frac{di_{rx}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sx}^*}{L_s^*} + \frac{u_{rx}^*}{L_m^*} + \frac{r_1^*}{L_s^*} i_{sx}^* - \frac{r_2^*}{L_m^*} i_{rx}^* + i_{ry}^* \left(\frac{s \cdot L_s^* \cdot L_r^* - L_m^{*2}}{L_s^* \cdot L_m^*} \right) - (1-s) i_{sy}^* \right] \\ \frac{di_{ry}^*}{d\tau} &= \frac{L_s^* \cdot L_m^*}{L_e^*} \left[-\frac{u_{sy}^*}{L_s^*} + \frac{u_{ry}^*}{L_m^*} + \frac{r_1^*}{L_s^*} i_{sy}^* - \frac{r_2^*}{L_m^*} i_{ry}^* + i_{rx}^* \left(\frac{L_m^{*2} - s \cdot L_s^* \cdot L_r^*}{L_s^* \cdot L_m^*} \right) + (1-s) i_{sx}^* \right] \\ \frac{ds}{d\tau} &= -\frac{p T_b}{I_{TOT} \omega_b^2} \left[\frac{p u_b i_b L_m^*}{T_b \omega_b} (i_{sy}^* i_{rx}^* - i_{sx}^* i_{ry}^*) - T_{LINIT}^* - (T_{LN}^* - T_{LINIT}^*) (1-s)^2 \right]\end{aligned} \quad (3.19)$$

При изследванията интервалите на изменение на параметрите са избрани по-широки, отколкото реално могат да бъдат постигнати при проектирането им – този подход има смисъл за получаване на общи закономерности, валидни не само за конкретния механизъм.

3. 4. Компютърен метод за решаване на аналитичния модел

За решаване на системата диференциални уравнения (3.19) се използва софтуер MathCad® на Parametric Technology Corporation (PTC®) и по-конкретно заложеният в него функционален метод *Rkadapt* – метод за решаване на диференциални уравнения с адаптивен размер на апроксимиращата стъпка [39, 67].

Методът на *Runge-Kutta* е основен при решаване на единични диференциални уравнения и на системи диференциални уравнения. Единственият проблем в приложението му е възможната неустойчивост на решението при неудачен избор на стъпката.

Форматът на функцията за споменатия метод е:

$Rkadapt(y, x_1, x_2, npoints, D)$,

y - вектор на началните условия;

x_1, x_2 - точки, определящи границите на интервала, в който ще се търси решение на диференциалните уравнения. Началните условия посочени в y се отнасят за точка x_1 ;

$npoints$ - брой точки в зададения интервал, в който ще се извършва апроксимация;

D - вектор на дясната част на системата диференциални уравнения, съдържащ първи производни на неизвестните променливи /функции/.

Решаването на система от обикновени диференциални уравнения във форма на *Cauchy* може да се извърши аналогично на решаването на единично диференциално уравнение, но е необходимо да се премине към векторна форма на записване на уравненията и началните условия. Това обстоятелство, а също така самата постройка на използвания компютърен метод налага въвеждане на някои символни полагания.

3. 5. Резултати от изследванията на преходните процеси

Електрическата енергия представлява една трета от цялата консумирана енергия в целия свят. Понастоящем растящите цени на енергията принуждават индустрията и потребителите да преосмислят ситуацията. Следователно, бъдещето принадлежи на решения с ниско потребление на енергия в сектора на индустрията. Затова предизвикателството сега е да се разработи широк спектър от енергийно ефективни решения [147].

Изискванията на потребителите обаче са ограничени от получената механична мощност върху вала на машините. Това е наложило създаването на ЕД с по-голяма мощност и съответно високо захранващо напрежение, т.е. повече от 1000 V, които се наричат „високоволтови“ и се захранват директно към СН без или с допълнителни устройства за стартиране/управление. В различни индустрии съществуват множество механизми с конкретни групи мощни и свръхмощни устройства. За мощни ЕЗ се считат такива с мощност от няколко до няколко хиляди kW.

АД до няколко хиляди kW понякога са с пряко пускане, т.е. те се пускат чрез директното им свързване към захранващата линия [132]. Съществува разнообразие на начините за присъединяване на мощни ЕЗ, което е продиктувано най-вече от основните недостатъци на АД, а именно голям пусков ток и малък начален въртящ момент. При високоволтовите ЕД това е от изключителна важност, поради голямата

маса на ротора и по-дългото време за осъществяване на пусковия процес. Това означава, че ЕМ по-дълго време се намира в режим, близък до режима на късо съединение, което от своя страна поставя специални изисквания към изолацията на статорната и роторната намотка и типа на охлаждане. В изследването на подобен клас ЕМ от голямо значение са параметрите – кратност на пусковия момент и кратност на пусковия ток.

За да се получи по-ясна картина за работата на АД за СН е необходимо да се изучават възникващите механични и електрически явления в динамичното им поведение. Важни характеристики на АД са пусковият момент, максималният момент и механичната характеристика [148].

През време на преходните процеси може да се получат големи стойности на моментите. При това максималната стойност на момента може да надминава многократно номиналния момент. Този максимален момент действа като удар върху ЕМ и върху нейния вал, т.е. върху цялата кинематична схема на ЕЗ, поставяйки под въпрос надеждната му работа – отгук идва наименованието *ударен момент*.

При изследванията се използват параметрите на Т-образна заместваща схема на ЕД, които са определени по изчислителна методика на фирмата-производител за хлъзгане $s=1$. Параметри на заместващата схема се явяват активните и индуктивните съпротивления за една фаза на ЕД.

Точността на решението на уравненията за електромеханичното преобразуване на енергията зависи не само от това, как са съставени уравненията, но и от определянето на параметрите, участващи в тези уравнения. Както показват редица изследвания [39], процесите при пускане се определят от началните стойности на параметрите при хлъзгане $s=1$. Характерът на нелинейно изменение на параметрите в процеса на развъртане има второстепенно значение.

Пето уравнение в системата уравнения (3.19) се явява фундаменталната връзка между моментите, т.нар. *уравнение на движението* [106]. В него участват моментът, развиван от ЕД и съпротивителният момент на ПА. Механичните характеристиките на ПА често се представят, като се приеме, че необходимият въртящ момент е пропорционален на квадрата на ъгловата скорост, което води до термина „квадратичен закон“ [117].

Сумарният инерционен момент на електрозадвижването I_{TOT} се задава чрез т.нар. *коэффициент на инерция (factor of inertia) FI*:

$$I_{TOT} = FI \times I_r \quad (3.21)$$

където I_r – инерционен момент на ротора [kgm^2].

Електрическият двигател, обект на моделни изследвания в [A1], е АД с двойнокафезен ротор, произведен от ИНВ Electric JSC, Bulgaria.

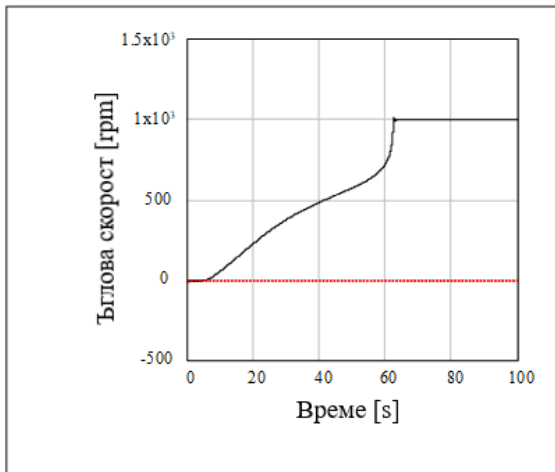
С помощта на разработения математически модел на електромеханичната система са изследвани електромеханичните преходни процеси при пускане в ход в ЕЗ на ПА. За задвижване се използва АД тип АО 710 L-66.

Резултатите от изследванията за влиянието на стойността на захранващото напрежение, което е отчетено с различни стойности на коефициента K_V при начална фаза на захранващото напрежение $\varphi_0=0$, върху ударните моменти и токове и времето за пускане са систематизирани в Табл. 3.1.

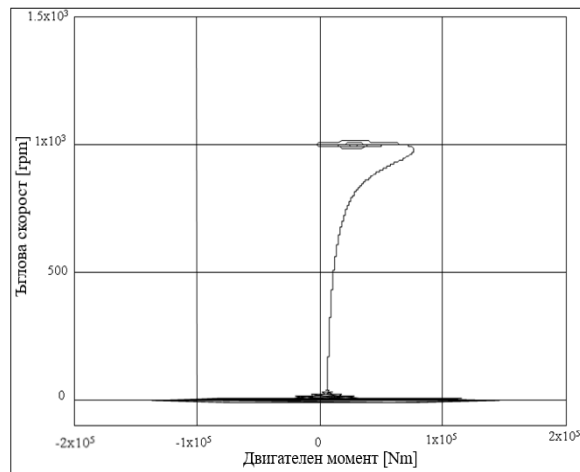
Табл. 3.1. Влияние на кратността на захранващото напрежение

K_V	FI	T_{imp}^*	i_{imp}^*	t_{st}, S
1.00	1.5	5.877	7.446	21
	2.5	5.904	7.420	29
	3.5	5.861	7.314	38
	4.5	5.836	7.307	47
	5.5	5.829	7.293	56
0.95	1.5	5.332	6.945	31
	2.5	5.333	6.927	47
	3.5	5.298	6.914	64
	4.5	5.279	6.912	79
	5.5	5.115	6.905	98
0.916	1.5	5.010	6.731	138
0.917	2.5	5.090	6.719	174
0.920	3.5	5.118	6.709	162
0.924	4.5	5.141	6.734	158

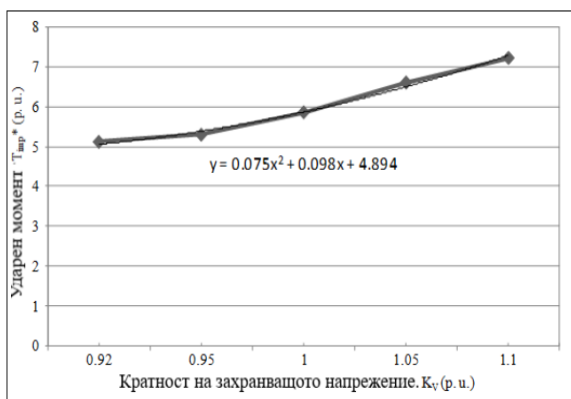
K_V	FI	T_{imp}^*	i_{imp}^*	t_{st}, S
0.929	5.5	5.178	6.766	155
1.05	1.5	6.521	7.853	16
	2.5	6.566	7.813	23
	3.5	6.608	7.787	30
	4.5	6.593	7.766	36
	5.5	6.566	7.742	43
1.10	1.5	7.143	8.270	13
	2.5	7.167	8.237	19
	3.5	7.226	8.214	24
	4.5	6.855	8.124	29
	5.5	6.896	8.180	34



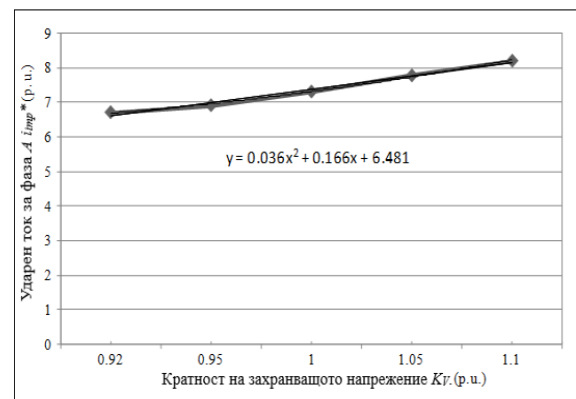
Фиг. 3.1. Скоростна характеристика за $K_V=0.95$ и $FI=3.5$.



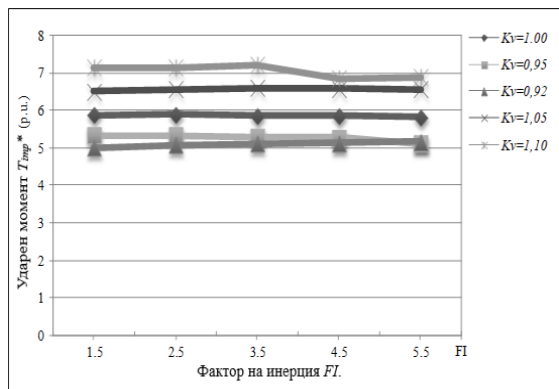
Фиг. 3.2. Механична характеристика за $K_V=0.95$ и $FI=3.5$.



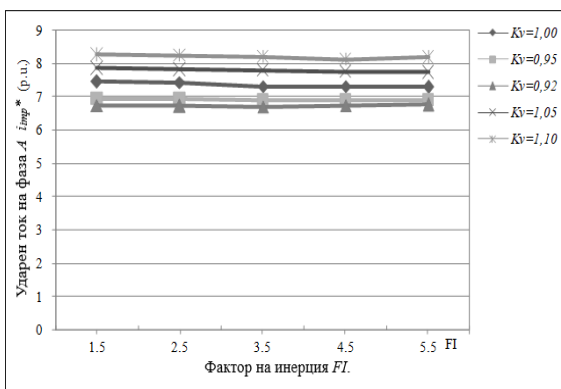
Фиг. 3.3. Ударен момент T_{imp}^* спрямо кратността на захранващото напрежение K_V .



Фиг. 3.4. Ударен ток за фаза А i_{imp}^* спрямо кратността на захранващото напрежение K_V .



Фиг. 3.5. Ударен момент T_{imp}^* спрямо фактора на инерция FI .



Фиг. 3.6. Ударен ток на фаза А i_{imp}^* спрямо фактора на инерция FI .

В резултат на проведените симулационни изследвания е оценено влиянието на стойността на захранващото напрежение и сумарния инерционен момент върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане на мощно ЕЗ за ПА.

Изменението на сумарния инерционен момент I_{TOT} оказва съществено влияние не само върху продължителността на преходните процеси, но и на характера на тяхното протичане. С увеличаване на FI броят на значителните по големина колебания на преходния електромагнитен момент в началото на преходния процес се увеличават, а колебанията на скоростта и на електромагнитния момент в зоната на синхронната ъглова скорост намаляват. При намаляване на FI броят на колебанията на електромагнитния момент в началото на преходния процес намалява, но рязко се увеличават колебанията на скоростта и на момента на ЕД в зоната на синхронната ъглова скорост, достигайки до твърде значителни амплитуди при относително малки стойности за I_{TOT} . При увеличаване на FI i_{imp}^* почти не се изменя, докато T_{imp}^* и времето за пускане t_{st} нарастват.

Като цялостна оценка на влиянието на стойността на захранващото напрежение върху характеристиките на АД може да се обобщи, че както увеличаването, така и намаляването по отношение на номиналната стойност се отразяват неблагоприятно.

Зависимостите на момента от захранващото напрежение имат също така голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АД за СН.

Публикация [A2] третира загубите на енергия при работата на ЕЗ за СН на ПА от гледна точка на енергийна ефективност. Акцентува се върху съвместната работа на производствения механизъм и задвижващия ЕД, като се изследва цялостната електромеханична система.

Трябва да се уточни, че различните проектантски групи и различните автори имат различни начини за получаване на загубите в АД, които са доказали задоволително в своите работи [129].

Уравнението на баланса на активната мощност може да се запише така [118, 132, 153]:

$$P_1 = \Delta P_{e1} + \Delta P_{M1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{MEX} + \Delta P_{don.} + P_2, \quad (3.22)$$

$$\text{където: } P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 - \text{консумирана електрическа мощност;} \quad (3.23)$$

$$\Delta P_{e1} = m_1 I_1^2 r_1 - \text{електрически загуби на мощност, свързани с нагриването на намотките на статора при протичането на ток по тях;} \quad (3.24)$$

$\Delta P_{M1} = U_1^2 f^{1.3}$ – магнитни загуби на мощност, свързани с пренамагнитване на стоманата на сърцевината на статора (хистерезисни загуби) и неговото нагриване от вихрови токове; (3.25)

$\Delta P_{\text{доп.}}$ – допълнителни, трудно отчитащи се загуби на мощност от вихрови токове, обусловени от магнитните полета на разсейване, от пулсациите на магнитния поток, от наличието на висши хармоници и др. подобни (допълнителните загуби се приемат $\Delta P_{\text{доп.}} \approx 0,005 P_{1\text{НОМ}}$);

P_2 – механична мощност на вала на двигателя.

Електрическите загуби в ротора са правопрпорционални на хлъзгането [6]:

$$\Delta P_{e2} = s P_{EM}, \quad (3.27)$$

където P_{EM} – електромагнитна мощност на ЕД:

$$P_{EM} = P_1 - (\Delta P_{M1} + \Delta P_{e1}). \quad (3.28)$$

Що се касае до магнитните ΔP_{M1} и механичните ΔP_{MEX} загуби на мощност, то те практически не зависят от натоварването [6]. Сумата от тези загуби е приблизително постоянна [3].

Механичните загуби на мощност за ЕД с външно обдухване (с външен диаметър на статора $0,1 \leq D_a \leq 0,5$ m) са [46]:

$$\Delta P_{MEX} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_a^4; \quad (3.29)$$

$$n = n_s (1 - s) \text{ – честота на въртене на ЕД;} \quad (3.30)$$

$$K_T = 1 \text{ за ЕД с } 2p=2 \text{ и } K_T = 1,3(1 - D_a) \text{ при } 2p \geq 4;$$

D_a – външен диаметър на статора.

Трябва да се отбележи, че с увеличаването на натоварването полезната мощност нараства пропорционално на тока, а електрическите загуби растат пропорционално на квадрата на тока. К.п.д. е максимален, когато постоянно Приблизително може да се счита, че механичните загуби са пропорционални на загуби са равни на променливите (това са магнитни и механични загуби). квадрата на честотата на въртене. Променливите електрически загуби са загуби, пропорционални на квадрата на тока. При проектирането на ЕМ целта е да се постигне максимален к.п.д. при 60-80% от номиналното натоварване, тъй като ЕМ обикновено работят с недонатоварване 15-25%. За да се премести максималният к.п.д. в областта на номиналния товар или в областта на претоварване, трябва да се увеличи напречното сечение на намотките и да се намалят електрическите загуби в ЕД.

Определянето на компонентите на загубите е представено по-долу [122].

Приетата енергия от мрежата при пусков режим е:

$$W_{ST} = \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{a_k}) t_n] + \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{b_k}) t_n] + \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(P_{c_k}) t_n] \quad (3.31)$$

където:

- a_{n-1} – номер на точка от времевата ос, до която трае преходният процес.
- P_{a_k} , P_{b_k} , P_{c_k} – мощности, консумирани съответно от фаза А, фаза В и фаза С.

Приетата енергия от мрежата при установен режим е:

$$W_{SS} = \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [(P_{a_k} + P_{b_k} + P_{c_k})] [(n-1)\delta t - t_n] \quad (3.32)$$

където:

- δt – дискрета на времевата ос в секунди;
- t_n – времетраене на преходния процес, в s.

Загубите на енергия в челните съединения в пусков режим са:

$$W_{1ST} = 0.5r_1 \sum_{k=0}^{a_{n-1}} [(I_{a_k})^2 + (I_{b_k})^2 + (I_{c_k})^2] \delta t \quad (3.33)$$

където:

- r_s – активно съпротивление на 1 фаза на статорната намотка;
- I_a, I_b, I_c – фазови статорни токове.

Загубите на енергия в челните съединения в установен режим са:

$$W_{1SS} = 0.5r_s \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [(I_{a_k})^2 + (I_{b_k})^2 + (I_{c_k})^2] \delta t \quad (3.34)$$

Енергия на движещите се маси и полезна работа в пусков режим:

$$W_{MMST} = 0.5J\omega_b^2 + M_C\omega_b t_{a_{n-1}}, \quad (3.35)$$

където:

- J е сумарен инерционен момент на електрозадвижването;
- ω_b – номинална кръгова честота;
- M_C – съпротивителен момент, Nm

Енергия на движещите се маси и полезна работа в установен режим:

$$W_{MMSS} = \sum_{k=a_{n-1}}^{n-1} [M_k \omega_k \delta t] \quad (3.36)$$

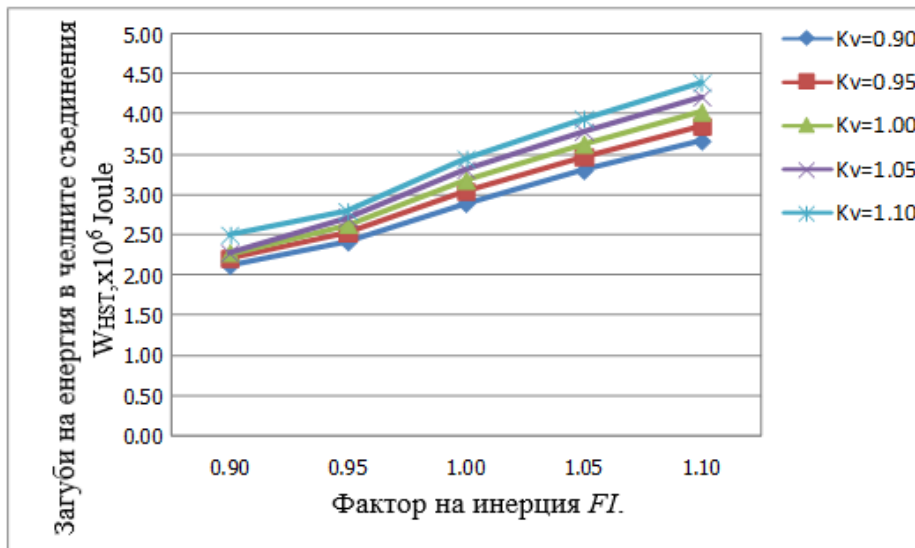
Отделена топлина в ЕД при пускане:

$$W_{HST} = W_{ST} - W_{MMST} \quad (3.37)$$

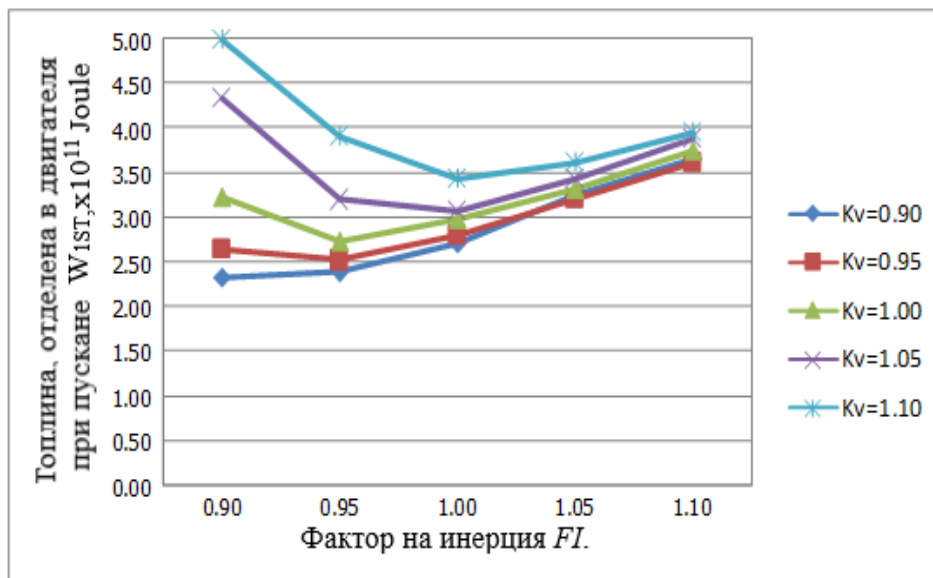
Отделена топлина в ЕД в установен режим:

$$W_{HSS} = W_{SS} - W_{MMSS} \quad (3.38)$$

Някои от получените резултати са представени числено в Таблица 3.2 и графично на фиг. 3.7 и фиг. 3.8.



Фиг. 3.7. Загуби на енергия в челните съединения W_{1ST} при пускане спрямо коефициента на инерция FI при различно захранващо напрежение



Фиг. 3.8. Топлина, отделена в двигателя W_{HST} при пускане спрямо коефициента на инерция FI при различно захранващо напрежение

Разработеният математичен модел спомага за изследване на преходните процеси при пускане и при установен режим на механизма на ПА с високоволтов ЕД и по-конкретно определяне на компонентите на загубите на енергия.

В резултат на симулационните изследвания е оценено влиянието на захранващото напрежение и общия инерционен момент на ЕЗ върху времето за стартиране и компонентите на енергийните загуби на мощен ЕД за ПА.

Промяната на общия инерционен момент има значително влияние не само върху продължителността на преходните процеси, но и върху загубите на енергия. При неизменно захранващо напрежение с увеличаване на FI времето за стартиране намалява, а загубите на енергия в челните съединения и топлината, отделена в ЕД, се увеличават. Като оптимална стойност за този ЕД се оказва, че общият инерционен момент трябва да бъде с $FI = 3.5$.

Табл. 3.2. Влияние на кратността на захранващото напрежение K_V и коефициента на инерция FI

K_V	FI	t_{ST} , s	W_{ST} , $\times 10^{11}$ Joule	W_{SS} , $\times 10^{11}$ Joule	W_{IST} , $\times 10^6$ Joule	W_{ISS} , $\times 10^5$ Joule	W_{MMST} , $\times 10^7$ Joule	W_{MMSS} , $\times 10^7$ Joule	W_{HST} , $\times 10^{11}$ Joule	W_{HSS} , $\times 10^{11}$ Joule
0.90	2.0	3.764	2.325	3.915	2.114	0.814	5.958	9.669	2.324	3.914
	2.5	3.486	2.377	4.112	2.408	0.834	6.396	9.909	2.376	4.111
	3.5	3.396	2.710	4.176	2.888	0.840	7.676	9.986	2.709	4.175
	4.5	3.576	3.234	4.048	3.298	0.827	9.189	9.831	3.233	4.047
	5.5	3.664	3.654	3.986	3.665	0.821	10.620	9.756	3.653	3.985
0.95	2.0	4.011	2.632	4.172	2.194	0.880	6.170	9.458	2.632	4.171
	2.5	3.494	2.510	4.574	2.514	0.921	6.403	9.904	2.509	4.573
	3.5	3.323	2.790	4.710	3.028	0.935	7.613	10.050	2.790	4.709
	4.5	3.384	3.208	4.662	3.459	0.930	9.023	9.999	3.207	4.661
	5.5	3.459	3.615	4.602	3.844	0.924	10.440	9.935	3.614	4.601
1.00	2.0	4.573	3.217	4.160	2.254	0.919	6.655	8.976	3.216	4.159
	2.5	3.592	2.719	4.980	2.613	1.006	6.488	9.821	2.719	4.979
	3.5	3.366	2.980	5.179	3.166	1.026	7.650	10.020	2.979	5.178
	4.5	3.330	3.317	5.212	3.621	1.029	8.976	10.050	3.316	5.211
	5.5	3.412	3.750	5.138	4.025	1.022	10.040	9.977	3.749	5.137
1.05	2.0	5.656	4.333	3.683	2.272	0.904	7.588	8.045	4.332	3.682
	2.5	3.957	3.188	5.144	2.706	1.069	6.802	9.508	3.188	5.143
	3.5	3.307	3.065	5.767	3.300	1.131	7.600	10.070	3.064	5.766
	4.5	3.282	3.428	5.792	3.782	1.134	8.935	10.090	3.427	5.791
	5.5	3.369	3.884	5.706	4.205	1.125	10.370	10.020	3.882	5.705
1.10	2.0	5.869	4.991	3.859	2.494	0.966	8.043	7.861	4.990	3.858
	2.5	4.518	3.896	5.086	2.782	1.109	7.285	9.024	3.896	5.085
	3.5	3.503	3.429	6.118	3.432	1.216	7.768	9.897	3.428	6.117
	4.5	3.299	3.615	6.337	3.941	1.238	8.950	10.070	3.614	6.336
	5.5	3.279	3.948	6.360	4.385	1.240	10.290	10.090	3.947	6.539

* t_{ST} е времето за пускане в [s].

Зависимостите на загубите на енергия от захранващото напрежение имат също така голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АД за СН.

Като цялостна оценка на влиянието на стойността на захранващото напрежение върху характеристиките на АД може да се обобщи, че както увеличаването, така и намаляването по отношение на номиналната стойност се отразяват неблагоприятно.

В Таблица 3.4 са представени числени резултати от изследване на влиянието на захранващото напрежение и коефициента на инерция FI върху възникващите ударни моменти и токове. Времето на преходния процес се определя с критерия, че две съседни стойности на честотата на въртене не се различават с повече от 1%. Това означава, че електромеханичните преходни процеси са завършени, а е известно, че електромагнитните преходни процеси приключват много преди това.

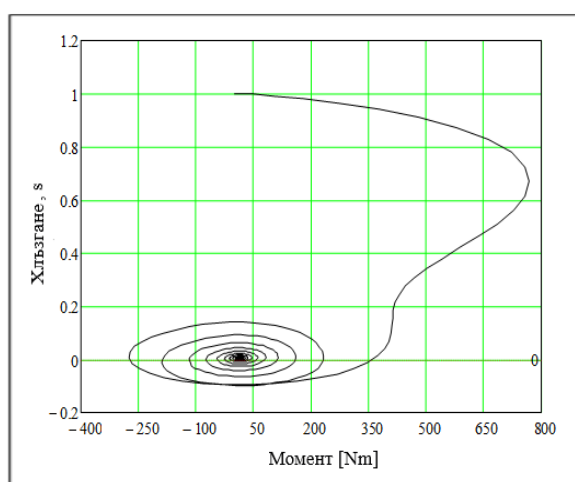
Характеристиките на въртящия момент и скоростта са изобразени графично съответно на фиг. 3.11 и фиг. 3.12.

Останалите фигури представят: фиг. 3.13: Време за пускане спрямо коефициента на инерция FI ; фиг. 3.14: Електрически загуби на мощност спрямо кратността на захранващото напрежение; фиг. 3.15: Енергийни загуби спрямо коефициента на инерция.

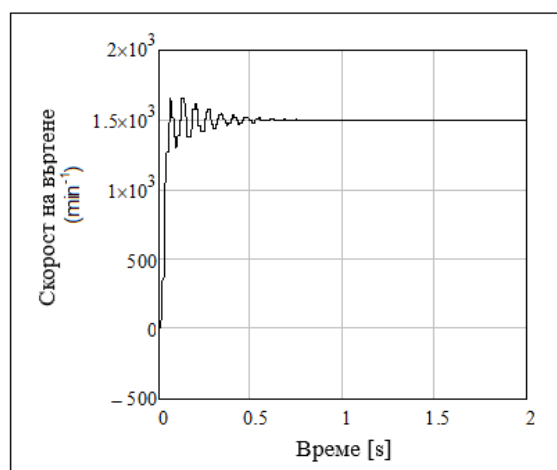
Табл. 3.4. Влияние на кратността на захранващото напрежение

K_V	FI	T_{imp}, Nm	i_{imp}^*	t_{st}, S
1.00	1.5	140.323	9.018	1.639
	2.5	351.763	10.968	2.925
	3.5	433.496	12.058	1.979
	4.5	311.204	12.732	1.322
	5.5	138.054	13.187	0.938
0.95	1.5	143.359	8.954	1.530
	2.5	355.702	10.758	2.089
	3.5	364.377	11.732	1.314
	4.5	184.413	12.326	0.818
	5.5	114.574	12.724	0.618
0.90	1.5	158.522	8.868	2.562
	2.5	341.406	10.512	2.559
	3.5	273.571	11.372	1.518
	4.5	106.383	11.89	0.946
	5.5	116.830	12.234	0.745

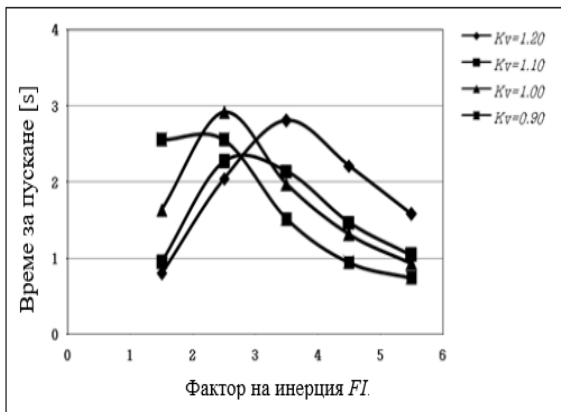
K_V	FI	T_{imp}, Nm	i_{imp}^*	t_{st}, S
1.05	1.5	148.083	9.067	1.154
	2.5	334.546	11.144	2.529
	3.5	479.547	12.349	1.965
	4.5	423.592	13.107	1.266
	5.5	230.236	13.622	0.892
1.10	1.5	165.331	9.107	0.952
	2.5	309.766	11.289	2.274
	3.5	503.066	12.608	2.143
	4.5	515.843	13.451	1.471
	5.5	372.007	14.029	1.046
1.15	1.5	187.562	9.148	0.994
	2.5	283.263	11.406	2.572
	3.5	507.662	12.835	2.960
	4.5	585.578	13.765	2.097
	5.5	499.731	14.409	1.508
1.20	1.5	212.195	9.194	0.803
	2.5	259.89	11.500	2.049
	3.5	497.964	13.032	2.815
	4.5	632.266	14.049	2.217
	5.5	607.646	14.760	1.583



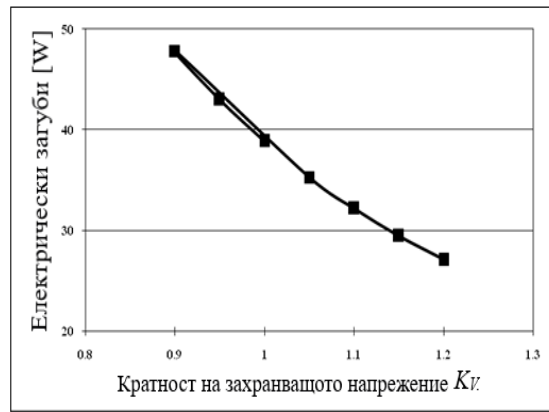
Фиг. 3.11. Динамична механична характеристика за $K_V=0.90$ и $FI=3.5$.



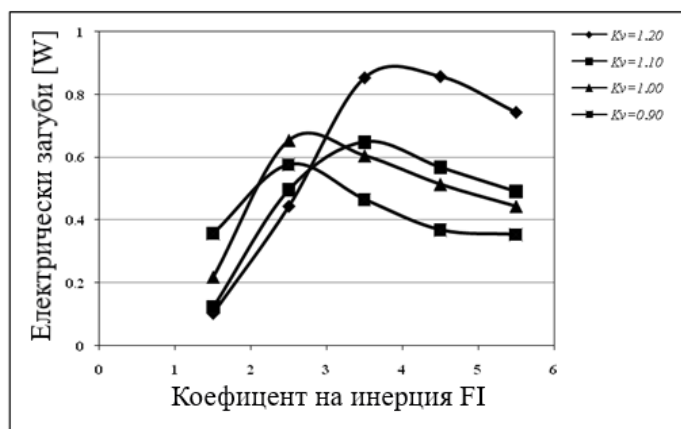
Фиг. 3.12. Скоростна характеристика за $K_V=0.90$ и $FI=3.5$.



Фиг. 3.13. Време за пускане спрямо коефициента на инерция FI .



Фиг. 3.14. Електрически загуби на мощност спрямо кратността на захранващото напрежение.



Фиг. 3.15. Енергийни загуби спрямо коефициента на инерция FI .

Резултати от симулационните проучвания са влиянията на захранващото напрежение и общия инерционен момент на ЕЗ върху възникващите ударни моменти и токове и загубите на ЕЕ на ЕЗ на ПА. Електрическите загуби в намотките на статора и токът на статора се увеличават при значително натоварване и намаляват при ниско натоварване на ЕД. Количеството електрически загуби в статора и ротора по отношение на номиналната мощност е до 1.6%. Получените резултати биха могли да имат голямо практическо значение, когато се обмисля начин на стартиране и по възможност контролиране на скоростта на АД.

Изводи към Глава трета:

Проведените в Глава 3 изследвания позволяват да се направят следните обобщения:

1. Разработен е математически модел на електромеханичната система на мощно ЕЗ за ПА с АД за СН;
2. Направен е избор на параметрите на електромеханичната система и границите на тяхното изменение при изследванията;
3. Избран е компютърен метод за решаване на математическия модел;
4. Оценено е влиянието на параметрите на заместващата схема на АД върху величините на преходните процеси;
5. Изследвано е влиянието на стойността на захранващото напрежение и сумарния инерционен момент на ЕЗ върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане; зависимостите на момента от захранващото напрежение

- имат също така голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АД за СН;
6. В резултат на симулационни изследвания е изследвано съчетаното влияние на стойността на захранващото напрежение и общия инерционен момент на ЕЗ върху времето за стартиране и компонентите на енергийните загуби на мощен ЕД за ПА при пускане и при установен режим; зависимостите на загубите на енергия от захранващото напрежение имат голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АД за СН;
 7. Изследвано е комбинираното въздействие на началния съпротивителен момент и общия инерционен момент върху работата на ЕЗ на ПА с АД за СН;
 8. Оценено е влиянието на отклонението на напрежението върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане при работата на енергийно-ефективен АД като част от ЕЗ;
 9. В резултат на симулационни изследвания е изследвано съчетаното влияние на стойността на захранващото напрежение и честотата, едновременно изменяни по определен закон, върху загубите на ЕЕ за различни стойности на началния съпротивителен момент в мощен електрически задвижващ ПА, управляван с помощта на честотен преобразувател; това е в пряка връзка със съвременните високи изисквания както по отношение на границите и плавността на регулиране, така и за неговата икономичност.
 10. Определен е оптимален коефициент на натоварване на АД за СН, явяващ се главен компонент от ЕЗ на ПА, чрез икономическия еквивалент на реактивната мощност;
 11. Засегнати са проблемите в работата поради наличието на нелинейни товари, причиняващи изкривявания в синусоидите на напреженията и токовете, като са проведени измервания с цифрова процесорна техника; експерименталните резултати обхващат множество измервания на хармонични компоненти на напрежения и токове и изчислени стойности на общите коефициенти на хармоничното изкривяване по напрежение и ток за всяка от фазите, захранващи различни консуматори – центробежна помпа и центробежен вентилатор;
 12. Извършена е оценка на комбинирания ефект на променящите се параметри на АД за СН и натоварването върху динамиката на задвижван центробежен ПА; получени са аналитични изрази за хлъзгането, съответстващи на минимални загуби, минимален статорен ток, минимална консумация на енергия.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ НА КОМПОНЕНТИ ОТ ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО, ЗАХРАНВАНИ ОТ ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИ СИСТЕМИ – АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С НАКЪСЪСОЪЕДИНЕН РОТОР ЗА СРЕДНО НАПРЕЖЕНИЕ

4.1. Общи неизправности в АДСНР за СН

В системите за диагностика и мониторинг на ЕМ в ЕЦ няма ясно изградена разделителна линия между различните способности и измервателна апаратура за определяне на текущото техническо състояние, най-вече на машините с въртящи се части.

Типични повреди в пакета на статора

Отслабването на пресовката на статорния пакет също води до повишени вибрации при работата на машината. Открива се с методите на вибродиагностиката, чрез използване на специални датчици.

Статорна намотка

Местното прегряване на статорната намотка се открива по-трудно при външни огледи. За да бъде установено навреме, се изисква поставяне на вградени температурни датчици. За контрол на изолацията се използват т. нар. анализатори на частични разряди.

Въздушна междина

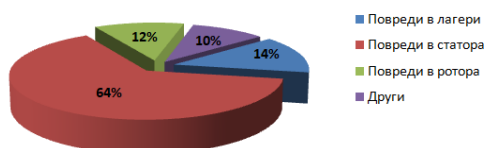
Контролът на въздушната междина се осъществява по няколко способа, които коренно се различават. Може да се използва система за оптичен контрол при допустима граница на измерването до 40 mm и точност до 0.05 mm. Появата на неравномерност във въздушната междина се открива успешно и от системите за вибродиагностика и спектрален анализ на статорния ток [38].

Лагери

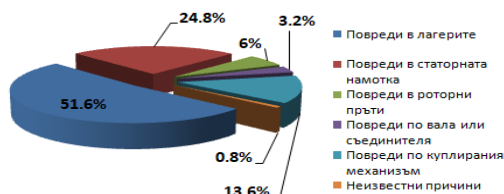
При изследване на текущото работно състояние на лагерите също може да се прилагат няколко измервателни метода, които успешно диагностицират евентуално настъпили отклонения от нормалната им работа. Състоянието им може да се определи с помощта на температурни датчици, вибродиагностика или с използване на спектрален анализ на статорния ток [38].

4.2. Анализ на аварийността на асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор за средно напрежение.

Задълбочени изследвания за процентното разпределение на проявените неизправности и откази са направени в [25, 45, 70, 85, 136, 158, 163]. При извършване на задълбочен анализ на различните видове откази и повреди при АДНСР за СН в [45] са изложени най-честите откази. На фиг. 4.1 е показано разпределението на повредите според мястото в ЕМ. Вижда се, че преобладават отказите на статорната намотка. Разпределението на отказите на АДНСР за СН, работещи в петролната и химическата индустрия, е показано на фиг. 4.2 [158]. Тук най-голям процент от неизправностите се дължат на повреди в лагерите.

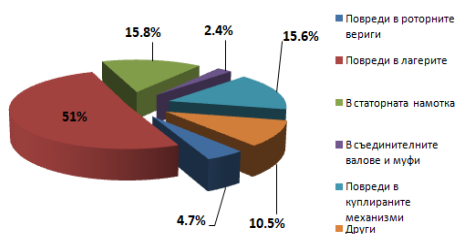


Фиг. 4.1. Разпределение на повредите според мястото в ЕМ

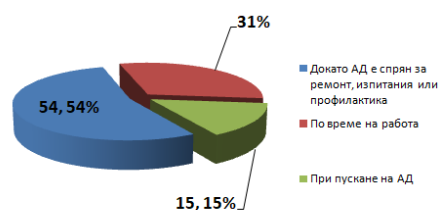


Фиг. 4.2. Разпределение на отказите на АДНСР за СН, работещи в петролната и химическата индустрия

В [163] е направена оценка на причините за появата на неизправности и дефекти, както и класификация на аварийността. Изследването е върху работата на АДНСР за СН с работно напрежение (4÷13.8 kV) и мощност над 372 kW, работещи в АЕЦ при два вида реакторни установки – реактори с вода под налягане (PWR) и реактори с кипяща вода (BWR). Общата аварийност е показана на фиг. 4.3.



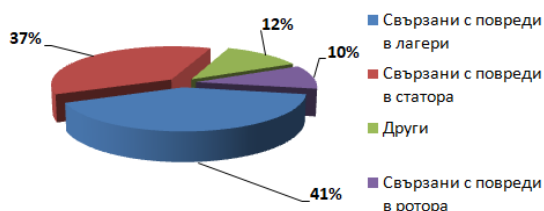
Фиг. 4.3. Обща аварийност и място на проявление



Фиг. 4.4. Текущо състояние на АД по време на откриване на неизправностите

На фиг. 4.4 е показано текущото състояние на АД по време на откриване на неизправностите: спрян за ремонт, по време на работа или при пускане.

В [136] е направено проучване с последващ анализ на голям брой предприятия, работещи в индустрията на САЩ. Обхванати са 75 завода, 33 компании, 1141 АДНСР за СН, наработили 5085 машино-години и са анализирани общо 360 неизправности. Разпределението на общата аварийност е показано на фиг. 4.5.

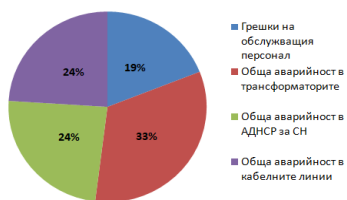


Фиг. 4.5. Разпределение на общата аварийност

В [57, 85, 163] е направено заключението, че в ЕЦ основното задвижване за механизмите в системите за СН, захранвани от шини с.н., са АДНСР. В [57] се споменава за използване на единични бройки АДНР и СД в системата на СН на ЕЦ, докато в [163] се конкретизира: 2÷4% за АДНР и 4% за СД. На АДНСР за СН се падат 25÷35% от всички откази на електрическото оборудване за системата на СН. В [85] е показано конкретното разпределение на отказите на оборудването в системата на СН в ТЕЦ. На фиг. 4.6 е дадено разпределението на общата аварийност на механизмите, на фиг. 4.7 е показано общото разпределение на база вид оборудване, а на фиг. 4.8 е показано разпределението на аварийността на АДНСР за СН.



Фиг. 4.6. Разпределение на общата аварийност на механизмите в ТЕЦ



Фиг. 4.7. Общо разпределение на база вид оборудване



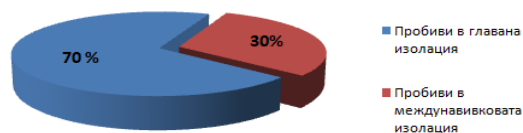
Фиг. 4.8. Разпределение на аварийността на АДНСР за СН

Разпределение на повредите в статорната намотка.

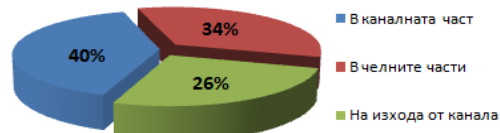
Аварийните режими, които водят до повреди в статорната намотка, най-често са съпроводени с термични процеси, предизвикани от различни типови събития, съпровождащи експлоатацията на АД. В [83] е направен анализ и са описани такъв тип повреди. Режимите на работа, които ги предизвикват са: ударно или

продължително изменение на характера на товара, утежнен съпротивителен момент при пускане, еднофазен режим на работа, работа при понижено напрежение, несиметрия на захранващото напрежение и влошено охлаждане на АД

. На фиг. 4.9 е показано разпределението на повредите в статорната намотка, а на фиг. 4.10 – разпределението на неизправностите според мястото на пробива в статорната намотка [45].



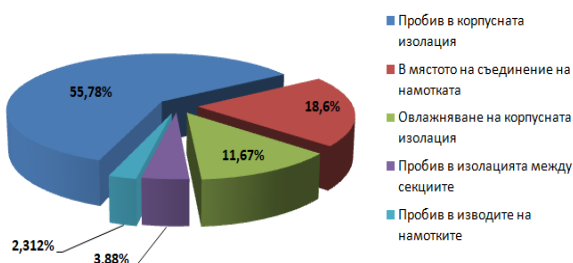
Фиг. 4.9. Разпределение на повредите в статорната намотка



Фиг. 4.10. Разпределение на неизправностите според мястото на пробива в статорната намотка

Изследването на надеждността при експлоатация позволява по-пълно да се разкрият механизмите на стареене и откази на отделните елементи и на цялата ЕМ. Това се постига чрез събиране на данни и анализ на влиянието на експлоатационните въздействия, наречени още *деградационни фактори*. По-важните от тях са температурата, електрическото поле, вибрациите, механичните напрежения от електродинамичен или термичен произход, влагата и др. [45].

В [70] е направен анализ на типовете АД, сериите, конструктивните особености, видовете повреди, методите за статистическа оценка, показателите за надеждност, както и на процентните пробиви в различните видове изолации на статорните намотки, но данните са конкретизирани. В извадката участват 216 АДНСР с период на експлоатация от 7 до 14 години, натрупали наработка всичко 2322 машино-години. За разглеждания период са се случили 129 пробива в статорната намотка. Разпределението, както следва, е показано на фиг. 4.11.



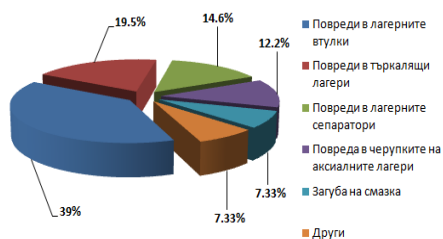
Фиг. 4.11. Разпределение на пробиви в статорната намотка

Разпределение на повредите в ротора

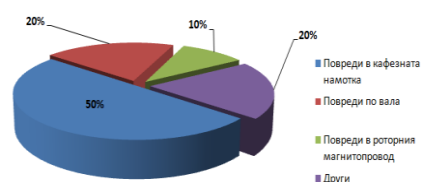
Към най-разпространените повреди, свързани с роторните канали се отнасят следните възможности: прекъсване на роторни проводници или отделяне на накъсосъединяващия пръстен.

По резултати от изследвания на експлоатацията на АД, работещи в повторно-кратковременен режим S3, е установено, че прекъсването на роторен проводник води до снижаване на претоварващата способност на АД.

Според [136] разпределението на повредите в ротора на АДНСР за СН е показано на фиг. 4.12.



Фиг. 4.13. Разпределение на неизправностите, свързани с лагерните възли



Фиг. 4.12. Разпределение на повредите в ротора на АДНСР за СН

Разпределение на повредите в лагери

Според [25, 70, 85, 136, 158, 163], най-голям дял на отказите се падат на лагерите на АДНСР за СН. При този вид ЕМ се използват търкалящи и плъзгащи лагери. Според [136] конкретното разпределение на неизправностите, свързани с лагерните възли е показано на фиг. 4.13.

Този вид неизправности са съпроводени от прегряване на лагерите, неправилен шум и изхвърляне на грес при търкалящи лагери. При плъзгащите лагери повредите са прегряване, разпръскване и изтичане на масло.

4. 4. Интергрирани системи за диагностика и мониторинг на текущото техническо състояние на асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор за средно напрежение.

В системите за превантивна поддръжка и мониторинг на състоянието на АДНСР за СН в ЕЦ са възприети и утвърдени няколко различни стратегии за установяване на текущото състояние на изследваните обекти. Използват се главно данни, постъпващи индивидуално от всяка ЕМ за температурното и вибрационно състояние на отделни възли, събиране на данните в информационна банка, анализ на резултатите и взимане на решение на база извършения анализ

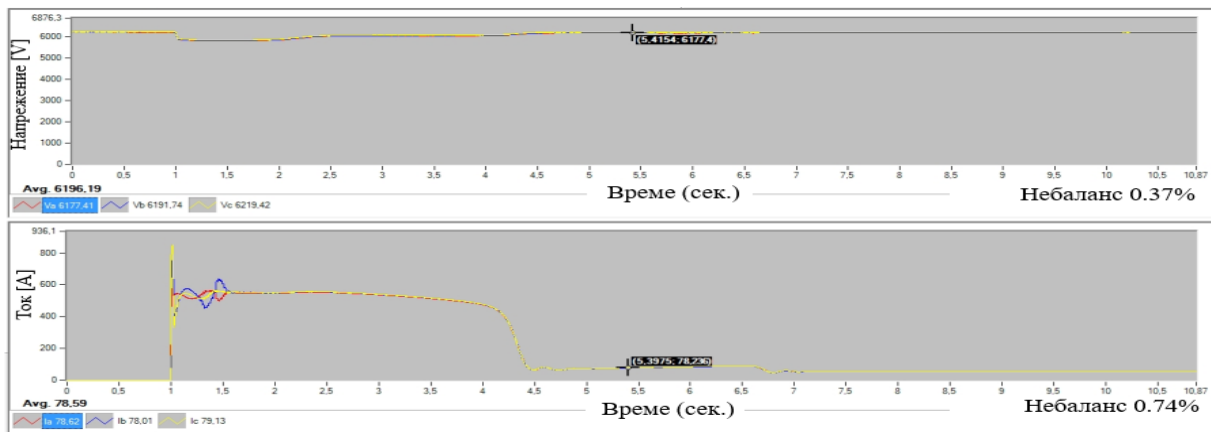
За извършване на периодични диагностични прегледи на ЕМ се използват два типа измервателни комплекси, които имат за цел да спомогнат за извършването на качествена и цялостна оценка на текущото състояние на изследвания обект. Използваните измервателни комплекси са: комплекси за статичен мониторинг и комплекси за динамичен мониторинг.

Диагностиката има за цел своевременно откриване и определяне на неизправностите според местата на тяхното проявление, евентуалната причина за определено аварийно събитие/отказ и възможност за предвиждане на следваща такава с оглед превантивна поддръжка.

С помощта на диагностичен комплекс за динамичен анализ са извършени серия от измервания на различни параметри на АДНСР за СН, работещи в системата за електроснабдяване на с.н. на страна СН в електрическа централа [185]. Благодарение на комплекса се илюстрират възможностите на системите за динамичен двигателен анализ. Използван е анализатор модел *Baker EXP 4000* [A9].

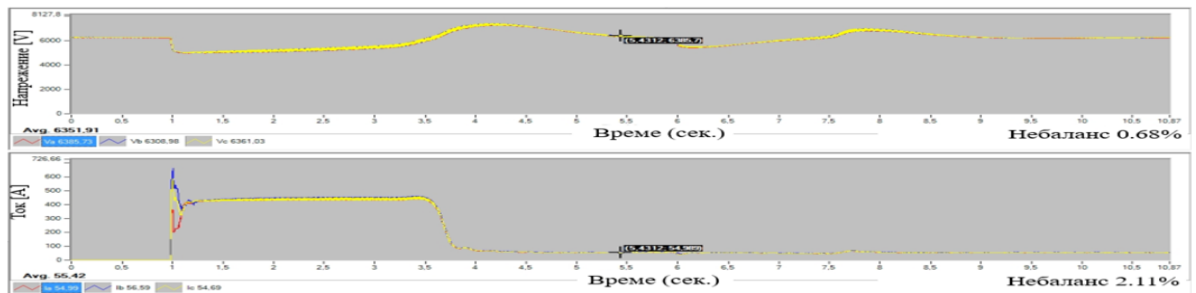
Анализ на пусковите характеристики

Динамичният анализатор дава възможност за заснемане на момента на стартиране на АДНСР за СН - *2АЗМ1-500/6000 УХЛ4* с номинални данни, показани в Таблица 4.10 и показва поведението на токовете и напреженията в трифазната ЕСС, при получав



Фиг. 4.32. Поведение при получаване на захранване по щатна схема

На фиг. 4.33 е показано изменението на токовете и напреженията в трифазната ЕСС за с.н. на страна СН на ЕЦ, получаваща захранване от резервен източник на електрическа мощност при провеждане на планови проверки на резерва. Ясно се вижда изменението на формата и амплитудата на токовете и напреженията при заснемане на преходния процес [A9].



Фиг. 4.33. Поведение при получаване на захранване от резервен източник

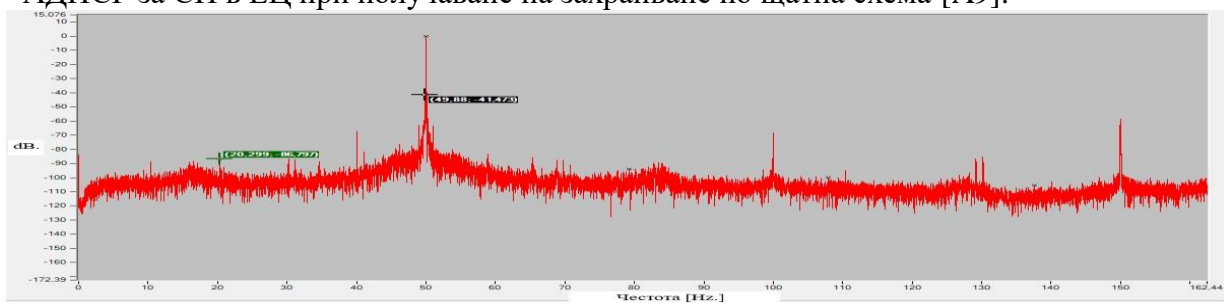
Комплексът за динамичен двигателен анализ изчислява автоматично и небаланса на токовете и напреженията, показани в долния десен ъгъл на всяка характеристика.

Табл. 4.10. Номинални данни на динамичния анализатор

Модел	Номинално напрежение [V]	Номинален ток [A]	Номинална мощност [kW]	Скорост на въртене [min^{-1}]
2АЗМ1-500/6000УХЛ4	6000	54.8	500	2980

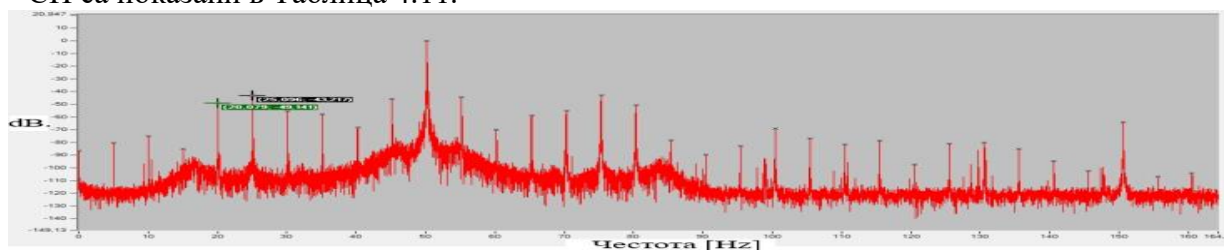
Хармоничен анализ на захранващото напрежение на АДНСР за СН

На фиг. 4.34 е показан хармоничен анализ на състава на напрежението на АДНСР за СН в ЕЦ при получаване на захранване по щатна схема [A9].



Фиг. 4.34. Напрежение при получаване на захранване по щатна схема

На фиг. 4.35 е показан хармоничен анализ на захранващото напрежение на АДНСР за СН, получаващ захранване от резервен източник. Данните на АДНСР за СН са показани в Таблица 4.11.



Фиг. 4.35. Напрежение при получаване на захранване от резервен източник

Табл. 4.11. Номинални данни на АДНСР за СН с резервно захранване

Модел	Номинално напрежение [V]	Номинален ток [A]	Номинална мощност [kW]	Скорост на въртене [min^{-1}]
ВАН 143/41-10	6000	100	800	590

Резервният източник в конкретния случай е дизел-генераторна група с номинални данни, показани в Таблица 4.12.

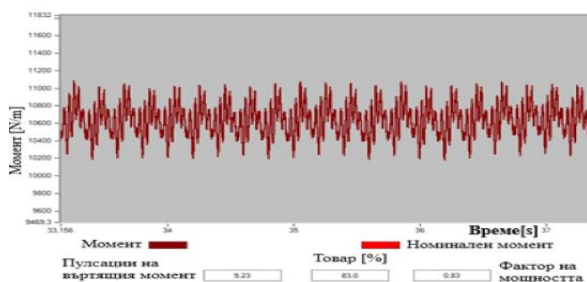
Табл. 4.12. Номинални данни на захранваща дизел-генераторна група

Модел	Номинално напрежение [V]	$\cos \varphi$	Номинален еН ток [A]	Номинална активна мощност [kW]	Скорост на въртене [min^{-1}]
GBD10j	6300	0.8	710	6200	600

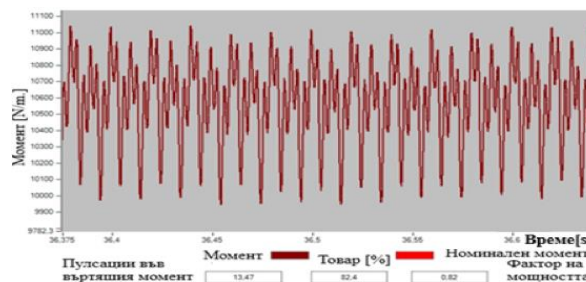
Изследване на въртящия момент в преходен и установен режим

На фиг. 4.36 е изобразен пулсиращият въртящ момент в установен режим, когато АДНСР за СН, куплиран към ПА 600В-1.6/100-0 (центробежна помпа), получава захранване по щатна схема. Пулсациите на момента са 9.23%.

На фиг. 4.37 са показани механичните пулсации на въртящия момент на същия ПА, но вече получавайки захранване от резервен източник. Нивото на пулсациите вече е 13.47%. Повишените пулсационни нива се дължат на по-силно изразения субхармоничен състав на захранващото напрежение, предизвикан от ударния характер на работа на двигателя с вътрешно горене, задвижващ СГ.

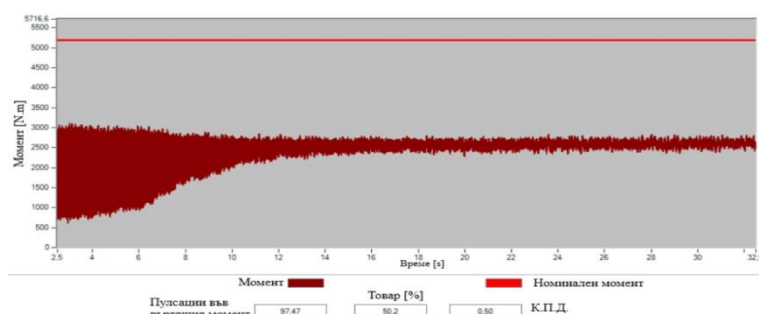


Фиг. 4.36. Пулсиращ въртящ момент в установен режим, когато АДНСР за СН е куплиран към ПА



Фиг. 4.37. Механични пулсации на въртящия момент на същия ПА, но вече получавайки захранване от резервен източник

На фиг. 4.38 е показан въртящият момент на АДНСР за СН в момент на преходен процес, свързан с промяна в състоянието на спирателна арматура в системата за вътрешно водоснабдяване. Номиналните данни на самия ЕД са дадени в Таблица 4.13. На вала на АД е куплиран центробежен ПА от типа ДЗ-200-75.



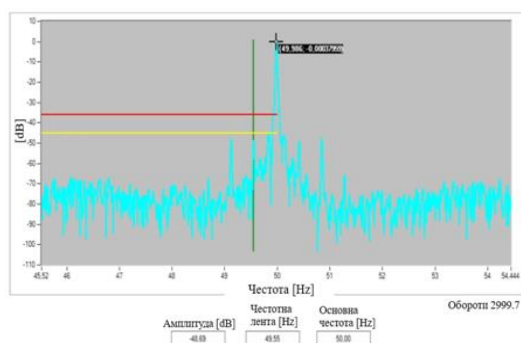
Фиг. 4.38. АДНСР за СН в момент на преходен процес, свързан с промяна в състоянието на спирателна арматура

Табл. 4.13. Номинални данни на АДНСР за СН

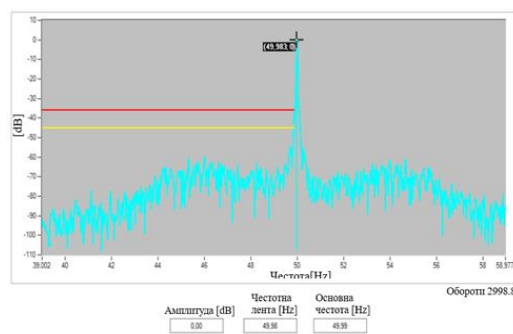
Модел	Номинално напрежение [V]	Номинален ток [A]	Номинална мощност [kW]	Скорост на въртене [min ⁻¹]
A13-42-8УХЛ4/400	6000	50	400	375

Прекъснат роторен проводник

Фиг. 4.39 е типично изображение на АДНСР за СН, работещ с явна несиметрия в роторната верига. След последвал оглед и разглобяване на машината, се установява действително прекъсване на роторен прът. На фиг. 4.40 е същият АД, но вече с отстранена повреда в роторната верига. Номиналните данни на ЕД са същите, като показаните в Таблица 4.13 [A9].



Фиг. 4.39. АДНСР за СН, работещ с явна несиметрия в роторната верига



Фиг. 4.40. АДНСР за СН, но вече с отстранена повреда в роторната верига

Изводи към Глава четвърта

1. Извършена е обобщена оценка и систематизиране на причините за възникване на неизправности от общ характер, които възникват в конструктивните части на АДНСР за СН по време на експлоатация. Описано е и проявлението на вибрации и шум и методите за анализ.

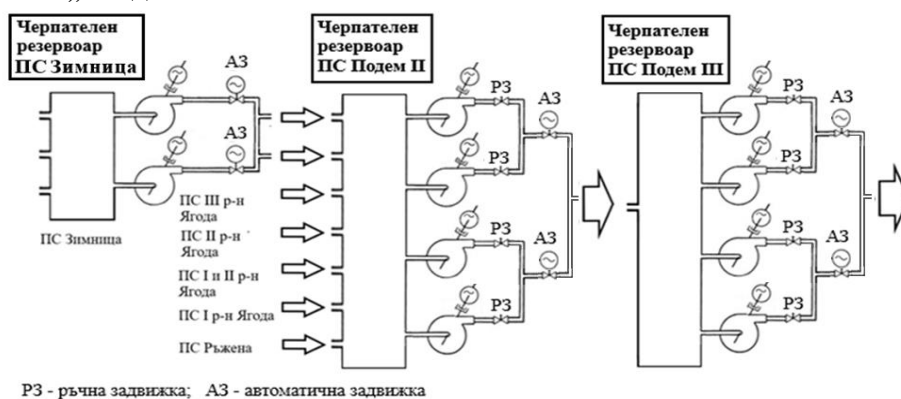
2. Изследвани са данни за разпределение на повредите в АДНСР за СН в зависимост от мястото на проявление – статорна намотка, роторна намотка, лагери и общи повреди. Получените резултати са показани в графичен вид.
3. Извършен е задълбочен анализ и класификация на инвазивните и неинвазивни техники за диагностика. Подробно са изложени и подредени както теоретични постановки, така и примери, които имат висока стойност от практическа гледна точка.
4. В табличен вид са показани типичните честотни диапазони за откриване на определена неизправност при използване на различни вибродиагностични методи. Направена е оценка за тяхната ефективност при определяне на различните неизправности, както по място на възникване, така и по стадий на развитие.
5. Извършена е оценка на най-съвременните методи за спектрален анализ на статорния ток. В обобщен вид са показани и математическите методологии в тази област, като са препоръчани отделни от тях за използване при идентификация на различни повреди и дефекти.
6. Извършени са практически измервания със съвременен диагностичен комплекс, като нагледно са показани възможностите му и за изследване на преходни режими по време на експлоатация. Оценено е и влиянието на висши хармоници в ЕСС на предприятие за производство на ЕЕ. Доказана е и високата ефективност на системите за функционална диагностика.

ГЛАВА ПЕТА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ, ОЦЕНКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ И МЕРКИ, ПРЕДЛАГАНИ ЗА ОПЕРАТИВНО ОПТИМИЗИРАНЕ ЧРЕЗ СОФТУЕРНА СРЕДА

5. 1. Идентификация на параметрите на АДНСР за СН, електрообзавеждането и електроснабдяването на помпени станции

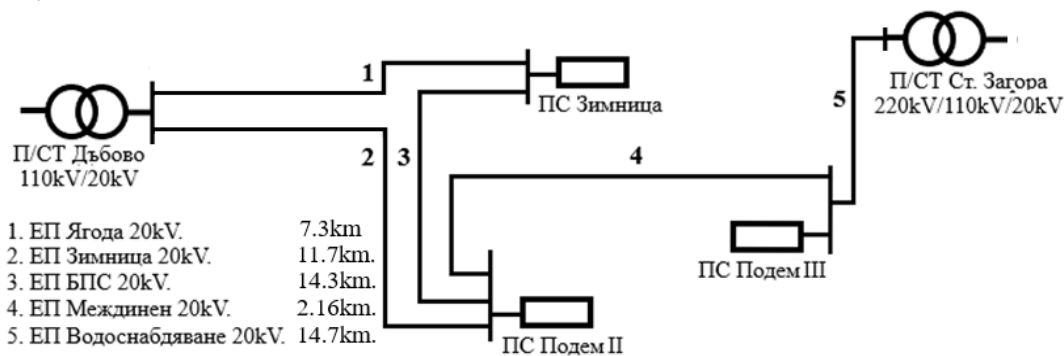
Обект на изследването на електрически преходни процеси, както и взаимното влияние на електрообзавеждане и електроснабдяване, е група помпени станции (ПС), служещи за питейно водоснабдяване на един от големите български градове. На фиг. 5.1 е показана обща технологична схема за пренос на питейна вода през трите подема на ПС „Ягода”.



Фиг. 5.1. Обща технологична схема за пренос на питейна вода през ПС „Ягода”

Електроснабдяването на ПС „Ягода” се осъществява посредством ВЛ/20 kV от две различни подстанции (П/СТ) – П/СТ „Ст. Загора” с номинално напрежение 220/110/20 kV и П/СТ „Дъбово” с номинално напрежение 110/20 kV.

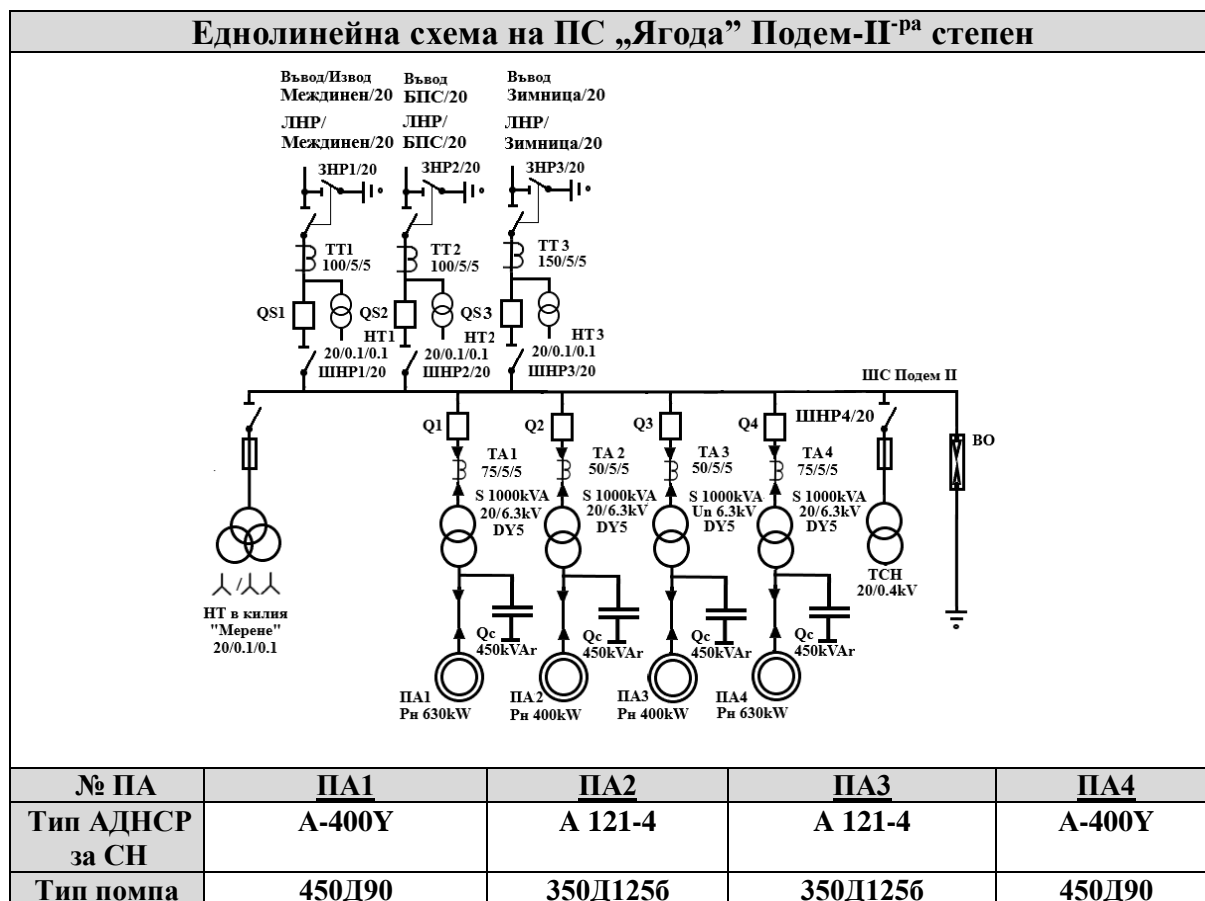
Общата електроснабдителна схема на предприятието е показана на фиг. 5.3



ЕП Ягода/20kV и ЕП Водоснабдяване/20kV са в оперативен резерв.

Фиг. 5.3. Обща електроснабдителна схема на предприятието

На фиг. 5.5 е показана еднолинейна схема на ПС „Подем II^{ра} степен” с напрежение 20/6 kV. Захранването е от един въвод или един въвод/извод. По основна схема в работа е само въвод „Зимница”/20 kV, захранващ въвод/извод „Междинен”/20 kV и извод „БПС”/20 kV. Въвод „Водоснабдяване”/20 kV в ПС „Подем III^{та} степен” се намира в оперативно дежурство с охранно напрежение и подготвена схема. Той се включва от оперативния персонал при отпадане на въвод „Зимница”/20 kV в ПС „Подем II^{ра} степен” само с прекъсвачи.

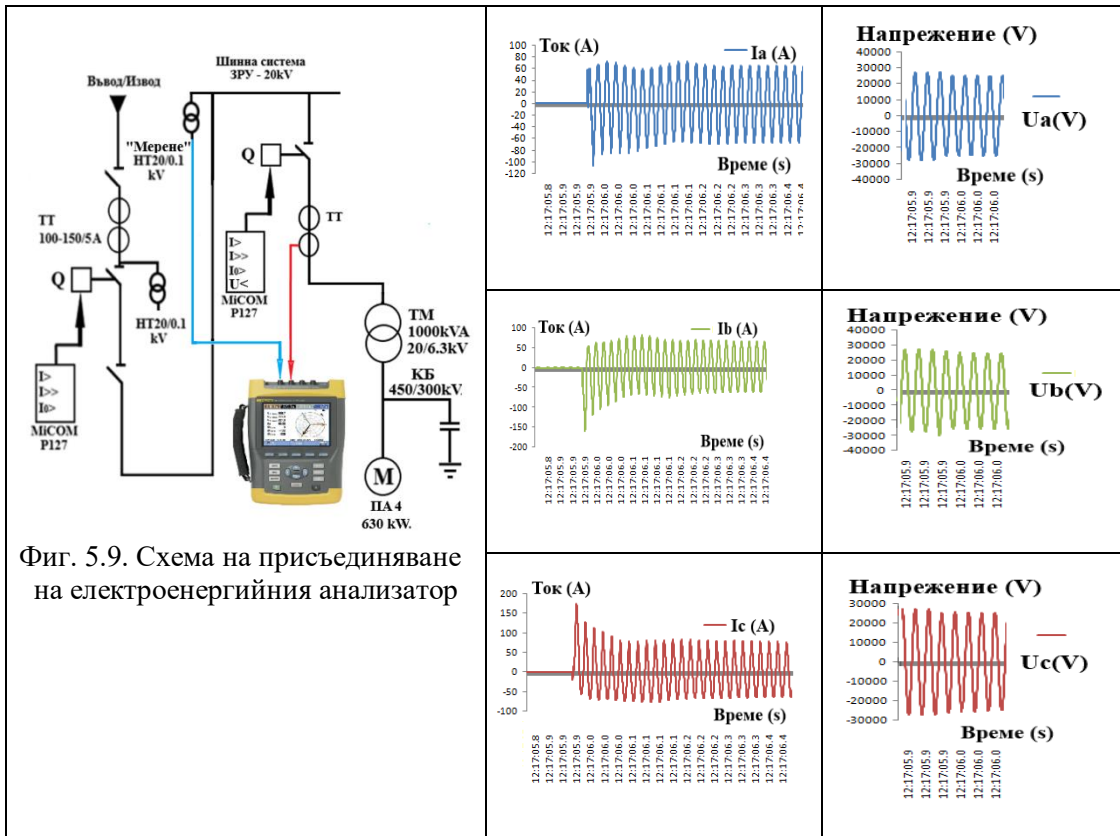


Фиг. 5.5. Еднолинейна схема на ПС „Подем II^{ра} степен”

5.2. Практически измервания и обработка на резултатите

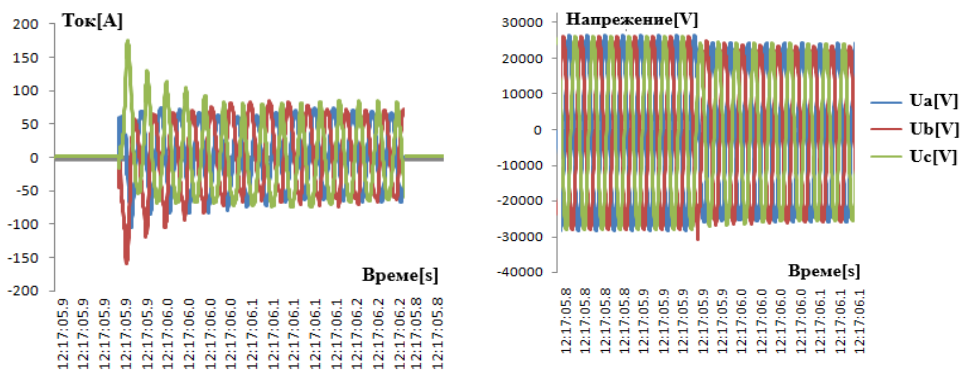
За подобряване на точността при симулиране на работата на ПС „Зимница”, Подем II и Подем III, е извършена серия от измервания на работните параметри на един АДСНР за СН в ПС Подем III.

Измерванията са извършени с анализатор на електрическа енергия *FLUKE 430 series II*. На фиг. 5.9 е показана схема на присъединяване на електроенергийния анализатор в еднолинейната схемата на ПС Подем III за ПА2, като получените резултати са показани на фиг. 5.10 ÷ фиг. 5.17.



Фиг. 5.9. Схема на присъединяване на електроенергийния анализатор

Фиг. 5.11. Осцилограми на напрежението и тока по фази



Фиг. 5.12. Общи осцилограми на напрежението и тока

В Таблица 5.11 са дадени ефективните стойности на измереното напрежение при високата страна на СТ, както и изчислените процентни падове на напрежението по време на пусков процес спрямо стойността на захранващото напрежение.

Табл. 5.11. Ефективни стойности на измереното напрежение и изчислени процентни падове на напрежението

Страна 20 kV						Страна 6.3 kV	
Напрежение	Преди преходния процес	По време на преходния процес	%*	След преходния процес	%*	Установено напрежение	%**
Ua, kV	19.386	18.046	6.91	19.263	0.63	6.253	4.05
Ub, kV	19.402	18.068	6.87	19.293	0.56	6.258	4.13
Uc, kV	19.271	17.925	6.98	19.151	0.62	6.177	3.48
%* – Изчислен пад на напрежение в проценти, спрямо стойността на захранващото напрежение. %** – Изчислена стойност на установеното напрежение, спрямо номиналното на двигателя.							

В Таблица 5.12 са дадени ефективните стойности на измерения ток при високата страна на СТ.

Табл. 5.12. Ефективни стойности на измерения ток

Страна 20 kV			Страна 6.3 kV		
Ток	Ударна съставка на пусковия ток	Установена съставка на пусковия ток	Ударна съставка на пусковия ток	Установена съставка на пусковия ток	Установен работен ток
Ia, A	76.3	45.24	235	140.24	19.186
Ib, A	67.7	46.09	209.8	142.84	19.276
Ic, A	39.24	46.1	121.6	142.9	20.285

В Таблица 5.13 са показани оперативни параметри, изчислени на база измерванията, извършени с електроенергийния анализатор *FLUKE 430 series II*. В така заснетите режими на работа на регулиране на дебита на водата чрез метода на дроселирането могат да се отчитат нормалните енергетични показатели на работа на АДНСР за СН за този режим.

Табл. 5.13. Изчислени оперативни параметри

Параметър	Ток [A]	Напрежение [kV]	Активна мощност [kW]	Реактивна мощност [kVAr]	Пълна мощност [kVA]	cosφ	Време за пускане [s]
A3 отворена на 85%	41.322	6.23	373.67	233.242	440.45	0.85	2.55

В Таблица 5.14 са представени стойностите на работния ток според това, на колко процента е отворена шибърната задвижка на ПА2 и нейното влияние върху потребяваната от АДНСР за СН на активна мощност. Данните са ориентировъчни.

Табл. 5.14. Стойности на работния ток

ПА 2	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
A 121-4 I, [A]	24.3	36.6	28.9	31.2	33.5	35.8	38.1	40.4	42.7	45
P, [kW]	103	113	261	282	303	324	345	374	395	417
ПА 4	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
A 400Y I, [A]	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
P, [kW]	146	153	353	380	407	434	500	461	528	556

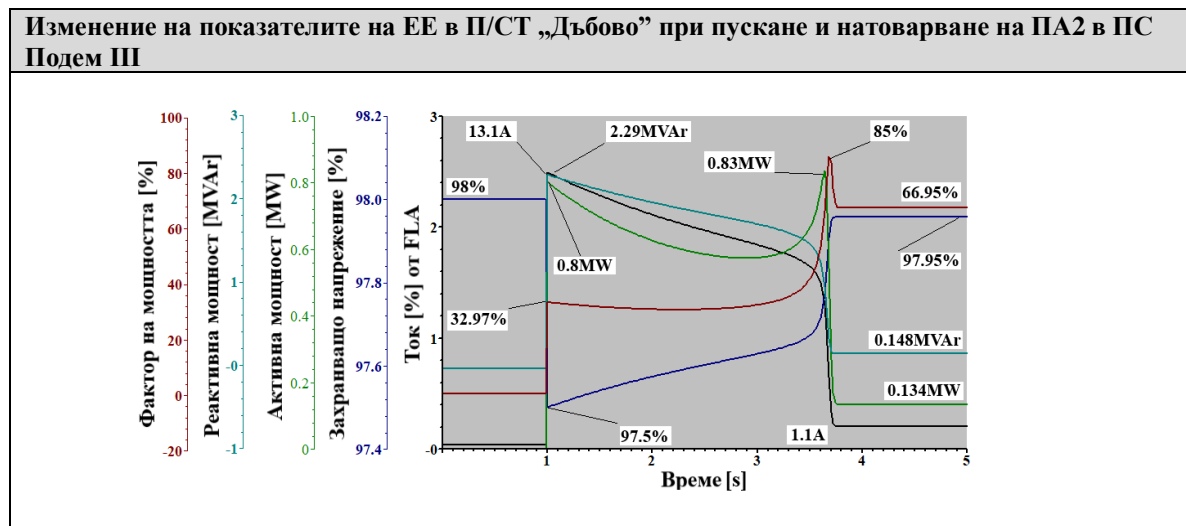
Регулирането на ПА по метода на дроселирането е свързано с повишени загуби и ниски енергетични показатели. Динамичното потребление от страна на водоползвателите също създава известни трудности при намиране на оптималния работен режим. При изграждане на технология за управление на ПА, съобразена с оптималното използване на вложеното електрообзавеждане и минимизиране на вложената ЕЕ, може да се направи изводът, че е по-икономично да се търсят работни точки за ПА при максимални или близки до тях стойности на отваряне на шибърните задвижки за сметка на броя работещи ПА. Възможно е и да се направи анализ за финансова обосновка с оглед прилагане на друг метод за регулиране на дебита [40, 43].

5.3. Симулационни изследвания чрез софтуерна среда

От изложеното дотук става ясно, че цялата ЕСС на ПС „Ягода” Подем II, Подем III и ПС „Зимница”, с която имат електрическа връзка, е с голям запас от електрическа мощност и сечения, избрани да захранват помпените станции. За да се направи качествен и задълбочен анализ на всички възможни работни и аварийни режими, да се определят токовете на к.с., както и да се изработи селективна карта на работата на РЗА, е необходимо да се използва мощна софтуерна среда, която да има необходимите качествени възможности за оптимално време, посредством която да се реши този комплекс от задачи.

5.3.1. Динамична симулация на работата на помпени агрегати

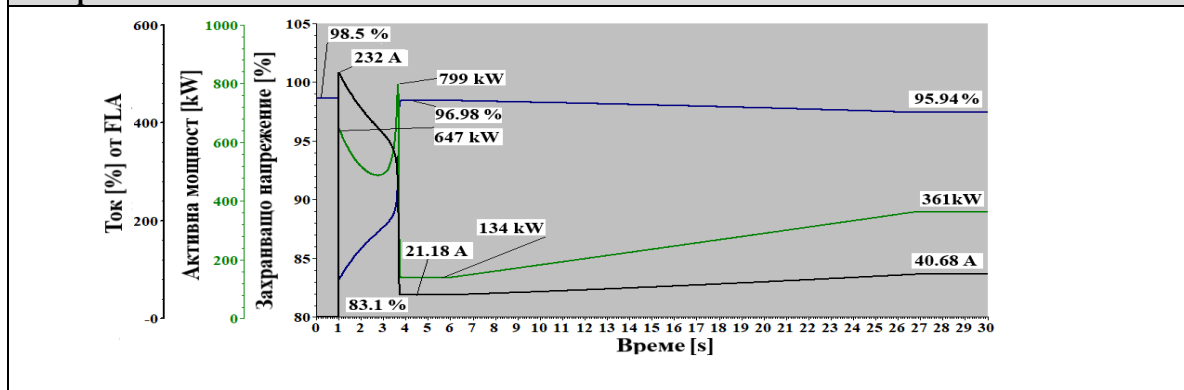
На фиг. 5.19 е показано изображение на симулирания преходен процес, протичащ в П/СТ „Дъбово” 110/20 kV по време на пускане на ПА2 в ПС Подем III. Отбелязани са процентните и ефективните стойности на изменящите се величини. Снетите стойности са на високата страна на СТ в П/СТ „Дъбово” 110/20 kV.



Фиг. 5.19. Симулиран преходен процес, протичащ в П/СТ „Дъбово” 110/20 kV

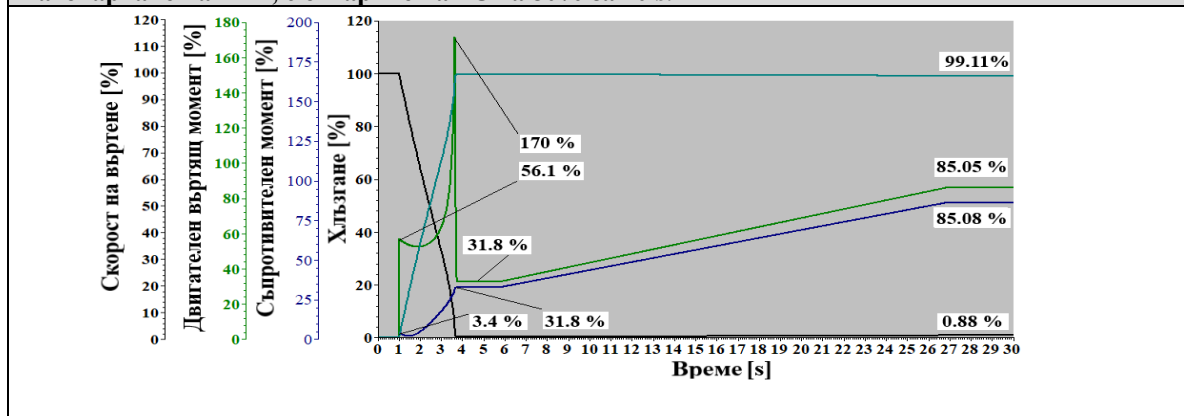
На фиг. 5.20 е показано изображение на симулирания преходен процес, протичащ по време на пускане на ПА2 в ПС Подем III. Отбелязани са процентните и ефективните стойности на изменящите се величини.

Изменение на показателите на ЕЕ в ПС Подем III при пускане и натоварване на ПА2, с отваряне на АЗ на 85% за 20 s.



Фиг. 5.20. Симулиран преходен процес, протичащ по време на пускане на ПА2 в ПС Подем III

Изменение на механичните показатели на АДНСР за СН в ПС Подем III при пускане и натоварване на ПА2, с отваряне на АЗ на 80% за 20 s.



Фиг. 5.21. Изменение на механичните показатели на АДНСР за СН в ПС Подем III при пускане и натоварване на ПА2

В Таблица 5.15 са показани резултатите от симулацията на пускане и натоварването на ПА2 в ПС Подем III. В графа „стойност” са въведени текущите стойности, снети при симулацията. В графа „разлика” е показана процентната разлика на стойностите, снети при симулацията и стойностите, снети при измерванията.

Табл. 5.15. Резултати от симулацията на пускане и натоварването на ПА

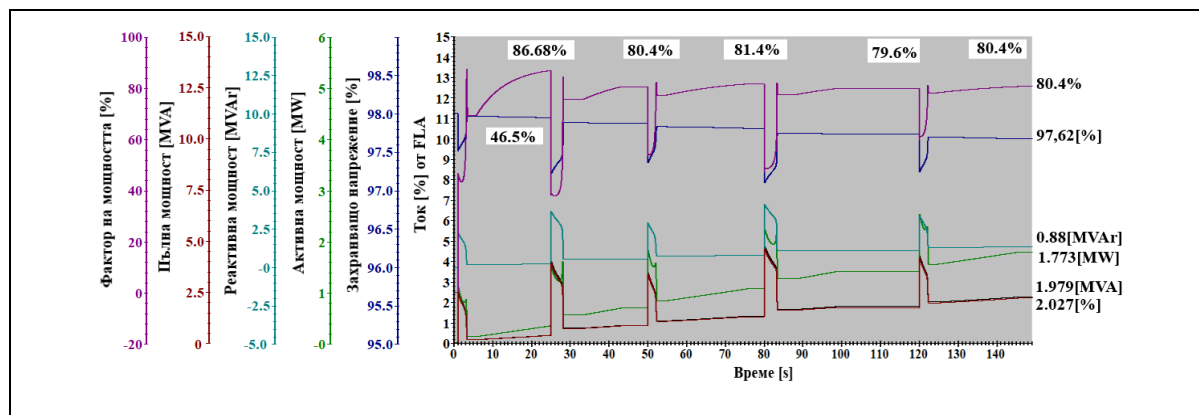
ПС „Ягода” Подем III								
Параметър	ΔU [kV]*	P [kW]	Q [kVAr]	I [A]	$I_{\text{пуск}}$ [A]	S [kVa]	cosφ	$T_{\text{пуск}}$
Стойност	6.171	361	241	40.68	232	417.6	0.86	2.68
Разлика [%]	0.96	3.22	3.32	1.55	1.27	5	1.16	4.85

*Стойността на напрежението ΔU е за установен режим.

В Таблица 5.16 са показани резултатите от симулацията на пускане и натоварването на ПА2 в ПС Подем III. В графа „стойност” са въведени текущите стойности, снети при симулацията. В графа „разлика” е показана процентната разликата на стойностите, снети при симулацията и стойностите, снети от табелката на АДНСР за СН и каталожни данни, дадени в Таблица 5.4. За да се получат коректни данни за сравнение, стойностите са отчетени при 100% симулирано натоварване.

Табл. 5.16. Резултати от симулацията на пускане и натоварването на ПА

ПС „Ягода” Подем III								
Параметър	n_n [min ⁻¹]	P [kW]	$S_{хлзг}$ [%]	I [A]	$k_{п.}$ о.е.	S [kVa]	cosφ	$M_{ном}$ [Nm]
Стойност	1483.6	660	1.13	73.3	7	768	0.865	3840
Разлика [%]	0.16	4.54	2.65	0.27	0	0.07	0.57	4.23



Фиг. 5.25. Разпределение на основните показатели на ЕЕ

На фиг. 5.25 е показано примерно разпределение на основните показатели на ЕЕ на източника на електрическа мощност в симулационния софтуер *ETAP*, при пускане на част от ПА в ПС „Зимница”, ПС „Ягода” Подем II и Подем III. Времето за пускане на ПА са следните: ПА1 в ПС „Зимница” се пуска на 1 s; ПА1 в Подем II се пуска на 25 s; ПА2 в Подем II се пуска на 50 s; ПА4 в Подем III се пуска на 80 s; ПА2 в Подем III се пуска на 120 s. В номинален дневен режим на работа в експлоатация се намират точно толкова ПА в различните ПС, т.е. симулацията е точно отражение на реалната ситуация.

5.3.2. Изчисляване на токовете на къси съединения

Симулационният софтуер *ETAP* предлага качествена методология за изчисляване на токовете на к.с., базирана на международния стандарт IEC 60909.

5.3.3. Определяне на настройките на релейната защита и автоматика на асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор за средно напрежение

Защитата на АДНСР за СН от междуфазни к.с. се осигурява от токова отсечка ТО без времезадръжка, отстроена от пусковия ток на двигателя за АДНСР за СН с мощност до 2000 kW [69].

При изчисляването на ТО следва да се отчете, че в момента на включването на АДНСР за СН освен периодична съставляща пусковият ток съдържа и аperiодична съставка, която се обуславя от преходния процес и намагнитващия ток. Това води до увеличаване на амплитудата на пусковия ток от 1.3 до 1.8 пъти. Счита се, че пусковият процес е приключил тогава, когато пусковият ток стане по-малък от 1.25 от $I_{ном}$. [69]. Стойността на $I_{ТО}$ се определя по формула (5.6).

$$K_{ч} = \frac{k_{min}^{(2)}}{I_{МТО}} \quad (5.11)$$

$$I_{МТО} = \frac{k_{min}^{(2)}}{K_{ч}} \quad (5.12)$$

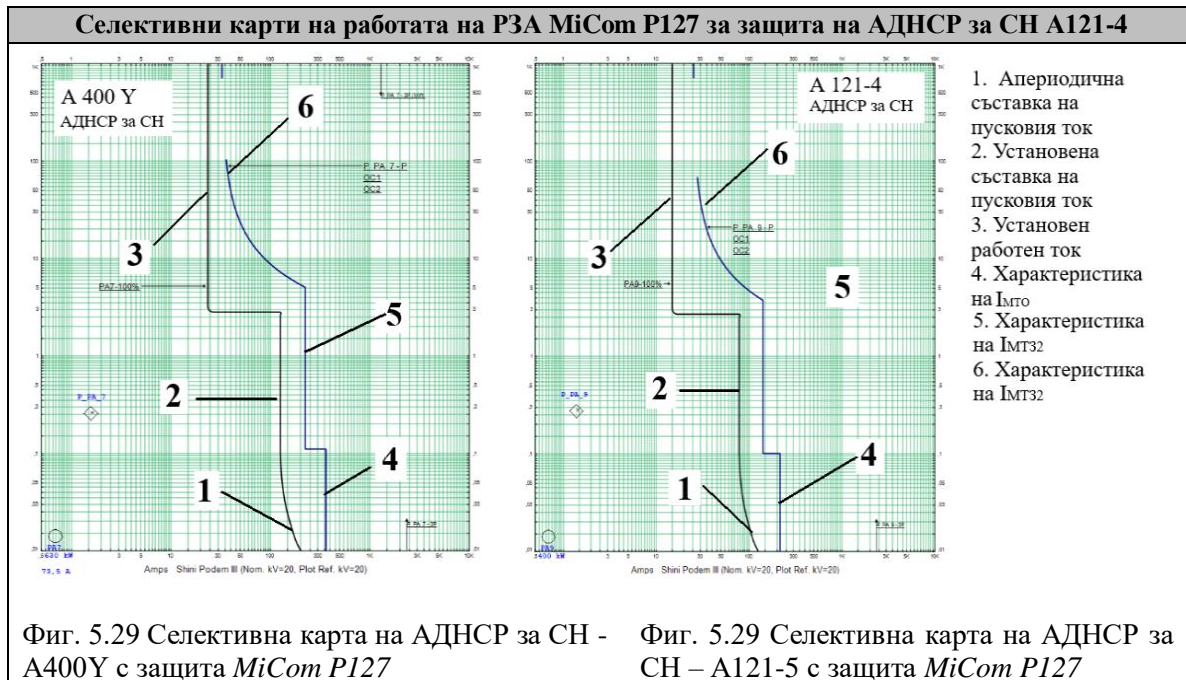
Често чувствителността на такъв тип защиты се получава сравнително ниска. Препоръчително е да се въведе и едностъпална или двустъпална максималнотокова защита МТЗ с независима характеристика и ток на сработване, който се определя по формула (5.7). Данните за изчислените настройки са показани в Таблица 5.20 [8, 69, 168].

Табл. 5.20. Изчислени настройки

АДНСР за СН	$I_{MTO}/0s.$	$I_{MT31}/0.1s$	I_{MT32}	TMS/Време,s.
A 121-4	$I_{T0} = 191.5A$	$I_{MT31} = 115A$	$I_{MT32} = 21.5A$	0.93/2.82s.
A 400Y	$I_{T0} = 448.5A$	$I_{MT31} = 226.5A$	$I_{MT32} = 33A$	1.41/2.99s.

Изборът на двустъпална МТЗ се диктува от желанието АДНСР за СН да бъде надеждно защитен във всяка една част от пусковата характеристика. Това е показано на фиг. 5.28. Стойностите на тока на заработване на второто стъпало на МТЗ се определят по [168].

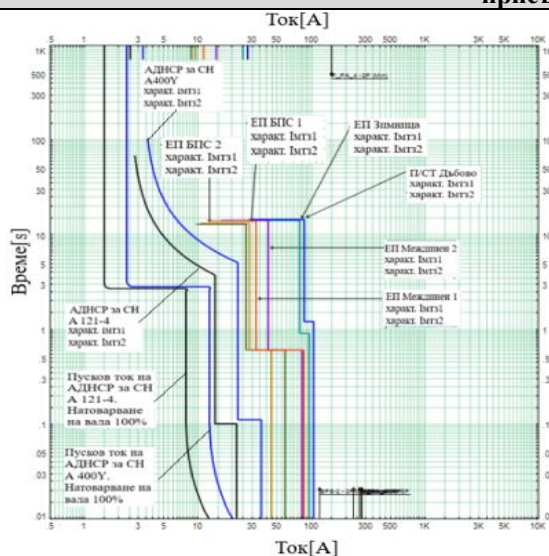
Съгласуването по време на защитите със зависимите характеристики започва с определяне на мястото на повредата, за което ще се провежда изчислението и изчисляване на съответния му ток на к.с. (ако е необходимо за максимален и минимален режим на захранване). За този ток се определят времената на заработване на избраните характеристики на релетата и се определят времевите множители TMS. (TMS - time multiplier settings) във формулите (5.10) и (5.11), които ги описват така, че характеристиките да не се пресичат [168].



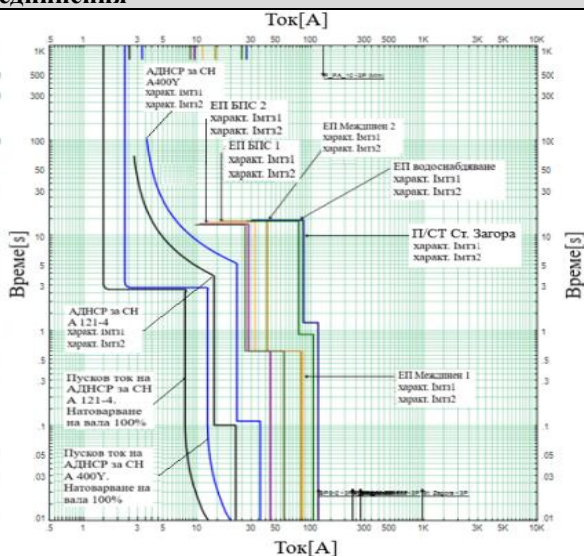
На фиг. 5.29 и фиг. 5.30 са показани селективни карти на работа на двигателни защиты *MiCom P127*, пусковите характеристики на двата типа АДНСР за СН, използвани в ПС „Зимница” и ПС „Ягода” Подем II и Подем III. От тези фигури може да се направи изводът, че изискванията за изчисляване на характеристики, които да защитават АДНСР за СН по време на пускане и номинална работа, са изпълнени.

Следващата стъпка за получаване на цялостна картина за работата на ПС „Зимница” и ПС „Ягода” е изчисляване на настройките на РЗА на електропроводните присъединения и изготвяне на селективни карти, които да включват пусковите характеристики на АДНСР за СН, уставките на двигателните защиты с изобразени съответните им характеристики. Изчисленията на уставките на РЗА трябва да се извършат при двата възможни варианта на захранване, т.е. при захранване по основна схема от П/СТ „Дъбово” 110/20 kV и по резервна схема при захранване от П/СТ „Стара Загора” 220/110/20 kV.

Селективни карти на работата на РЗА на АДНСР за СН и РЗА на електропроводни присъединения



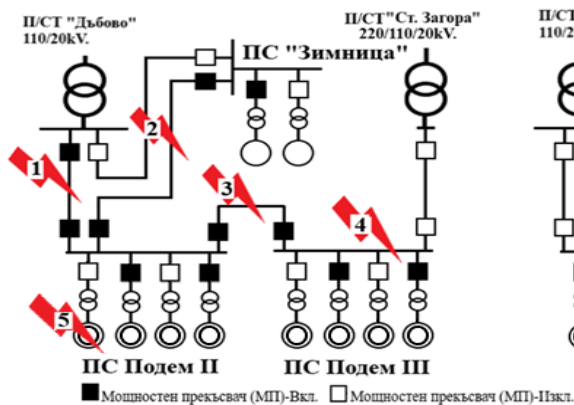
Фиг. 5.31 Селективни карти при работа по основна схема



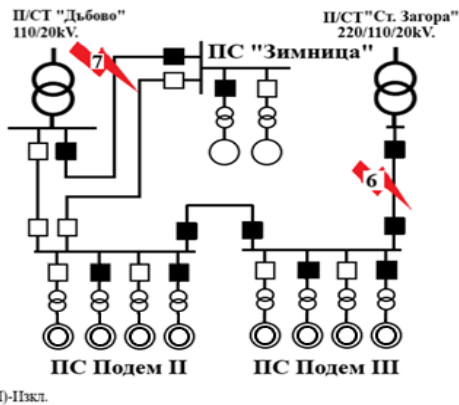
Фиг. 5.32 Селективни карти при работа по резервна схема

5.3.4. Изследване на аварийността и възможностите за оптимизиране на работата на релейната защита и автоматика на помпени станции

Изследването на аварийността на такъв тип схеми започва с класификация на възможните аварии, повреди и дефекти, които биха възникнали в нормален експлоатационен режим или по време на оперативни превключвания или ремонтни дейности при работа по основна или резервна схема.



Фиг. 5.33. Изследване на аварийността на цялостана ЕСС при работа по основна схема



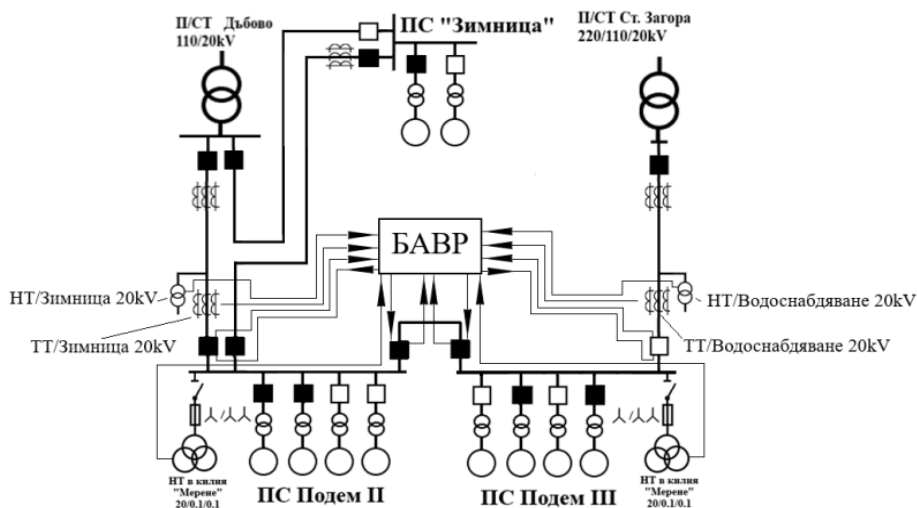
Фиг. 5.34. Изследване на аварийността на цялостана ЕСС при работа по резервна схема

На фиг. 5.33 (при работа по основна схема) и фиг. 5.34 (при работа по резервна схема) са показани опростени еднолинейни схеми на ПС „Зимница” и ПС „Ягода” Подем II и Подем III. При анализа на изложените еднолинейни схеми се обособяват няколко характерни точки, показани с цифри на схемите. При възникване на аварийно събитие в някоя от тези точки съществува реална опасност от намаляване на цялостната устойчива работа на ПС „Зимница” и ПС „Ягода”.

На фиг. 5.38 е показана адаптирана към изследваните ПС „Зимница” и ПС „Ягода” принципна схема на БАВР, заимствана от [169]. Самото микропроцесорно

устройство включва в себе си следните цифрови релейни блокове: минималнапреженово реле, посочно токово реле, ъглово напреженово реле, реле за контрол на синхронизма при включване на резервния въвод, максималнотоково и минималнотоково реле.

В този тип цифрова релейна автоматика могат да се приложат два подхода. Първият се заключава в задействане на автоматиката след пропадане на напрежението на ШС под минимално зададена стойност. Този подход крие някои особености, като удължаване на времето за АВР и прилагане на филтри за токове с обратна последователност (ФТОП), които да разпознаят и потвърдят наличието на к.с.



Фиг. 5.38. Принципна схема на БАВР

Другият подход, който е по-бърз и надежден, е следене на състоянието на блок-контактите на въводния прекъсвач, който е избран за основен, при захранването на схемата (МП на въвод „Зимница”/20 kV). При изключването на приоритетния МП автоматиката и в двата случая извършва първо проверка за наличие на напрежение по резервния въвод и след избор на точния момент за включване от релето за контрол на синхронизма се подава включвателен импулс към резервиращия МП. Времената за включване и изключване на МП предварително се осцилографират и точните им стойности се влягат в алгоритъма на автоматиката.

Изводи към Глава пета

1. Извършено е заснемане на еднолинейните схеми на изследваните електроснабдителни системи, както и вътрешните схеми на разположение на електрообзавеждането.
2. Извършен е анализ на входящите за изследването данни, идентификация на ЕСС и електромашинните агрегати. От цитираните литературни източници е събрана и класифицирана информацията относно номинални данни и параметри на разглежданите обекти.
3. Извършени са практически измервания с мрежови анализатор на процесите в установен и преходен режим на АДНСР за СН. Осъществена е визуализацията и анализ на получените от измерванията данни.
4. Определени са токовете на к.с. на отделните шинни системи в изследваните предприятия. Изчислени са нови настройки на релейната защита както на електропроводните присъединения, така и на АДНСР за СН. Изготвени са селективни карти на характеристиките на защитите, както и тяхното графично оформление.

5. Изследвани са преходните и установените процеси както в цялата ЕСС на предприятието, така и в ПА. Установена е връзката на изследваните параметри между електроснабдяване и електрообзавеждане в преходен режим.
6. Извършено е изследване на аварийността и определяне на най-опасните варианти при различни схемни решения, възможното им бързо решаване и анализ на възможността за включване на резервен източник в ЕСС на предприятието.
7. Изследвана е възможността, за въвеждане на съвременна система за БАВР и избор на конкретни схемни решения, намерили практическо приложение и доказали своята ефективност. Определени са времевите параметри, за които такъв тип системи е нужно да работят коректно при осъществяване на замяна на аварийен електропровод със съответния му резервен.
8. Анализирана е ползата от въвеждането на БАВР върху статичната и динамична устойчивост на електроснабдяването и електрообзавеждането на помпени станции с голяма значимост за сигурността на водоподаването.
9. Доказана е възможността такъв тип помпени станции да повишат своята категория като потребител на електрическа мощност и да се съкрати времето за извършване на ръчни оперативни превключвания, които в някои случаи могат да продължат недопустимо дълго време.

Заклучение

Дисертацията е в областта на научните изследвания, свързани с енергийната ефективност. Тематиката е в съответствие с приоритетните задачи на провежданата държавна политика на Република България и ЕС за повишаване на енергийната ефективност при крайно потребление на енергия и предоставяне на енергийни услуги, при запазване на нормите на екологичност, качество на произвежданата продукция и качеството на живот на хората. Фокусът е върху подобряване на енергийната ефективност на компоненти и цялостни системи с индустриално приложение.

Акцентираща се на моделни и практически изследвания с оглед оптимизиране на работни и енергийни характеристики с възможности и амбиции за получаване на научни и практически резултати, които да имат дългосрочен ефект. Съчетаното приложение на енергийно-ефективни мерки и подходящо управление и експлоатация на електрозадвижвания и съоръжения позволяват обективна оценка за потенциални възможности за спестяване на въглеродни емисии.

Получените резултати от моделни изследвания са с пряко приложение при изследване и оптимизиране на динамичните характеристики при проектиране (синтез) на силови електрозадвижвания и системи за управление от гледна точка на механична част, конструкция на електродвигател и регулирането му при различни цикли на работа. Това е в пряка връзка с евентуално прилагане на енергийно-ефективни мерки и определяне с помощта на аналитични техники на възможното енергоспестяване. Разработените и предложени модели могат да се използват освен за анализ и за намиране на решение на обратната задача – разработване на електродвигатели и управляващи системи с параметри, гарантиращи динамични процеси при определени от потребителя изисквания. Това детайлно изучаване на електромагнитните и електромеханичните процеси води до по-рационално и целесъобразно проектиране на електрозадвижвания за различни приложения.

От своя страна практическите изследвания са полезни от гледна точка на оценка на текущото състояние на електротехнически обекти и вследствие на това – оформяне на предложения за евентуални подобрения за оперативната дейност при експлоатация.

Представената научна област е в съответствие с националните, регионалните и университетски приоритети.

Популяризирането на получените резултати е на научни форуми – международни и национални конференции, както и в периодика, известна на научната общност – специализирани журнари и научни сборници, в т.ч. индексирани в световните научни бази данни.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В представената дисертация се разглеждат важни за инженерната практика проблеми, свързани с електроснабдяването и електрообзавеждането при товари средно напрежение.

Дисертацията е в областта на научните изследвания, свързани с енергийната ефективност с оглед дългосрочен ефект, т.е. подобряване на експлоатацията на съществуващи конвенционални индустриални производства с цел подобряване на характеристиките, релевантни с работоспособността.

Основно научните изследвания в дисертацията имат за обект анализа на технически обекти, работещи в динамични режими на структурата въртяща електрическа машина – задвижвания на помпени агрегати за средно напрежение, при използване на съвременна компютърна техника, измервателни прибори и софтуер.

Налице са изцяло положителни отзиви от страна на специалисти от индустрията, занимаващи се с проектиране и производство на асинхронни електрически машини за средно напрежение, а също и кадри, назначени на отговорни позиции, свързани с експлоатацията на компоненти от електроснабдяването и електрообзавеждането за средно напрежение. Мнение, подкрепящо цялостната разработка е изразено и от хабилитирани лица от държавни висши училища.

Съгласно чл. 6. ал. 3 на Закона за развитието на академичния състав в Република България, чл. 27. ал. 1 на Правилника за прилагане на Закона за развитието на академичния състав в Република България и чл. 8. т. 13 на Правилник за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в Технически университет – Габрово

ОСНОВНИТЕ НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

могат да бъдат резюмирани в следните няколко пункта:

1. **Предложени са адаптирани математически модели**, които описват и обединяват протичащите процеси и взаимодействия в конфигурацията асинхронна електрическа машина – помпен агрегат за средно напрежение. В получената система от диференциални уравнения се отчита факторът хлъзгане на обединената електромеханична система. Предложените модели могат да се използват освен за анализ и за намиране на решение на обратната задача – разработване на електродвигатели и управляващи системи с параметри, гарантиращи преходни процеси при определени от потребителя изисквания.
2. **Създадени са компютърно ориентирани алгоритми от избран подходящ за конкретните задачи софтуер за прякото приложение на моделите** за решаване на системите диференциални уравнения, описващи електромагнитните и електромеханичните преходни процеси при различни

условия и параметри на електрозадвижванията на помпени агрегати за средно напрежение.

3. **Проведени са теоретични изследвания на помпени агрегати за средно напрежение**, обусловени от факта, че понастоящем у нас, а и по света, масово са в експлоатация помпени станции, задвижвани от такива двигатели.

В тази връзка:

- Оценено е влиянието на параметрите на заместващата схема на АД върху величините на преходните процеси, изследвано е влиянието на стойността на захранващото напрежение и сумарния инерционен момент на ЕЗ върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане при АДНСР за средно напрежение;

- Изведени в симулационна среда са зависимостите на загубите на енергия от захранващото напрежение в АДНСР за средно напрежение; изследвано е съчетаното влияние на едновременното изменение на захранващото напрежение и честотата, осъществявано по определен закон, върху енергийните загуби за различни стойности на началния съпротивителен момент в мощни АДНСР за средно напрежение, управлявани с помощта на честотен преобразувател;

- Изследвано е комбинираното въздействие на началния съпротивителен момент и общия инерционен момент върху работата на ЕЗ на ПА с АД за средно напрежение;

- Получени са зависимостите на момента от захранващото напрежение, които имат голямо практическо значение при разглеждане на въпросите за пускане и евентуално регулиране на честотата на въртене на АД за средно напрежение; оценено е влиянието на отклонението на напрежението върху възникващите ударни моменти и токове и времето за пускане при работата на енергийно-ефективен АД като част от ЕЗ;

- Определен е оптимален коефициент на натоварване на АД за средно напрежение, явяващ се главен компонент от ЕЗ на ПА, чрез икономическия еквивалент на реактивната мощност; получени са аналитични изрази за хлъзгането, съответстващи на минимални загуби, минимален статорен ток, минимална консумация на енергия.

4. **Извършени са изследване и анализ на качеството на преходните процеси при самопускане на АДНСР за средно напрежение и изследване за получаване на настройките на ЦРЗ за осигуряване на самопускане чрез изчислителен път.**

5. **Изследвано е влиянието на времето върху качеството на преходния процес при протичане на АВР.**

6. **Извършен е обзор на аварийността на АДНСР за средно напрежение, както и текущото състояние на системите за диагностика и мониторинг.**

В тази връзка:

- Извършена е обобщена оценка и систематизиране на причините за възникване на неизправности от общ характер, които възникват в конструктивните части на АДНСР за средно напрежение по време на експлоатация;

- Извършен е задълбочен анализ и класификация на инвазивните и неинвазивни техники за диагностика. Направена е оценка за тяхната

ефективност при определяне на различните неизправности, както по място на възникване, така и по стадий на развитие;

- Извършена е оценка на най-съвременните методи за спектрален анализ на статорния ток. В обобщен вид са показани и математическите методологии в тази област, като са препоръчани целесъобразни от тях за използване при идентификация на различни повреди и дефекти.

7. **Проведени са измервания с цифрова процесорна техника.** Експерименталните резултати обхващат множество измервания на хармонични компоненти на напрежения и токове и изчислени стойности на общите коефициенти на хармоничното изкривяване по напрежение и ток за всяка от фазите, захранващи различни консуматори – центробежна помпа и центробежен вентилатор. Потвърждават се достоверността и адекватността на предлаганите теоретични математически модели и тяхната полезност от гледна точка на оценка на текущото състояние на електротехнически обекти и вследствие на това – оформяне на предложения за евентуални подобрения за оперативната дейност при експлоатация.

Извършени са практически измервания със съвременен диагностичен комплекс по време на експлоатация в установен и преходен режим на помпена станция с АДНСР за средно напрежение, като нагледно са показани възможностите му и за изследване на преходни режими. Изчислени са нови настройки на релейната защита както на електропроводните присъединения, така и на АДНСР за средно напрежение. Изготвени са селективни карти на характеристиките на защитите, както и тяхното графично оформление. Анализирана е ползата от въвеждането на бърза АВР върху статичната и динамична устойчивост на електроснабдяването и електрообзавеждането на помпени станции с голяма значимост за сигурността на водоподаването. Доказана е възможността даден тип помпени станции да повишат своята категория като потребител на електрическа мощност

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

A1] Svilen R. Rachev, Dimitrina Y. Koeva, and **Ivaylo D. Ivanov**. Electromechanical Model and Operating Modes of High-voltage Induction Motor Electric Drive – Part I: Impact Torque and Currents, Proceedings of 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 30 June-2 July 2016, University Politehnica of Bucharest, Romania – sponsored by IEEE (публикуван в IEEE *Xplore* https://www.ieee.org/conferences_events/conferences/xplore_conference_proceedings.htm | INSPEC Accession Number: 16563023, DOI: 10.1109/ISFEE.2016.7803188, Part Number: CFP1693Y-POD, Xplore PU Number: 7786011). ISBN 978-1-4673-9576-2.

[A2] Svilen Rachev, Cornelia Anghel Drugarin, Konstantinos Karakoulidis, **Ivaylo Dimitrov Ivanov**, Lyubomir Dimitrov. Study of Energy Losses in High-Voltage Induction Motor Electric Drive, Journal Analele Universitatii “Eftimie Murgu”. Fascicula de Inginerie, Annul XXIII, No1, 2016, pp. 273-282. ISSN 1453-7397.

[A3] Rachev S., L. Dimitrov, **I. Dimitrov**. STUDY OF RESISTING MOMENT INFLUENCE ON OPERATION OF HIGH-VOLTAGE INDUCTION MOTOR PUMP ELECTRIC DRIVE, MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS, ISSUE 1/2017, pp. 7-10. ISSN 1313-0226.

[A4] Rachev S., L. Dimitrov, **I. Ivanov**, K. Karakoulidis. STUDY THE EFFECTS OF NO NOMINAL CONDITIONS ON THE PERFORMANCE OF HIGH EFFICIENCY

INDUCTION MOTOR, 8th International Conference on Energy and Environment CIEM 2017, 19-20 October 2017, University Politehnica of Bucharest, Romania (<http://ciem2017.energ.pub.ro/>) – sponsored by IEEE (Публикувана в IEEE *Xplore* – <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=8120754>)

Conference Number	Part Number	ISBN for POD	Est. Delivery Date to IEEE
41408	CFP17L60-POD	978-1-5386-3944-3	11/17/2017

[A5] Svilen Rachev, Lyubomir Dimitrov, Konstantinos Karakoulidis, **Ivaylo D. Ivanov**, Cornelia-Victoria Anghel Drugarin. Electric Power Losses of Frequency Controlled Electric Drive with High-Voltage Induction Motor, International Conference on Applied and Theoretical Electricity 2018 (ICATE 2018), co-sponsored by the IEEE Power & Energy Society, 4-6 October 2018, Craiova, Romania. IEEE Catalog Number: CFP1899S-ART, ISBN 978-1-5386-3806-4 (included in IEEE *Xplore*: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=8533538>).

[A6] Rachev S., L. Dimitrov, **I. D. Ivanov** HARMONIC COMPONENTS OF ELECTRIC DRIVES WITH FREQUENCY CONTROL FOR CENTRIFUGAL MECHANISMS, MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS, Year XII, Issue 11/2018, pp. 463-465. ISSN 1313-0226.

[A7] Svilen Rachev, Konstantinos Karakoulidis, **Ivaylo D. Ivanov**, Lyubomir Dimitrov. Evaluation of the influence of changing the parameters of a high-voltage induction motor and the loads on the behaviour of a aggregate driven - centrifugal pump, [TIEM 2019](#) Conference in Telecommunications, Informatics, Energy and Management, 12 – 14 September 2019, Kavala, Greece, Journal of Engineering Science and Technology Review, Special Issue 2019, pp. 200-205, ISSN: 1791-2377

[A8] Rachev S., D. Koeva, L. Dimitrov, **Iv. Ivanov**. CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES – SITUATION IN BULGARIA, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, UNITECH 2019, 15-16 November 2019, pp. I-53 - I-56, Gabrovo. ISSN 1313-230X.

[A9] **Ivanov Iv.** INTEGRATED SYSTEMS FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS AND MONITORING OF THE CURRENT TECHNICAL CONDITION OF INDUCTION MOTORS FOR OWN NEEDS IN ELECTRIC POWER PLANTS, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, UNITECH 2019, 15-16 November 2019, pp. I-122 - I-129, Gabrovo. ISSN 1313-230X.

ЦИТИРАНИЯ НА ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Scopus: Ivanov, Ivaylo D.

Author ID: 57193130909

h-index 2

Rachev, S.R., Koeva, D.Y. and Ivanov, I.D., 2016, June. Electromechanical model and operating modes of high-voltage induction motor electric drive—Part I: Impact torque and currents. In 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE) (pp. 1-5). IEEE.

1. Lysenko, O.A. and Marchinskiy, I.Y., 2018, November. Multi-level Inverters Application Features for Medium Voltage Electric Drives. In *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)* (pp. 1-6). IEEE. **Scopus**

2. Pisharam, S.M. and Agarwal, V., 2018. Novel High-Efficiency High Voltage Gain Topologies for AC–DC Conversion With Power Factor Correction for Elevator Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), pp.6234-6246. **Scopus**

3. E. Vinson, A. Jurado, J. Sotelo, 2017. Estudio del Comportamiento de Máquinas Asíncronas ante Cuplas Oscilantes y de Impacto, THE 12th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2017, pp. 1-8. **Google Scholar**

4. V. E. Pavlov, I. G. Peregudova, "Study of Conditions for Group Self- Starting High-Voltage Electric Drives in Turbo Mechanisms", *Electrical Power Engineering (UralCon) 2020 International Ural Conference on*, pp. 147-152, 2020. **Scopus**

Rachev, S., Dimitrov, L., Karakoulidis, K., Ivanov, I.D. and Drugarin, C.V.A., 2018, October. Electric Power Losses of Frequency Controlled Electric Drive with High-Voltage Induction Motor. In 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) (pp. 1-6). IEEE.

1. Lialina, O., Penner, Y., Senchenko, V. and Goremikins, V., 2019, November. Visualization of the Cargo Orientation in Space Under Movement by a Tower Crane in Low Visibility Conditions. In *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering* (pp. 737-744). Springer, Cham. **Scopus**

2. Oskin SV, Miroshnikov AV. Defining Acceptable Motor Reduction in Variable-Speed Drives of Agricultural Machinery. In 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2020 May 18 (pp. 1-5). IEEE. **Google Scholar**

TITLE: MUTUAL INFLUENCE BETWEEN ELECTRICITY SUPPLY, ELECTRICAL EQUIPMENT AND MEDIUM VOLTAGE ELECTRICAL LOADS

Author: Ivaylo Dimitrov Ivanov

ABSTRACT

The PhD thesis deals with the development and analysis of engineering approaches, methods, models, algorithms and research methodologies for studying electromechanical transient processes, methods for diagnosis and control of the current state, as well as the practical determination of the possibility of self-starting of squirrel cage induction motors for medium voltage in terms of mutual influence between the power supply and the electrical equipment.

The main methods of work used in solving the tasks are related to theoretical analysis, experimental research, modeling and research in a simulation environment. State-of-the-art computer, measuring and diagnostic equipment is used.

The obtained results from model researches are with direct application in research and optimization of the dynamic characteristics at the stage of design (synthesis) of power electric drives for medium voltage and control systems from the point of view of mechanical part, construction of electric motor and its regulation at different operating cycles.

The developed and proposed models can be used not only for analysis but also for finding a solution to the opposite problem - development of electric motors and control systems with parameters guaranteeing dynamic processes under user-defined requirements. This detailed study of electromagnetic and electromechanical processes leads to a more rational and appropriate design of electric drives for different applications.

In turn, the practical research is useful in terms of assessing the current state of electrical facilities and, consequently - the formation of proposals for possible improvements to the operational activities during exploitation.

All performed activities are focused on the global orientation towards energy-efficient technical solutions – components and complete systems with industrial application.

Keywords: *electric machines, induction motor, electric drive, electromechanical system, mathematical model, transient analysis, high-voltage, pump load, frequency control, harmonic analysis, energy losses*