



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

Георги Христов Георгиев

**ЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА
НАПРЕЖЕНИЕТО В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ
МРЕЖИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на
научна и образователна степен “ДОКТОР”

Научен ръководител: доц,д-р инж. Стоян Андреев Георгиев

Рецензенти:

1.
2.

ВАРНА, 2016 Г.

Дисертационния труд е обсъден на 04.05.2016г. в катедра „Електроенергетика“ и насочен за защита.

Докторантът работи в ЕСО ЕАД.

Автор: Георги Христов Георгиев, postbox27@yahoo.com

Заглавие: Ефективно управление на напрежението в електрическите мрежи



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

Георги Христов Георгиев

**ЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА
НАПРЕЖЕНИЕТО В ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ
МРЕЖИ**

АВТОРЕФЕРАТ
на дисертация за получаване на
научна и образователна степен “ДОКТОР”

Научен ръководител: доц.д-ро инж. Стоян Андреев Георгиев

Дисертационният труд съдържа 211 страници, включително 85 фигури, 111 таблици, и 2 приложения (69 страници), и е оформен в 4 глави, Заключение и списък на използваната литература от 60 заглавия, от които 32 на кирилица и 28 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от часа в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

Характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблема

Управлението на нивата на напрежение в електроенергийните системи има пряко икономическо изражение, свързано както със загубите на мощност и енергия, така и с ефективността на работа на потребителите. Важен фактор за управление на нивото на напрежение при потребителите е централизираното управление в разпределителните мрежи, осъществявано чрез автоматични регулатори на напрежение (АРН), въздействащи на стъпални превключватели на коефициента на трансформация на регулируеми под товар трансформатори (РПТ). Промените на потребяваната мощност в дадена разпределителна мрежа и на напрежението на хранящата система имат характер на нестационарни случайни процеси. Тези фактори предизвикват промени в нивата на напрежение в мрежата, което изисква адекватна и навременна реакция на АРН за компенсирание на тяхното влияние. Едновременно с това, е налице ограничение на за средната честотата на комутации на стъпалата на регулационните намотки на РПТ, свързано с износването на комутационната система и високата цена на нейният ремонт. Наличието на случайни по характер фактори и на комутационни ограничения правят проблема за икономически ефективно управление на напрежението комплексна оптимизационна задача. Стремещт за по-добро решение на тази задача е винаги актуален, тъй като предлага значителен икономически ефект.

Проблем

В качеството на информационна база за взимане на решение за комутация съществуващите АРН използват комбинация от *прагов елемент* и *блок за времезакъснение* (евентуално заедно с блок за форсиране). Тази конструктивно решение е останало непроменено досега, въпреки напредъка на технологиите от времето на електромеханичните конструкции до съвременните компютърни системи. Заради това общо конструктивно решение, регулаторите използващи комбинация от *прагов елемент* и *блок за времезакъснение* тук са наречени *регулатори от класически тип*. Недостатъците на този тип регулатори са:

- решение за комутация се изпълнява само след като процесът на отклонение на напрежението е излязъл извън границите на нечувствителност и е създадена възможност за подаване към потребителите на напрежение с отклонение по-голямо от нормативно допустимото. Блоковете за форсиране само съкращават времето на подаване на такова напрежение, но не го предотвратяват, тъй като те също действат след реализация на нарушението;
- недостатъчна информационна база за взимане на решение основана само върху изпълнението на логическо неравенство и настроено времезакъснение. Комбинацията *прагов елемент-блок за закъснение* позволява реализация само на “наивен” тип прогноза (очаква се липса на съществена промяна на вече регистрираните основания за решение след момента на реализацията му), основана върху отрязък от време, несъизмеримо по-малък от желаните времена на валидност на решенията предвид необходимостта от икономия на комутационния ресурс на изпълнителния механизъм;
- липса на възможност за автоматична адаптация на настройките на блоковете определящи решението за комутация към нестационарното в дългосрочен план поведение и факторите определящи промените в нивата на напрежение.

Цели и задачи на изследването

Цел на изследването е създаване на нов тип АРН със следните характеристики:

- Информационна база основаваща се на прогноза за развитие на процеса на отклонение на ефективната стойност на напрежението от желаната, с времеви хоризонт съизмерим с желаното време на валидност на решенията. Времеви хоризонт на прогнозиране следва да е от порядъка на 0,5-2 часа.
- Адаптивна промяна на заложените в него модели за прогнозиране, за да е възможна продължителна адекватна работа без необходимост от пренастройка.

- Алгоритъм за взимане на решения, осъществяващ стремеж за минимизиране на средната стойност на квадратите на отклоненията на напрежението от зададеното като настройка, с минимално възможен брой комутации, при ограничителни условия определени от следните настройки:
 - а) граници на нормално изменение на напрежението спрямо зададеното, които се допуска да бъдат нарушени с вероятност по-малка и или равна на нормативно допустимата;
 - б) допустима вероятност за нарушение на граници на нормално изменение на напрежението;
 - в) граници на изменение на напрежението, които не следва да бъдат нарушавани от нито една негова ефективна стойност.

Разработката на такъв, нов тип АРН, е основната цел на настоящата дисертация. Поставените задачи за реализация на целта, са:

- Подбор на алгоритъм за оперативно прогнозиране, пригоден за вграждане в автоматична система за управление или разработка на такъв алгоритъм при липса на подходящ. Тъй като не беше открит подходящ алгоритъм за прогнозиране, е разработен такъв, като анализа на въпроса и резултатите от разработката са изложени в Глава II.
- Тестване на разработения алгоритъм за прогнозиране с насоченост на тестовете към установяване на пригодността му за вграждане в автоматична система за управление.
- Разработка на алгоритъм за взимане на решение за промяна на коефициента на трансформация на силов трансформатор, с отчитане на поставени критерии за технико-икономическа оптималност на решението, на несигурността на осигурената от прогнозите информация и на нормативните изисквания за качество на напрежението.
- Тестване на разработения алгоритъм за АРН.

Обект и предмет на изследване

Обект на изследване са:

А) Работата на алгоритъм за оперативно прогнозиране на процеса на електропотребление.

Предмет на изследване са: Функции на разпределение на грешките на прогнозиране и техните параметри; Корелационни зависимости на грешките на прогнозиране; Стационарност на процеса на прогнозиране.

Б) Разлики в качеството на управление на напрежението в разпределителна мрежа чрез предложен нов тип АРН и чрез регулатор от класически тип. Предмет на изследване са:

- граници на изменение на напрежението и вероятност за тяхното нарушение;
- икономическо влияние върху потребителите, оценено чрез интегрален показател за качество на напрежението - критерий на Аере и Госан;
- брой комутации.

Методи използвани при изследването

Използвани са:

- редове на Фурие;
- теория на вероятностите - основни закони и теореми, Теорема на Бейс, случайни процеси;
- непараметрични статистически методи;
- методи за клъстеризация на данни;
- размита логика (fuzzy logic);
- теория на решенията, принципи за взимане на решения в условия на риск.

Място на изследване

Изследванията са провеждани чрез компютърни симулации.

Научна новост на изследването

Научната новост се състои в :

Създаден е нов подход за моделиране на товаров график с математическо описание на тяхната геометрична форма в безразмерен вид чрез спектъра на първата производна на апроксимацията на графика с ред на Фурие. Създаден е и критерий за отхвърляне на „несъществени“ за апроксимацията членове на реда на Фурие. Критерия комбинира непраметричен метод за статистическа проверка на хипотези с априорни съображения за желаната точност на апроксимация, получени от анализ на връзката между качеството на апроксимация и качеството на управление.

Създаден е нов тип структурно и параметрично адаптивен алгоритъм за оперативно прогнозиране, със структура на моделите необвързана със стъпката на дискретизация или с аксиоми за разделение на графиците по типове.

Формулирана е методика за проверка на работата на алгоритми за прогнозиране, включваща както проверка чрез извадки от данни получени от реални обекти, така и планиран експеримент чрез изкуствено генерирани тестови поредици, съдържащи всички видове смущения с практическо значение.

Създаден е нов тип алгоритъм за АРН, използващ прогнози и отчитащ риска от неправилно решение, вследствие на несигурността на прогнозите и на възможността за неадекватна работа на използваният алгоритъм за прогнозиране. Алгоритъмът позволява управление на баланса на икономическите интереси на потребителите и на оператора на мрежата.

Практическа ценност на изследването

Практическата ценност на изследването се състои във възможността за директно приложение на създадените алгоритми и подходи в практиката, проверено с прилагането им в компютърни програми.

Разработения алгоритъм за оперативно прогнозиране е приложим самостоятелно извън сферата на автоматичното регулиране на напрежението. Като негова практически полезна черта може да се посочи, че прогнозите се придружават с информация на тяхната несигурност, описана с емпирично получена функция на разпределение на грешките от прогнозиране.

Алгоритъмът за АРН не е обвързан неразривно с конкретния алгоритъм за прогнозиране разработен в дисертацията. Той е самостоятелно приложима разработка за взимане на решения при дискретно управляващо въздействие (комутация) при наличие на ограничение за честотата на подаване на команди. Предпоставките за приложение на разработения алгоритъм са:

- Наличие на критерий(критерии) за оценка на ползите и вредите от избора на всяка алтернатива за комутация;
- Наличие на серия от прогнози за стойностите на всички участващи в критерия за оценка на алтернативите за комутация случайни фактори, като всяка от прогнозите е придружена с оценка на нейният доверителен интервал.

Минималният обем предпоставки позволява приложение в по-широк обхват от ситуации от пряко разглеждания в дисертацията.

Апробация на изследването

Предложените алгоритми и подходи са апробирани чрез разработени на тяхна основа компютърни програми. Програмите са тествани както чрез подаване както записи от реални мрежи, така и в условията на планиран експеримент чрез изкуствено създадени поредици съдържащи всички счетени за практически интерес потенциално проблемни ситуации.

Части от дисертацията са докладвани и публикувани в:

- Конференция "Електроенергетика'2006", ТУ Варна;
- Годишник на ТУ Варна 2007г.;
- Годишник на ТУ Варна 2009г.;
- сп. "Енергетика", бр. 5 , НЕК ЕАД, София, 2011г.;
- международен научен симпозиум "Electrical Power Engineering 2014", Електрофакултет към ТУ Варна.

Публикации по дисертационния труд

Публикациите свързани с дисертационният труд са 6 броя, от които 3 самостоятелни.

Съдържание на дисертационния труд

УВОД

Съдържа изложение на задачата за управление на качеството на нивото на напрежение, както от гледна точка на нормативни изисквания, така и от гледна точка на икономическа ефективност. Роля на АРН за управление на качеството, ограничения произтичащи от дискретният характер на управляващото въздействие и на необходимостта от икономия на комутационен ресурс. Изложено е описание на целите и задачите на дисертацията, както и на структурата на изложението.

ГЛАВА I Анализ на проблемите при централизирано автоматичното управление на отклонение на напрежението в мрежи средно напрежение.

1.1. Оценка на качеството на напрежението от гледна точка на икономически ефект.

Интегрален критерий за качество на напрежението.

Знака и големината на отклонението на напрежението спрямо номиналното определят икономически ефект както за ползвателите, така и за оператора на мрежата, като този ефект може да бъде значим дори когато отклонението е в нормативно допустимите си граници.

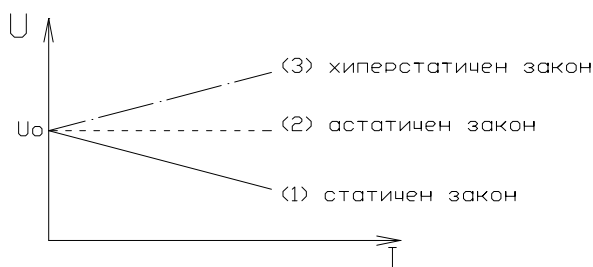
Интегралните критерии за качество на напрежението са известни от литературата по въпроса и тук са ползвани като даденост. Тези критерии се основават на зависимостта на икономическите характеристики на работата на консуматорите от отклонението на напрежението от някаква негова стойност приета за базова. За база може да се избере номиналното напрежение или оптималното за потребителите напрежение. Интегралните критерий са резултат от развитие в ред на Тейлор на функция на икономическите загуби за потребителите от отклонението на напрежението ("V"). След допускания и интегриране за период "T" се достига до критерий от вида:

$$I_i = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_i^2(t) dt$$

Интегралните критерии за качество на напрежението определят стремежа за минимизиране на средната стойност на квадратите на отклонение на напрежението като основен принцип за подобрене на качеството на напрежение по отношение на икономическия ефект за потребителите.

1.2. Принципи на регулиране на напрежението. Регулиране по насрещен принцип и закон за управление

Управление на напрежението на шините на подстанция захранваща дадена мрежа, насочено към компенсиране на загубите на напрежение предизвикани от потребляемия ток се нарича регулиране по насрещен принцип. Този принцип гарантира дава възможност за минимизиране на отклоненията на напрежение във възлите от номиналното. За целите на управление на напрежението, електрическата мрежа може да се моделира с електропровод, в чиито край е концентриран целият нейн товар. При управление по насрещен принцип, се цели поддържане на напрежението в края на моделиращият електропровод постоянно и равно на зададен от оператора на мрежата стойност (U_0). Възможни са три начина на реакция на потребляемия ток от мрежата ток:

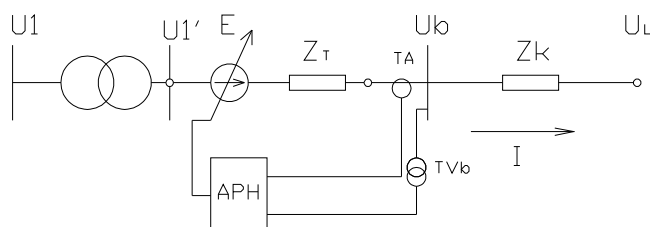


фиг. 1.1 Видове закони на управление на напрежението на шините на подстанциите в зависимост от потребляемия ток от мрежата ток.

За основен закон е приет хиперстатичният: $U_b = U_0 + I \cdot Z_k$, като другите два закона са приети за негови производни форми.

1.3. Принципи на изграждане на автоматични регулатори на напрежение. Познати конструкции

Управлението на РПТ чрез АРН е съгласно следната функционална заместваща схема:



Фиг.1.3 Функционална заместваща схема на РПТ снабден с АРН

където с управляемия източник на ЕДН “Е” е моделиран ефекта от отклонението на коефициента на трансформация на РПТ от номиналния. Със Z_T е моделиран импеданса на силовият трансформатор, а със Z_k , моделиращ мрежата електропровод.

Съществуващите конструкции на АРН използват в качеството на основен критерий за взимане на решение за комутация едновременното изпълнение на следните неравенства:

$$|U_b - (U_0 + I \cdot Z_k)| > \varepsilon$$

$$t > \tau,$$

където ε и τ са параметри на настройка. ε - праг на нечувствителност; τ - времезакъснение. Времето t е времето за което се изпълнява първото неравенство. Налице са конструкции с ускорение, поставящи времезакъснението τ в зависимост от други фактори, като например големината на отклонение на напрежението и др.подобни.

1.4. Проблеми на съществуващите принципи за изграждане на АРН и насоки за подобрене.

Разгледани са съвременни конструкции на АРН предлагани от водещи в световен план фирми. Разгледани са някои публикации свързани с развойна дейност в тази област. Обобщено е, че при съществуващите АРН се разполага само с две средства за да се отговори на динамиката на промяна на факторите, които определят отклоненията на напрежението: избор на праг на нечувствителност ε и на времезакъснение τ . Тези две средства формират информационна база за взимане на решение за комутация. Регулатори с такава база са наречени регулатори от „класически тип”. Налице е значителна непропорционалност между диапазона на стойности на τ (от секунди до минути) спрямо желаното минимално средно време между комутациите (от 0.5 до 1-2 часа). Липсват обективни методики за избор на стойности на параметрите на информационната база, обвързани с целите на управление и с изискването за икономия на комутации. Налице са само емпирични указания.

1.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА I

Формулирани са три извода свързани с важноста на проблема, оценка на текущото техническо ниво и възможностите за неговото развитие. Отправена е критика, че описаната информационната база на регулаторите от класически тип не кореспондира пряко с изискването за осигуряване от оператора на мрежата на вероятност за подаване на некачествено напрежение, по-малка от нормативно посочена стойност, или с идеята за управление насочено към икономическа ефективност чрез минимизиране на средната стойност на квадратите на отклоненията на напрежението.

Основен извод е необходимостта от разработка на нов тип АРН, с информационна база формирана от прогнози, обхващащи желаното минимално средно време между комутациите и критерии за взимане на решение за комутация пряко обвързани с нормативните изисквания за качество на напрежение, критерий за икономическа ефективност, стремеж за минимизиране на броя на комутациите. Посочени са основната цел на дисертацията и задачите, които следва да се решат за реализация на тази цел.

ГЛАВА II Алгоритъм за оперативно прогнозиране

На прогнозиране подлежат тока през силовият трансформатор (I), хранващ мрежата обект на управление, напрежението на хранващата система (U_s) и ъгълът между тях (ϕ).

2.1. Основни изисквания към алгоритъм за прогнозиране предназначен за автоматично централизирано управление на напрежението

Електропотреблението е нестационарен случаен процес. За да бъде годен за вграждане в система за автоматично управление даден алгоритъм за прогнозиране на свързаните с процеса на електропотребление режимни параметри следва да отговаря на следните условия:

Адаптивност. В алгоритъма да бъде заложена възможност за автоматична структурна и параметрична адаптация на използваните за прогнозиране модели, като скоростта на адаптация трябва да съответства на скоростта на промяна на обекта на моделиране. В идеалния случай не трябва да е необходимо да се задава каквато и да било фиксирана структура на моделите, тя следва да се извлича непосредствено от постъпващите в хода на работа данни;

Универсалност. Алгоритъмът да се основава на минимално възможен брой предпоставки и аксиоми. В идеалния случай не следва да се използват предпоставки за вида или параметрите на разпределение на случайните величини или за релациите между тях. Белег за обема предпоставки в един алгоритъм, е броя параметри на начална настройка, които се задават от оператора;

Ниска цена на придобиване и експлоатация. Алгоритъмът да изисква минимален брой източници на информация. Параметрите за настройка да се определят въз основа на изследвания, с възможно най-ниска цена, измерена в средства и време.

Робастност по отношения на смущения в потока от входни данни - Алгоритъмът да притежава устойчивост при единични случайни големи смущения (аутлайери) и да запазва работоспособност при прекъсвания в постъпващия поток от данни.

2.2. Известни алгоритми за прогнозиране и проблеми. Методологичен анализ.

Сред проучените публикации не е открит алгоритъм за прогнозиране, годен за влагане в система за автоматично управление съгласно описаните изисквания и желани характеристики.

Сред основните недостатъци са: недостатъчен акцент върху избора на обем на ретроспективната извадка и върху предварителната обработка на ретроспективната информация, структурна обвързаност на алгоритмите и математическите модели с аксиоматични презумпции за разделени на графици по категории и/или обвързаност със стъпката на дискретизация. Не са намерени и удовлетворителни решения за прогнозиране на така наречените “специални” дни.

При проучване на публикациите, е счетено че оценката на пригодността на алгоритмите е затруднена и от неудовлетворителните обеми на тестовете и описания на резултатите, както е констатирано и от други автори в посветени на тази тема проучвания. От анализа на този проблем и от фокуса върху приложение в система за управление е счетено, че изходните резултати на даден алгоритъм за прогнозиране освен самата прогноза, задължително трябва да включват и оценка на нейния доверителен интервал чрез емпирична оценка на функцията на разпределение на грешките, вместо чрез аксиоматично предписан закон разпределение.

От направени литературен обзор е счетено, че липсва единен алгоритъм способен да се справи без човешка намеса с добре известната нестационарност на процеса на електропотребление, което е и основното препятствие да бъде ползва някой от известните алгоритми в система за автоматично управление. За синтез на такъв алгоритъм са потърсени подходящи методи и концепции от известните алгоритми.

Счетено е, че справянето с проблема с нестационарността следва да се търси в самата представа за процеса на електропотребление. В известните алгоритми по аналогия с

моделирането на физични процеси математическите модели описват връзки между фактори и стойности на процеса в конкретни моменти от време. Предложено е вместо това, процеса да се разглежда като съставен от серия от сценарии, продиктувани от шаблонни социално-технологични реакции на потребителите на фактори от средата им, по същество стационарни, докато не бъдат подменени с друг набор от реакции в резултат на социални или технологични промени.

От известните алгоритми са сметени за подходящи следните основни идеи: Моделиране на графиците с ред на Фурие; Използване на мултимоделен алгоритъм; Прилагане на Теоремата на Бейс за избор на конкретен модел за прогнозиране.

2.3. Разработка на алгоритъм за прогнозиране и на неговите елементи

Предложен е алгоритъм за оперативно прогнозиране синтезиран съгласно изложените принципите за универсалност, адаптивност, минимална цена за придобиване и експлоатация, робастност по отношения на смущения в потока от входни данни. Алгоритъма включва следните основни стъпки:

- Запис на ретроспективна извадка на процеса и предварителна обработка, включваща: Филтриране и моделиране на графиците в нея чрез апроксимация с ред на Фурие; Преобразуване на апроксимацията на всеки график в безразмерно описание на формата му като геометрична фигура-модел на шаблонно поведение на процеса; Отстраняване на „несъществени“ за описанието на всеки график членове на реда на Фурие чрез комбиниран неаксиоматичен критерий.
- Разделение на извадката на хомогенни по форма на графиците участъци чрез алгоритъм за онлайн клъстеризация. Резултата е итеративно обновявана с всеки нов график база данни от N на брой модела на шаблонно поведение на потребителите, като „ N “ не се определя априори, а въз основа на решаващо правило. Към базата се добавя още един модел, извлечен от непосредствената предистория на процеса – използван е полином с адаптивно променящи се коефициенти. Този допълнителен модел допълва базата от N модела до пълна група случайни събития, като играе ролята на модел на ненаблюдаван до момента шаблон на поведение -модел на „непредсказуемост“.
- Избор чрез теоремата на Бейс на подходящ модел за текущо прогнозиране от наличните $N+1$ модела и изготвяне на прогноза чрез комбиниране на текущо измерване с предвижданията на избраният модел за прогнозиране.
- Допълване на базата от модели, с асоцииране към всеки модел на емпирична функция на разпределение на грешките на прогнозиране, наблюдавани при използването му.

Разработеният алгоритъм е едновременно структурно и параметрично адаптивен. Не е обвързан със стъпката на дискретизация или с прогнозираната величина, което го прави пригоден за прогнозиране и на трите величини $-U_s, I, \varphi$. Въз основа на алгоритъма е разработен софтуер.

2.4. Тестване на разработения алгоритъм за прогнозиране

За апробация на предложения алгоритъм на прогнозиране е приложена тестова програма съгласно предложена от автора методика, включваща използване на:

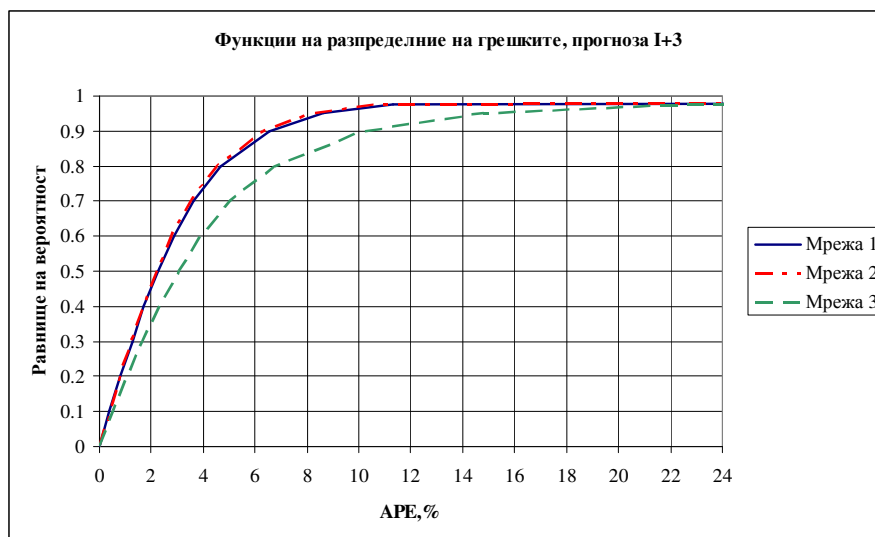
- *пасивен експеримент* – ползвани са тестови поредици взети от записи на пълната мощност употребявана от съществено различаващи се по характера на преобладаващия товар мрежи. Използвани са записи с дължина по 1 календарна година, взети от 3 различни мрежи;
- *планиран експеримент* - ползвани са изкуствено създадени поредици, състоящи се от несмутена (еталонна) поредица от еднакви денонощни графици и от създадени на нейна основа поредици, съдържащи различни видове смущения в потока от входни данни – прекъсвания с различна дължина, аутлайер, график съществено отличаващ се от всички графици от наблюдаваната предистория.

Обработката на резултатите включва:

- описателна статистика на качеството на осигурените от алгоритма прогнози;
- анализ на наблюдаваните грешки на прогнозиране като времеви ред - корелационни зависимости, проверки за ергодичност и стационарност.
- проверка на качество на работа на алгоритма за априорно зададени категории графици с цел илюстрация на работата на алгоритъмът за често срещани в публикациите

- априорно определени категории графици, като номер на денонощието от седмицата или вид на деня - работен, почивен, специален;
- проверка на качество на работа на алгоритма в условия на планиран експеримент чрез сравнителен анализ.

Графична илюстрация на функциите на разпределение на относителните процентни грешки (*APE* – *Absolute Percentage Error*) при прогнозиране половин час напред (3 стъпки на дискретизация по 15 минути), получена от извадки с дължина 1 година, е дадена на фигура II-5:



фиг. II-5 Функции на разпределение на грешките при прогнозиране на стойност отдалечена в бъдещето на три стъпки на дискретизация (I+3)

Част от описателната статистика получена на едногодишна база за прогнози от 15 минути (I+1) до два часа напред (I+8) има следният вид:

МРЕЖА 1 - КОМУНАЛНО-БИТОВ ТОВАР, 2008г.								
Характеристика на разпределението на APE	I+1	I+2	I+3	I+4	I+5	I+6	I+7	I+8
Брой отчети в тестовото множество	35136	35136	35136	35136	35136	35136	35136	35136
Общ брой направени прогнози	35070	35069	35068	35065	35064	35061	35045	35028
средна стойност (MAPE),%	1.54	2.45	3.12	3.69	4.24	4.75	5.17	5.49
медиана, %	1.14	1.79	2.24	2.58	2.92	3.2	3.47	3.67
максимална стойност, %	110.061	204.177	191.175	218.146	214.545	234.503	225.723	228.618
минимална стойност, %	0	0	0	0	0	0	0	0
стандартно отклонение, %	1.65	2.74	3.53	4.44	5.31	6.18	6.84	7.22

В таблици II-9 с II-11 са дадени част от резултатите от проведения планиран експеримент:

Таблица II-9 Планиран експеримент. Медиани на разпределението на грешката.

Медиана, [%]									
Поредица, тип	График №	I+1	I+2	I+3	I+4	I+5	I+6	I+7	I+8
Последователност от еднакви графици, без смущения	8	0.483	0.513	0.372	0.404	0.379	0.481	0.442	0.427
Прекъсване от един график	8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Прекъсване от един час	8	0.481	0.513	0.376	0.406	0.435	0.497	0.46	0.468
График с аутлайер	8	0.499	0.523	0.372	0.416	0.403	0.484	0.454	0.451
Заместване на един график с нов	8	1.36	2.71	3.784	4.974	5.959	8.205	9.782	12.246

Таблица II-11 Планиран експеримент. Пределни грешки.

Пределна грешка - Квантил за равнище на вероятност 0.95, [%]									
Поредица, тип	График №	I+1	I+2	I+3	I+4	I+5	I+6	I+7	I+8
Последователност от еднакви графици, без смущения	8	1.349	1.43	1.67	1.379	1.427	1.825	2.093	2.015
Прекъсване от един график	8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Прекъсване от един час	8	1.411	1.572	1.81	1.75	1.791	1.894	2.185	2.031
График с аутлайер	8	1.7	2.296	2.607	1.945	1.91	2.029	2.35	2.309
Заместване на един график с нов	8	5.24	10.141	16.256	25.432	82.566	207.207	215.884	227.599

Въз основа на резултатите от всички проведени тестове са направени обобщения, анализ и заключения. Счетено е, че е налице условна стационарност на оценките на пределните грешки по хомогенни групи графици, което дава възможност за достатъчно адекватно отчитане на риска от неправилни решения. Условието от което зависи верността на хипотезата е стойността на коефициента на експоненциално претегляне, който се променя автоматично от алгоритъмът на адаптивен принцип. Планираните експерименти с изкуствено създадени поредици не показват наличие на значими проблеми в работата на алгоритъма при възникване на съществени смущения или при неочаквана поява на нов тип график, липсващ в наличната база данни на алгоритъма.

2.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА II

Направени са три основни извода. Съгласно изводите разработения алгоритъм за прогнозиране е счетен за годен за внедряване в автоматични системи за управление с универсално приложение и тази задача на дисертацията се счита за изпълнена.

ГЛАВА III Алгоритъм на APH с прогнозиране за ефективно централизирано управление на отклоненията на напрежението в мрежи средно напрежение

3.1. Постановка на проблема

Разгледано е насрещно регулиране по хиперстатичен закон. Решенията, взимани от регулатора са сведени до избор между три алтернативи:

- нулева алтернатива (A_0) – комутаторът на стъпалата на отклоненията от регулационната намотка на силовият трансформатор остава в покой;
- алтернатива „увеличение” (A_{+1}) – комутаторът на стъпалата на отклоненията от регулационната намотка се превключва с едно стъпало в посока на увеличение на напрежението на шините;
- алтернатива „намаление” (A_{-1}) – комутаторът на стъпалата на отклоненията от регулационната намотка се превключва с едно стъпало в посока на намаление на напрежението на шините.

Наличието на прогнози дава възможност за отчитане на ефекта от избор на дадена алтернатива не само за текущия момент, както при регулаторите от класически тип, а и за интервал от бъдещето. Това дава възможност, задачата за управление на напрежението чрез избор между тези алтернативи, да се дефинира като оптимизационна задача. В качеството на целева функция е заложен стремеж към минимизиране на средната стойност на квадратите на отклоненията спрямо номиналната стойност, при стремеж към минимизиране на броя на комутациите. Нормативните изисквания за качество на напрежението са в ролята на ограничителни условия. Към дефиницията на проблема е прибавена необходимостта от отчитане на риска от неправилно решение поради несигурността на прогнозите. Счетено е, че тъй като с отдалечаване на прогнозния момент в бъдещето несигурността на осигурената от прогнозите информация расте, то е подходящо използване на квазиоптимален “алчен” (“greedy”) алгоритъм вместо динамично оптимизиране.

Счетено е, че при такава задача пълна обективност и детерминираност на решенията не е възможна, и е подходящо използването на „размита” логика („fuzzy logic”).

Счетено е, че за да бъде решена дефинираната задача, е необходимо избора на алтернатива да осигурява изпълнение на следните условия:

- *Условие 1.* Средната стойност на отклонението на напрежението в края на моделиращият мрежата електропровод спрямо желаното напрежение на празен ход (V_k) да се стреми към 0, с точност до зададен праг на нечувствителност (ϵ);
- *Условие 2.* Вероятността някоя от моментните стойности на напрежението в края на моделиращият мрежата електропровод да бъде извън интервала, определен от допустимите горна и долна граница, да бъде по-малка от предписана от оператора стойност. Изключение от това условие са случаите на техническа невъзможност,

когато регулационният обхват на коефициента на трансформация е недостатъчен за отработване на смущенията;

- *Условие 3.* Разсейването във времето на отклонението на напрежението спрямо желаното напрежение на празен ход в края на моделиращият мрежата електропровод V_k да бъде минимално;
- *Условие 4.* Очакваният интервал на валидност на алтернативата да е максимално дълъг.

3.2. Теоретичен модел на решенията

Разгледано е насрещно регулиране по хиперстатичен закон, като ефекта от промяна на коефициента на РПТ е моделиран чрез регулируем източник на електродвижещо напрежение e_U , чиято стойност зависи едновременно от приетото за базов вектор напрежение на захранващата система U_s и от избора на конкретна алтернатива за комутация.

Определяне на напрежението U_k в края на моделиращият мрежата електропровод е извършено чрез загубата на напрежение:

$$U_k(t) = U_s(t) + e_U(U_s(t)) - \operatorname{Re}\{\dot{I}(t) \cdot (\dot{Z}_k + \dot{Z}_T)\} \quad (3.5)$$

$$U_k(t) = U_s(t) + e_U(U_s(t)) - I(t) \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot (R_k + R_T) - I(t) \cdot \sin(\varphi(t)) \cdot (X_k + X_T) \quad (3.6)$$

С отчитане на дискретния характер на избор на алтернатива и аналоговия на изменение на режимните параметри U_s , I , φ , модела добива вида:

$$U_k(t) = U_s(t) + e_U(U_s, v_T(t_{i-1})) - I(t) \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot (R_k + R_T) - I(t) \cdot \sin(\varphi(t)) \cdot (X_k + X_T),$$

където с v_T е означена количествена оценка за степента на изменение на коефициента на трансформация от избора на дадена алтернатива в момент t_{i-1} , предхождащ текущият момент t .

За всяко от четирите условия, които следва да удовлетворява избора на алтернатива, е намерено математическо изражение. Като изходни данни се ползват текущите измервания и осигурените от алгоритма за прогнозиране стойности на режимните параметри U_s , I , φ за всеки дискретен момент от време, от настоящето до хоризонта на прогнозите, като всяка прогноза е придружена с емпирична оценка за функция на разпределение на абсолютните относителни процентни грешки на прогнозиране.

За отчитане на несигурността на прогнозите при оценка на ефекта от реализация на алтернативите са въведени следните инструменти:

- индикаторна функция за отчитане дали вариацията на прогнозите в рамките на доверителните им интервали за даден конкретен прогнозен момент може да доведе до неправилно решение;
- параметър *Хоризонт на решенията*, лимитиращ разглежданията до момент от бъдещето разположен между настоящето и хоризонта на прогнозите, избран така, че да се гарантира вероятност за неправилно решение по-малка от предписана стойност. При свиване на хоризонта на решенията до 0, регулатора се свежда до регулатор от класически тип;
- тегловен коефициент за претегляне на информацията предоставена от прогнозите, като стойностите на коефициента са монотонно намаляваща функция на отдалечеността на прогнозните моменти от настоящето. Тегловният коефициент дава приоритет на алтернативите, осигуряващи установяване на желано ниво на напрежението за по-близо разположените до настоящето моменти. Така се реализира стремеж да не се допуска текущо нарушение на качеството на напрежението, в опит да се чака твърде дълго за настъпване на по-изгоден момент за комутация. Този коефициент е и евристика, отчитаща намаляващата увереност в адекватността на модела, по който се правят прогнозите за моменти все по-отдалечени от настоящето. В този смисъл тегловната функция е опит да се отговори на риска от реализации на грешки от II-ри род - неадекватно избран модел;
- верификация на взетото решение за комутация преди неговото изпълнение, чрез проверка дали при текущите измервания то няма да доведе до незабавно нарушаване на предписани от оператора на мрежата допустими граници на изменение на

напрежението на шините на подстанцията. Механизма на верификация на решенията е въведен за защита срещу грешки от II - ри род.

Ефекта от избора на дадена алтернатива се оценява по всяко условие. Въз основа на тези оценки, във вид на логическо съждение е получена комбинирана оценка, чието заключение определя степента на истинност на твърдението, че дадена алтернатива е оптималният избор за текущия момент. Математическото описание на съждението е направено чрез апарата на размитата логика ("fuzzy logic"). Използвани са неаксиоматични функции на членство.

Условия 3 и 4 формират икономически контекст на решението за комутация. Условие 3 чрез интегралния показател на качеството е свързано с разходи на потребителите от работа при напрежение различно от оптималното. Условие 4 е свързано с разходите заплащани от оператора на мрежата за техническа поддръжка на комутационната система за превключване на стъпалата на регулационните намотки на РПТ. Двете условия са противоречиви. По тази причина е решено, в логическото съждение за оценка на степента на истинност на твърдението, че дадена алтернатива е оптималният избор за текущия момент да се въведе *Параметър на баланса на решенията* ("b"). Чрез този параметър се регулира тежестта на влияние на всяко от двете условия при формиране на крайната оценка на всяка алтернатива. Параметърът на баланса на решенията е настройка на регулатора, задавана от оператора на мрежата. Стойността му е число между 0 и 1, отразяващо в „размит“ (fuzzy) вид степента на желаност на алтернативи, водещи до по-добро качество на напрежението за сметка на по-голям брой комутации.

Съждението за оценка на увереността, че алтернатива „A_i” е оптимален избор за текуща комутация има следният вид:

$$Tf_i = (1 - b)TfA_i + b.TfB_i, \quad (3.21)$$

където:

- Tf_i - степен на истинност на твърдение, изразяващо увереността в съждението, че дадена алтернатива "i" е оптималният избор по отношение на технико-икономическа ефективност;
- TfA_i - твърдение „А”, предпоставка за оценка на алтернатива „i” като оптимална (съждение за оценка по Условие 4, със степен на истинност между 0 и 1);
- TfB_i - твърдение „Б”, предпоставка за оценка на алтернатива „i” като оптимална (съждение за оценка по Условие 3, със степен на истинност между 0 и 1);
- „b” е параметър на баланса на решенията за определяне на тежестта на всяка от предпоставките „А” и „Б” при формиране на стойността на заключението (Tf_i).

3.3. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА III

В изводите към Глава III, предложената постановка на проблема и разработения теоретичен модел на решенията са сведени до описание на алгоритъм за АРН, използващ прогнозиране за взимане на решение за комутация. Въпреки, че изложението е направено въз основа на хиперстатичен закон, алгоритмът е приложим и за мрежи, в които се налага динамична промяна на законите на управление. Към адаптивните свойства на вградения алгоритъм за АРН алгоритъм за прогнозиране разгледан в Глава II, е добавено още едно ниво на адаптивност: Чрез текущо определяна стойност на параметъра *Хоризонт на решенията* е осъществена адаптация на процеса на взимане на решения към текущата несигурност на моделите за прогнозиране.

Алгоритмът за взимане на решения не е неразривно обвързан с разработения в настоящата дисертация алгоритъм за оперативно прогнозиране или с приложение само към мрежи без генериращи източници. Алгоритмът е самостоятелно приложим за взимане на решение за избор на дискретно управляващо въздействие (команда за комутация) при наличие на ограничение за честотата на подаване на команди. Предпоставките за приложение на разработения алгоритъм са:

- Наличие на критерий(критерии) за оценка на ползите и вредите от избора на всяка алтернатива за комутация;

- Наличие на серия от прогнози за стойностите на всички участващи в критерия за оценка на алтернативите за комутация случайни фактори, като всяка от прогнозите е придружена с оценка на нейният доверителен интервал.

Минималният обем предпоставки позволява приложение в по-широк обхват от ситуации от пряко разглеждане в дисертацията.

Разработеният алгоритъм реализира основната цел на дисертацията.

ГЛАВА IV Изпитания на разработения алгоритъм за адаптивно автоматично регулиране на напрежението в мрежи средно напрежение.

4.1. Цели на изпитанията

За основни цели на изпитанията са избрани:

- изследване на качеството на управление - способността на регулатора да поддържа напрежението в края на моделиращият мрежата електропровод с отклонение спрямо зададеното в границите на нечувствителност, с вероятност за тяхното нарушение не по-голяма от зададена от оператора стойност;
- изследване на влиянието на параметъра на баланс на решенията („ b ”) върху работата на регулатора;
- сравнителен анализ за работата на разработения алгоритъм на адаптивен регулатор с прогнозиране и на „класически” тип регулатор, реагиращ само на текущите стойности на измерванията.

Определени са показатели за оценката за работата на предложения алгоритъм на регулатор с прогнозиране и сравнението му спрямо класическите типове регулатори. Избраните за наблюдение показатели са: *Качеството на поддържане на напрежението*; *Цена на управлението*; *Неадекватност на решенията*. Показателите са подбрани с цел, да се изясни дали предложеният нов тип регулатор предлага предимства спрямо „класическия” тип по отношение на поддържане на качеството на напрежение и на цена на управлението.

4.2. Тестови множества от данни

За тестване са използвани записи за ток, активни и реактивни мощности преминавали през силовите трансформатори в подстанции, захранващи разпределителни мрежи с различен характер на преобладаващият товар, като и записи за напрежението на шини 110kV на тези подстанции. По данните от измерванията за мощностите е определен ъгълът между тока и напрежението.

Извадките са от три мрежи, със следните характеристики по преобладаващият по дял в общото потребление вид товар:

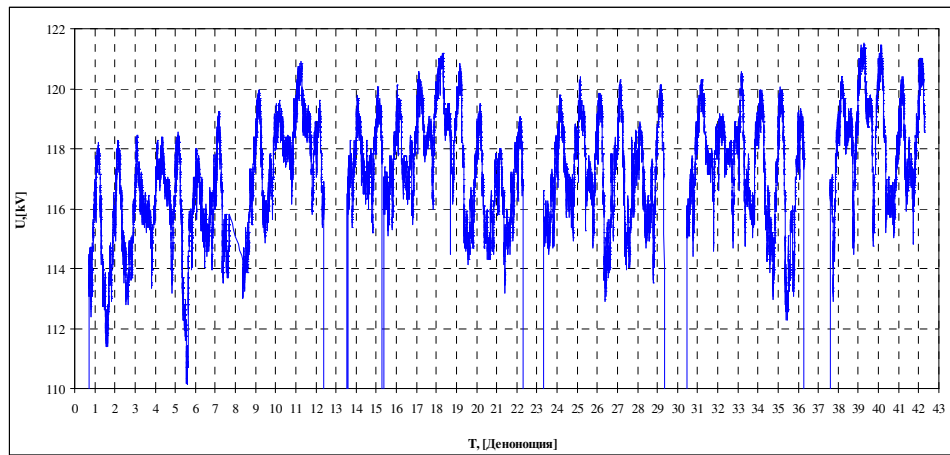
Мрежа 1 – Комунално-битов товар, група от малки населени места. Средното токово натоварване в извадката е приблизително 40% от номиналното на трансформатора, а максималното 70%. Среден $\cos(\varphi)$: 0,9.

Мрежа 2 – Урбанизирана и промишлена зона – част от територията на град и значителен дял от неговата промишлена зона. Средното токово натоварване в извадката е приблизително 28% от номиналното на трансформатора, а максималното 48%. Среден $\cos(\varphi)$: 0,88.

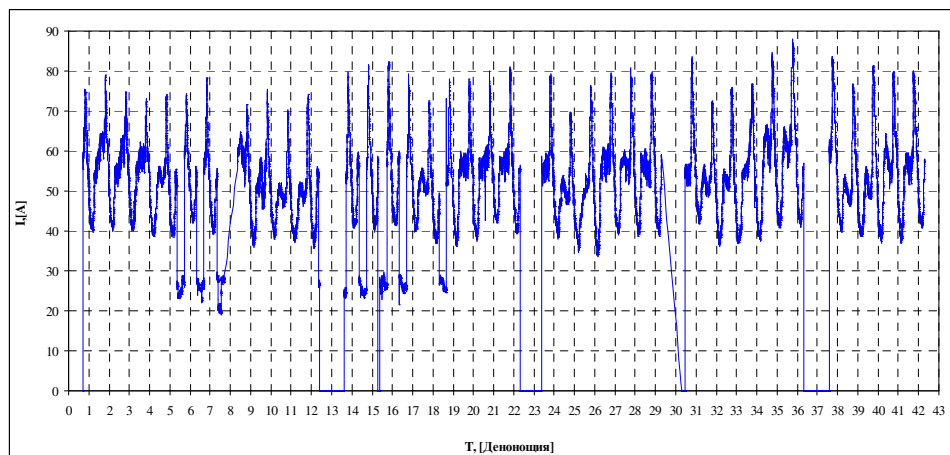
Мрежа 3 – Урбанизирана територия - част от територията на град. Средното токово натоварване в извадката е приблизително 60% от номиналното на трансформатора, а максималното 95%. Среден $\cos(\varphi)$: 0,96.

Стъпката на дискретизация на измерванията е 1 минута, отговаряща на порядъка на настройка на времезакъсненията на „класическия” тип регулатори. Поради организационни и технически ограничения, не беше възможно получаване и обработка на запис с дължина една календарна година. Обемът на извадката за всяка мрежа е с дължина приблизително 42 календарни денонощия, от които една част от графиците на денонощията са с прекъсвания на записа, дължащи се основно на организационни причини.

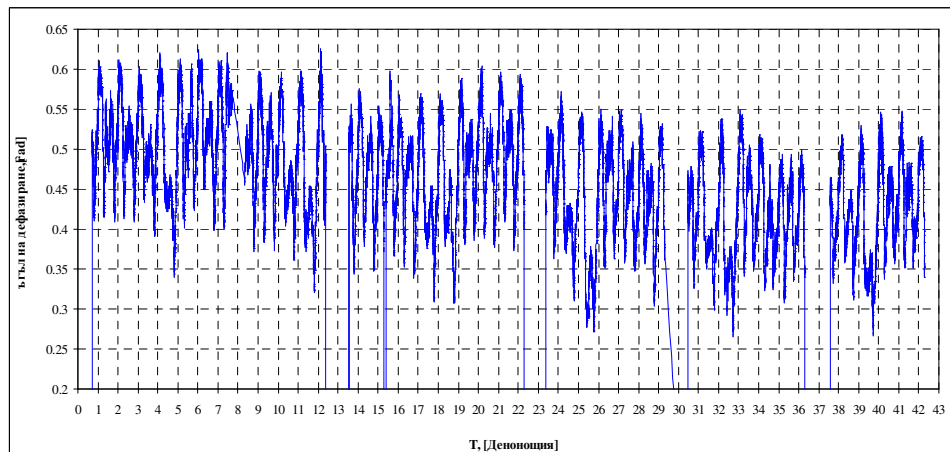
С илюстративна цел, тук са показани в графичен вид записите за Мрежа 1:



фиг. 4.1 Мрежа 1. Напрежение на шини високо напрежение на подстанцията.

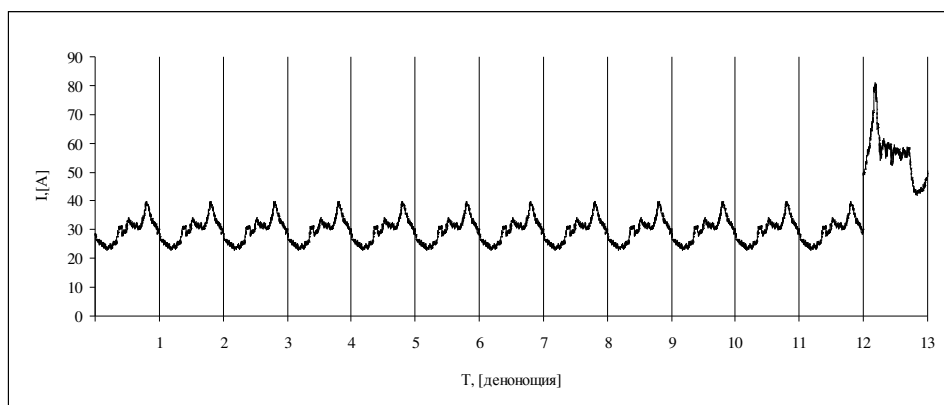


фиг. 4.2 Мрежа 1. Ток потребяван от мрежата, страна високо напрежение на трансформатора.



фиг. 4.3 Мрежа 1. Ъгъл на дефазироване между ток и напрежение.

Потенциалната липса в извадките на важни за практиката ситуации поради ограничената им дължина е компенсирана чрез *планиран експеримент* с изкуствено съставена поредица от графици. Тъй като в записите на мрежите се съдържат прекъсвания и други смущения, е проведен планиран експеримент само за проверка на качеството на работа при внезапна поява на нов тип график след поредица от еднакви графици. Такава ситуация е счтена и за практически най-тежкия възможен проблем за система със самообучение. Използвана е поредица от повторения на един и същ денонощен график, взет от записа на една от мрежите. В края на поредицата е добавен съществено различен график – не само взет от друга мрежа, но и допълнително модифициран като в него са размени местата на деня и нощта.



фиг. 4.4 Тестова поредица на тока за планиран експеримент с “неочакван ден”

4.3. Настройки на регулатора

Като настройки са зададени: параметрите на силовият трансформатор на мрежата; закон за регулиране; желани стойности на параметрите на напрежението и на качеството на неговото управление. Параметрите на настройка на алгоритма за прогнозиране са еднакви за всички тестове.

Качеството на напрежението е зададено със следните параметри: Желано напрежение в края на моделиращият мрежата електропровод, [kV]; Праг на нечувствителност, [kV]; Вероятност за реализация на отклонение на напрежение от желаното извън границите на нечувствителност; Максимално допустимо напрежение на шините на подстанцията, [kV]; Минимално допустимо напрежение на шините на подстанцията, [kV].

4.4. Резултати от тестовете и анализ

Анализа на резултатите е направен както по показатели обобщаващи пълния обем наблюдения за всяка извадка, така и чрез статистики на база разделение на всяка извадката на подинтервали, в случая по деноноция и по часове. Резултатите от тестовете са групирани както следва:

- Резултати по обобщени показатели за записите от мрежите;
- Сравнение между регулаторите по резултати за подинтервали и анализ на влиянието на параметъра на баланс на решенията („b”);
- Сравнение между регулаторите по брой комутации и анализ влиянието на параметъра на баланс на решенията („b”);
- Планиран експеримент.

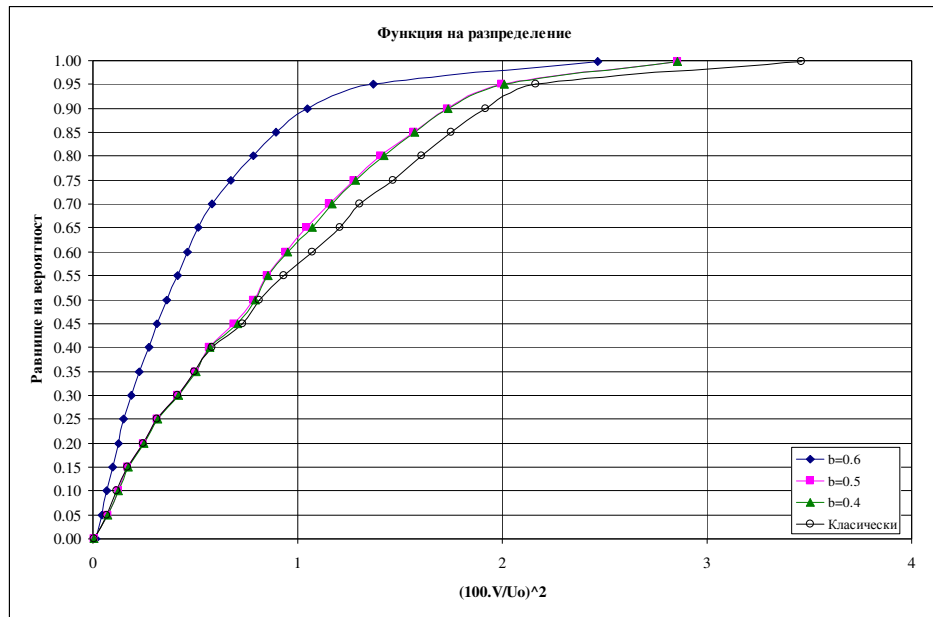
Тук са приведени част от получените резултати.

4.4.1 Резултати по обобщени показатели за записите от мрежите

Мрежа 1. Комунално-битов товар, група от малки населени места. Показатели за качество и цена на управлението.

Параметър на баланса на решенията ("b")	Обем на извадката на активна работа	$\overline{ V }$	$\overline{V^2}$	Случаи $ V > \varepsilon$, дял в извадката	Обем комутации	Напрежение на шините извън допустимите граници	Поредица противоположни команди	Среден хоризонт на решенията
[-]	[бр. деноноция]	[%]	[%] ²	[%]	[брой]	[брой случаи]	[брой]	[бр. отчети]
0.3	35.65	0.806	0.9	0.335	237	0	0	81
0.4	35.65	0.803	0.9	0.318	243	0	0	81
0.5	35.65	0.798	0.9	0.29	243	0	0	81
0.6	35.65	0.558	0.5	0.132	349	0	0	96
0.7	35.65	0.439	0.3	0.07	478	0	0	103
Класически регулатор								
-	35.65	0.833	0.9	0.415	220	0	0	-

4.4.2 Сравнение по интервали и анализ влиянието на параметъра на баланс на решенията („b”)



фиг. 4.5 Мрежа 1. Функция на разпределение на усреднените за час квадрати на относителните отклонения на напрежението (V^2)

За целите на сравнителния анализ е извършена аранжировка на регулаторите по качество на постигнатите резултати, като ранг "1" се присвоява на регулатора дал най-добър резултат по съответния показател.

Средно претеглени рангове по усреднени за час стойности на показателя V^2

Мрежа	Класически регулатор	Регулатор с прогнозиране		
		b=0.4	b=0.5	b=0.6
Мрежа 1	3.76	2.86	2.01	1
Мрежа 2	3.92	2.7	1.84	1.17
Мрежа 3	3.83	2.82	2	1

Средни рангове по усреднените за денонощие стойности на показателя V^2

Мрежа	Класически регулатор	Регулатор с прогнозиране		
		b=0.4	b=0.5	b=0.6
Мрежа 1	3.6	2.5	2.1	1
Мрежа 2	3.7	2.3	2.1	1
Мрежа 3	3.8	2.3	2.1	1

4.4.3 Сравнение по брой комутации и анализ влиянието на параметъра на баланс на решенията („b”)

За детайлна оценка на комутационния процес е направена статистика за денонощията без продължителни прекъсвания в потока от входни данни.

Мрежа 1. Статистика на разликите на броя на комутации на денонощие за регулатор с прогнозиране спрямо класически регулатор

Показател	мярка	b=0.4	b=0.5	b=0.6
Общ брой денонощия	брой	31	31	31
Денонощия със съвпадение на броя на комутациите	%	29.03	22.58	3.23
Денонощия с по-голям брой комутации	%	51.61	54.84	93.55
Денонощия с по-малък брой комутации	%	19.35	22.58	3.23
Средна разлика в броя на комутациите за денонощие	брой	0.7	0.7	3.5
Квантил отговарящ на вероятност 0.95	брой	3.5	3.5	7
Максимална разлика в броя комутации за денонощие	брой	5	5	8
Минимална разлика в броя комутации за денонощие	брой	-3	-3	-1

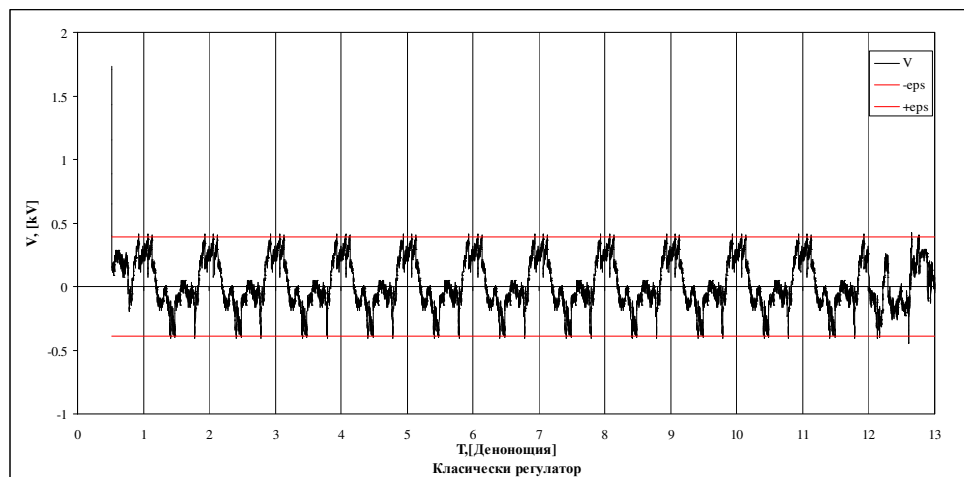
4.4.4 Планиран експеримент

Средна стойност на квадратите на относителните отклонения на напрежението, [%²]

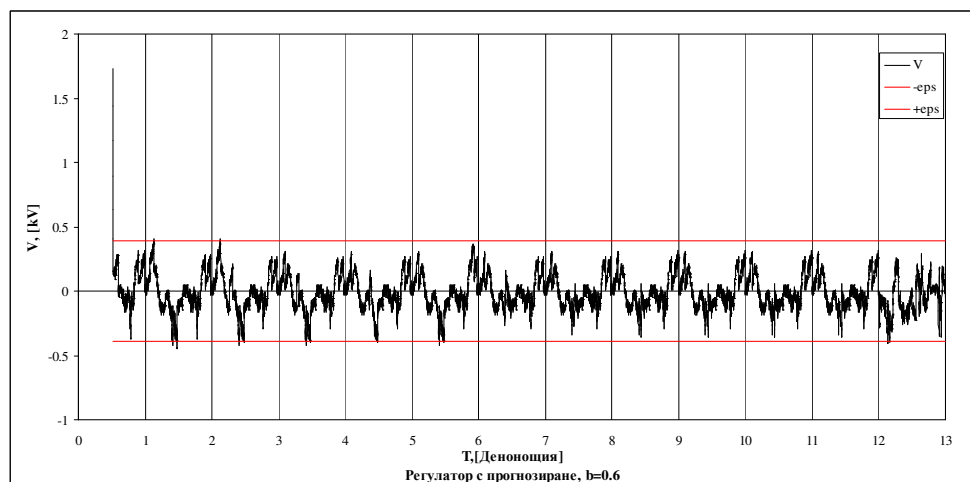
[100.(U - U ₀)/U ₀] ²				
Денонощие	Класически регулатор	Регулатор с прогнозиране		
		b=0.4	b=0.5	b=0.6
1	1.4	1.3	1.3	0.808
2	0.87	0.863	0.863	0.597
3	0.87	0.82	0.82	0.567
4	0.87	0.82	0.82	0.479
5	0.87	0.805	0.805	0.428
6	0.87	0.785	0.785	0.561
7	0.87	0.763	0.717	0.32
8	0.87	1.285	0.709	0.342
9	0.87	1.287	0.709	0.392
10	0.87	1.287	0.703	0.392
11	0.87	1.287	0.703	0.392
12	0.87	1.287	0.703	0.392
13	0.84	0.807	0.807	0.52

Брой комутации за денонощие

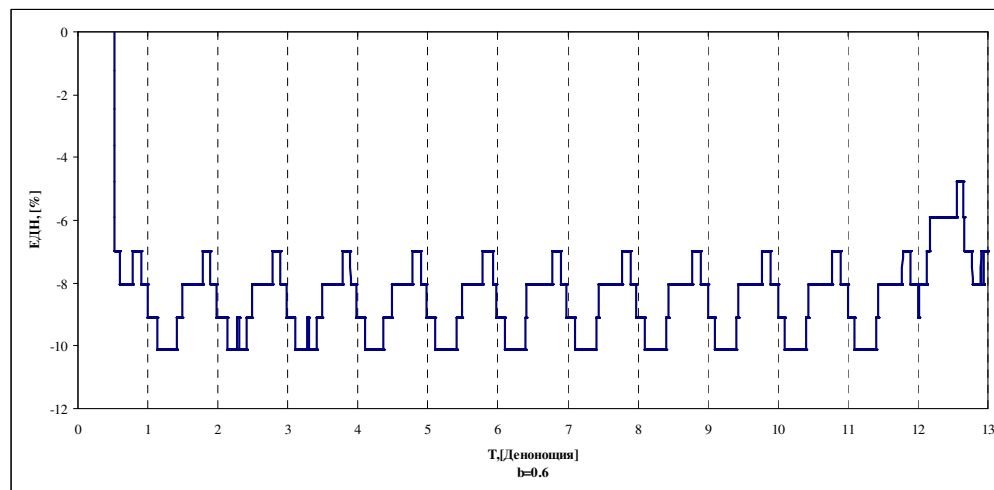
Денонощие	Класически регулатор	Регулатор с прогнозиране		
		b=0.4	b=0.5	b=0.6
1	7	7	7	10
2	6	6	6	6
3	6	6	6	8
4	6	6	6	8
5	6	6	6	6
6	6	6	6	6
7	6	4	6	6
8	6	4	6	6
9	6	4	6	5
10	6	4	6	6
11	6	4	6	6
12	6	4	6	6
13	5	7	7	11



фиг. П.2.1 Класически тип регулатор. Отклонения на напрежението в края на моделираният мрежата електропровод спрямо зададеното.



фиг. П.2.2 Регулатор с прогнозиране, $b=0,6$. Отклонения на напрежението в края на моделираният мрежата електропровод спрямо зададеното.



фиг. П.2.3 Регулатор с прогнозиране, $b=0,6$. Комутационен процес.

4.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА IV

Формулирани са 4 основни извода. Въз основа на резултатите от тестовете е счтено, че предложеният нов тип адаптивен регулатор с прогнозиране показва способност да реализира по-високо качество на управление на отклоненията на напрежение спрямо регулаторите от класически тип, без да се нарушава зададена от оператора на мрежата вероятност за подаване на некачествено напрежение. Регулатора е устойчив на смущения в потока от входни данни. Параметъра на баланса на решенията b дава възможност да се управлява ефективно баланса между качество на напрежението и брой комутации. Дадени са препоръчителни стойности за този параметър.

Приноси на дисертационния труд

А. Научни приноси

1. Формулирана е нова концепция за изграждане на АРН – замяна на досега използваната информационна база за взимане на решение за комутация, състояща се от комбинацията *прагов елемент-блок за закъснение*, с нова база, състояща се от прогноза осигурена от алгоритъм за оперативно прогнозиране, придружена с оценка на несигурността на осигурената от прогнозата информация.
2. Формулирани са принципи за създаване на универсален, структурно и параметрично адаптивен алгоритъм за оперативно прогнозиране, пригоден за вграждане в системи за автоматично управление. Принципите не са обвързани с конкретни формули, а дават насоки и критерии както за създаване на конкретни алгоритми, така и за оценка на тяхната пригодност. Сред тези принципи основополагаща идея е прогнозирания процес да се моделира като серия от сценарии, продиктувани от шаблонни социално-технологични реакции на потребителите на фактори от средата им.
3. За теоретично коректно приложение на Теоремата на Бейс за избор на модел за прогнозиране, е обоснована необходимостта от въвеждане на система от $N+1$ модела на поведение на потребителите, като от тях “ N ” модела са на вече регистрирани сценарии на поведение на потребителите и “ $+1$ ” модел на нерегистриран до момента сценарий (модел на непредсказуемостта).
4. Разработена е методика за тестване на алгоритми за прогнозиране включваща не само използване на ретроспективни извадки от реални обекти, но и на изкуствено генерирани тестови поредици, предназначени както да проявят евентуални слабости на алгоритъма, така и да дадат възможност за пълноценното му изследване в условията на планиран експеримент.
5. Формулирани са принципи за взимане на решение за промяна на коефициента на трансформация на РПТ въз основа на прогнози, при зададена вероятност за взимане на неправилно решение. Отчетени са както доверителните интервали на прогнозите при предпоставка адекватен модел за прогнозиране, така и възможността за неадекватност на алгоритъма за прогнозиране (грешка от II-ри род).
6. Формулирана е концепция за взимане на решение за промяна на коефициента на трансформация на РПТ от гледна точка на икономическа ефективност за потребителите и за оператора на мрежата, с управляем баланс на техните икономически интереси.

Б. Научно-приложни приноси

1. Създаден е метод за моделиране на товарови графици чрез редове на Фурие. Метода се отличава със: Подобрена е сходимостта на реда и е избягнато възникване на ефекта на Гибс в краищата на записа, чрез отчитане на известни от литературата особености на отрезково-линейната апроксимация; Неаксиоматичен принцип за отхвърляне на “несъществени” за приложението на модела хармоници; Трансформация на описанието на графика с ред на Фурие, в описание в безразмерен вид на неговата “форма” като геометрична фигура чрез първата производна на реда. Полученото описание на „форма“ на графика е ползвано в качеството на модел на поведението на потребителите и основа за разделение на дадена извадка от графици на хомогенни групи.
2. Създаден е алгоритъм за оперативно прогнозиране, предназначен за вграждане в автоматична система за прогнозиране. Алгоритъмът синтезиран съгласно формулираните принципи за универсалност и структурно-параметрична адаптивност.
3. Създаден е алгоритъм за АРН, обединяващ алгоритъм за прогнозиране с алгоритъм за взимане на решение за промяна на коефициента на трансформация на РПТ. В алгоритъма за взимане на решения е заложен стремеж за постигане на оптимален икономически ефект, при спазване на нормативните изисквания за качество на отклоненията на напрежението и с отчитане на риска от неправилно решение. Със създаването на този алгоритъм е реализирана основната цел на дисертацията.

В. Приложни приноси

1. Получени са потвърдителни факти за пригодността на предложения алгоритъм за оперативно прогнозиране да се справя с поставените основни изисквания за практическа пригодност: Адаптация към нестационарния по характер прогнозиран процес; Устойчива работа при шум и значителни смущения в потока от входни данни, включително при графици, съществено различни от тези, при които е протекъл процеса на структурна и параметрична идентификация на математическите модели. Въз основа на резултатите от тестовете, алгоритъма е сметен за пригоден за внедряване в практиката.
2. Получени са потвърдителни факти за практическата пригодност на предложия адаптивен алгоритъм за АРН с прогнозиране, да осъществява желаното съгласно основната цел на дисертацията икономически ефективно управление на отклоненията на напрежение, при спазване на нормативните изисквания. Налице е устойчивост на работата на регулатора към смущения в потока от входни данни. По всички наблюдавани показатели за реализирано качество на управление, е установена доминация на предложия адаптивен алгоритъм за АРН с прогнозиране спрямо регулаторите от класически тип.

Декларирам оригиналността на описаните приноси.

Публикации по дисертационния труд

1. Георгиев, Ст., Г. Георгиев, „Предпоставки за създаване на адаптивен алгоритъм за оперативно прогнозиране на товаров график”, Международна научно-техническа конференция “Електроенергетика 2006”, Варна, България
2. Георгиев Ст., Г. Георгиев, „Апроксимация на товаров график с ред на Фурие и изследване на остатъка”, Международна научно-техническа конференция “Електроенергетика 2006”, Варна, България
3. Георгиев Г., Ст. Андреев, „Автоматично регулиране на напрежението под товар в мрежи средно напрежение с прогнозиране на смущенията. Изисквания към алгоритмите за прогнозиране”, Годишник на ТУ Варна 2007г., гр. Варна, България
4. Георгиев Г. „Събитийно ориентирано моделиране на денонощен товаров график за целите на автоматично изготвяне на краткосрочни и оперативни прогнози”, Годишник на ТУ Варна 2009г., гр. Варна, България.
5. Георгиев Г. “Моделиране на товаров график с разлагане в ред на Фурие. Критерии за избор на структура на модела”, сп. “Енергетика”, бр. 5 , НЕК ЕАД, София, 2011, ISSN 0324-1521, стр.18-стр.23.
6. Georgi Georgiev “Evaluation of algorithm for load forecasting. Problems of the methodology”, Proceedings of International Scientific Symposium "Electrical Power Engineering 2014", 11-13.09.2014,; Electrical Engineering Faculty Technical University of Varna, Bulgaria, ISBN 978-954-20-0497-4.

Abstract (Резюме на английски език)

The PhD is dedicated on voltage regulation through transformers with on load tap changers (OLTC). The thesis is divided into introduction, four chapters and conclusions. The introduction and the first chapter present the current state of the concepts of accessing of the voltage quality in distribution networks and a short review of the state-of-the-art in automatic voltage regulators. The problem of the voltage regulation is also reviewed from the economical point of view of the user and of the system operator. The chapter reveals that the main weakens of voltage regulator lays in their core operational elements that form the information basis for decision making about the necessity of a tap change– the dead band and the time delay. It is noted, that there is a disproportion between the acceptable time delays and the desired average time between the tap changes, in regard of the desired lifetime of the tap changer. The conclusion is, that a new concept for decision making is needed. The main thesis is, that the decision making should be based on the forecasting algorithm with a time horizon of the forecasts that is close to the desired average time between the tap changes.

The second chapter is dedicated of the creating of a suitable forecasting algorithm and it consists of four main parts. The first part is about the requirement that should be met by an algorithm suitable to be part of automatic control system; The second part comprises a short overview of the known concepts and algorithms for short term load forecasting and conclusions about their weak sides according to the requirements described in the first part; In the third part is proposed a new type of short-term load forecasting algorithm, designed on non-axiomatic principles and distribution free statistical methods. By structural and parametrical adaptability, the proposed design is intended to cope with the main problem of load forecasting – the non stationary behavior of the process. It is intended the same algorithm to be used for forecasting the load current, the voltage of the power system on the HV side of the transformer, and the angle between the current and the voltage. Some of the distinctive features of the algorithm are: a new way for modeling the day load in the terms of a geometrical shape instead of a series of values as in the present methods; a set of concurrent models and the theorem of Bayes as a decision rule; a database of the distribution functions of the forecasting errors. The fourth part comprises a test program for the developed algorithm, the test results and their analysis. The tests are made according a methodology for testing of forecasting algorithms proposed by the author. The methodology requires usage of long data samples (at least a year), taken from different networks and the usage of artificially created data sequences, that hold all practically important disturbances in the input data flow. According to the results of the tests, the algorithm is considered capable to work in an automatic system without human intervention, and without been compromised by the non stationarity of the forecasted process, by the random interruptions of the data flow, by the noise or by outliers.

The third chapter is dedicated on the decision making and the risk management. An algorithm is developed that comprises: an estimator of the risk for violating a permissible limits of the voltage of the bus of the substation; a fuzzy logic estimator of the benefits offered by each of the three alternatives that present in any current moment: A_0 – not to switch the tap changer; A_{+1} - to increase the voltage by one step, A_{-1} – to decrease the voltage by one step. The choices are taken according to appointed by the network operator permissible probability for a wrong decision. The economical side of the problem of the voltage regulation is addressed by a parameter (*Parameter of balance*), that controls the bias of the decisions towards the quality of the voltage level (measured by the mean of the squares of the voltage deviation from an optimal value appointed by the network operator) or towards less frequent tap changes, without violating the permissible limits of the voltage of the bus of the substation.

The fourth chapter comprises a test program for the developed algorithm for automatic voltage regulation, the test results and their analysis. The tests are performed in a similar way as the tests of the forecasting algorithm. Because the developed regulator is a self-learning system, it was assumed that the most harsh test is an occurrence of an “unexpected” type of day after a sequence of identical days. Even in such severe circumstances the performance of the regulator was still better than of the classical type of regulators. According to the results of the tests, the proposed new algorithm performs better than the classical type of regulators that implement the combination of dead band and time delay for decision making. The *Parameter of balance* gives effective control over the balance between the voltage quality and the frequency of the tap changes, without violating a prescribed probability for a wrong decision.

The main conclusions and the author’s original contributions in the PhD thesis are summarized at the end.

Резюме на русском язык (Резюме на руски език)

Основной целью диссертации является разработка нового типа автоматического регулятора напряжения предназначены для управления устройств регулирования под нагрузкой (РПН) коэффициента трансформации силовых трансформаторов. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Введение и глава первая содержат литературный обзор нормативной базы, критерии качества напряжения, существующих технических решений. На основании обзора литературы представлены выводы, из которых определены цель и задачи диссертации. Был сделан вывод, что самым существенным недостатком современных регуляторов является применение комбинации: *полоса нечувствительности-время задержки* в роли информационной основы для принятия решения для переключения устройства РПН. В качестве новой концепции предлагается комбинация: алгоритм прогнозирования-алгоритм принятия решения с учетом риска неправильного решения.

Глава вторая посвящена алгоритму прогнозирования. В главе дефинированы требования к алгоритму прогнозирования для автоматической системы управления, сделан литературный обзор. Поскольку не было найдено алгоритма отвечающего всем требованиям, был создан новый тип алгоритма прогнозирования. Нестационарный процесс электропотребления рассматривается как последовательность стационарных социально-технологических реакции потребителей к факторам окружающей среды. Реакции выражены в геометрической форме графики процесса. Были созданы соответствующие математические модели. Глава закончивается с результатами тестирования алгоритма. Алгоритм тестирован с данным из реальных сетей. Также была сделана серия из запланированных экспериментов на устойчивость к разным типам помех.

Основной целью третьей главы является разработка алгоритма для принятия решения для переключения коэффициента трансформации. Анализирован риск для принятия неправильного решения из-за неопределенности информации, полученной в виде прогноза для напряжения питающей системы, ток через трансформатор и угол дефазирования. Найдены математические модели для оценки риска и для оценки выгоды принятия каждой из трех альтернатив – не менять коэффициент трансформации, повысить напряжения на одной ступени, уменьшить напряжения на одной ступени. Риск неправильного решения оценивается со заданной вероятностью оператором сети. Для принятия решения используется нечеткая логика (англ. *fuzzy logic*). Решения контролируются параметром баланса, с помощью которого оператор сети может сделать уклон к качеству напряжения или к экономии коммутационного ресурса устройств регулирования под нагрузкой.

Глава четвертая содержит описание тестирования разработанного алгоритма регулятора напряжения. Алгоритм применялся к данным из реальных сетей, параллельно с моделью классического типа регулятора. Новый регулятор показал лучшие результаты. Поскольку регулятор является системой самообучения, был сделан тест направленный на срыв системой. Для этого теста была сделана последовательность состоящий из однократных суток, в конце которой была “неожиданная” по форме графики сутки (взята из другой сети и зеркально перевернутая так, что бы день и ночь поменяли местами). Даже в этой ситуации новый регулятор дал лучшие результаты чем регулятор классического типа.

В заключении представлены обобщенные выводы по диссертации.

Благодарности

Авторът желае да изкаже своите благодарности на:

- Научния си ръководител доц. д-р инж. Стоян Андреев Георгиев за вдъхновението и добрият пример, като човек, инженер и учен;
- Целия състав на катедра „Електроенергетика“ за съдействието, като предпоставка за успешното разработване на дисертацията;
- На колегите си от ЕСО ЕАД МЕР Шумен, МЕР Варна и ТДУ „Изток“ за предоставеното съдействие.

Авторът носи цялата отговорност за съдържанието на настоящия документ, което при никакви обстоятелства не може да се приеме като официална позиция на ТУ-Варна.

СЪДЪРЖАНИЕ

Характеристика на дисертационния труд.....	5
Актуалност на проблема.....	5
Проблем.....	5
Цели и задачи на изследването	5
Обект и предмет на изследване.....	6
Методи използвани при изследването	6
Място на изследване	6
Научна новост на изследването	7
Практическа ценност на изследването	7
Апробация на изследването	7
Публикации по дисертационния труд	7
Съдържание на дисертационния труд.....	8
УВОД.....	8
ГЛАВА I Анализ на проблемите при централизирано автоматичното управление на отклонение на напрежението в мрежи средно напрежение.	8
1.1. Оценка на качеството на напрежението от гледна точка на икономически ефект. Интегрален критерий за качество на напрежението.....	8
1.2. Принципи на регулиране на напрежението. Регулиране по насрещен принцип и закон за управление	8
1.3. Принципи на изграждане на автоматични регулатори на напрежение. Познати конструкции	9
1.4. Проблеми на съществуващите принципи за изграждане на АРН и насоки за подобрене.....	9
1.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА I	9
ГЛАВА II Алгоритъм за оперативно прогнозиране	10
2.1. Основни изисквания към алгоритъм за прогнозиране предназначен за автоматично централизирано управление на напрежението.....	10
2.2. Известни алгоритми за прогнозиране и проблеми. Методологичен анализ.	10
2.3. Разработка на алгоритъм за прогнозиране и на неговите елементи	11
2.4. Тестване на разработеният алгоритъм за прогнозиране	11
2.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА II	13
ГЛАВА III Алгоритъм на АРН с прогнозиране за ефективно централизирано управление на отклоненията на напрежението в мрежи средно напрежение	13
3.1. Постановка на проблема.....	13
3.2. Теоретичен модел на решенията.....	14
3.3. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА III.....	15
ГЛАВА IV Изпитания на разработения алгоритъм за адаптивно автоматично регулиране на напрежението в мрежи средно напрежение.	16
4.1. Цели на изпитанията	16
4.2. Тестови множества от данни.....	16
4.3. Настройки на регулатора.....	18
4.4. Резултати от тестовете и анализ	18
4.5. ИЗВОДИ ПО ГЛАВА IV	21
Приноси на дисертационния труд.....	22
Публикации по дисертационния труд.....	23
Abstract (Резюме на английски език)	24
Резюме на руском език (Резюме на руски език)	25
Благодарности.....	26