

УДК 621.311.153

VOLTAGE CONTROL SYSTEM WITH FUZZY CONTROLLERS WITHIN THE POWER DISTRIBUTION SYSTEM OF INDUSTRIAL PLANT

S. Baluta, V. Jovbak, L. Kopilova, E. Korolyov
National University of Food Technologies

Key words:

*Voltage control
Fuzzy logic
Electrical distribution
system of industrial plant
Optimization of power
consumption
Transformer voltage
regulation*

Article history:

Received 05.11.2016
Received in revised form
24.11.2016
Accepted 16.12.2016

Corresponding author:

S. Baluta
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The problem of voltage control for the optimization of electricity consumption is important for the industry because it allows reducing the power consumption of the industry products. This paper presents the two-tier system for regulating electricity supply at industrial enterprises: the lower level constitutes of plant department transformers with an electronic switch and the upper level represents an LPT transformer. Three-level information system is used for the control. The control algorithms were developed for the controllers of the upper and lower levels of regulation based on fuzzy logic providing information, time, cost and other characteristics of the voltage control system efficiency.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ З НЕЧІТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

С.М. Балюта, В.Д. Йовбак, Л.О. Копилова, Є.О. Корольов
Національний університет харчових технологій

Проблема керування напругою з метою оптимізації споживання електричної енергії є актуальною для промисловості, оскільки дає змогу зменшити енергоємність продукції, що випускається підприємствами галузі. В статті представлена дворівнева система регулювання напруги в електричній мережі промислового підприємства, де нижній рівень — це цехові трансформатори з ПБЗ з електронним комутатором, а верхній — трансформатор ГПП з РПН. Для керування використовується трирівнева інформаційна система. Для контролерів верхнього і нижнього рівнів регулювання розроблені алгоритми керування на основі нечіткої логіки, які забезпечують інформаційні, точнісні, часові, вартісні та інші характеристики ефективності функціонування системи керування напругою.

Ключові слова: керування напругою, нечітка логіка, система електропостачання промислового підприємства, оптимізація електроспоживання, регулювання напруги трансформатора.

Постановка проблеми. Проблема зниження споживання електричної енергії є актуальною для харчової і цукрової промисловостей, оскільки дає змогу підвищити ефективність використання генеруючих потужностей, зменшити втрати електроенергії при транспортуванні та енергоємність продукції, що випускається підприємствами галузі. Одним із ефективних способів забезпечення раціональних рівнів споживання електричної енергії є регулювання напруги в електричних мережах промислових підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням керування електроспоживанням присвячені праці [1—4]. Так, в [1] представлена система автоматичного регулювання напруги (САРН) в розподільній мережі промислового підприємства 6—10 кВ за допомогою РПН трансформатора ГПП. Величина уставки напруги контролера розраховується для основного приєднання. Вибір основного приєднання проводиться з використанням нечіткої логіки. В [2] представлена АСРН в центрі живлення, що базується на автоматизованій системі обліку енергоресурсів і передбачає адаптивне налаштування регулятора трансформатора. Дворівнева САРН в центрі живлення представлена в [3]. На нижньому рівні встановлені регулятори трансформаторів 10/0,4 кВ на основі ПБЗ і електронного комутатора, а на верхньому рівні використовуються регулятори РПН трансформатора 110/10кВ. Сигнал на перемикання пристрою РПН трансформатора ГПП буде формуватися лише тоді, коли певна кількість регуляторів цехових підстанцій вичерпали свій діапазон регулювання. Регулювання напруги в системі електропостачання з використанням нечіткої логіки запропоновано в [4; 5], де представлені результати використання нечіткої логіки для синтезу регуляторів РПН трансформатора ГПП і регулятора напруги асинхронного двигуна, що живиться від частотного перетворювача. Аналіз вищезазначених праць показав, що при створенні САРН не враховуються статичні характеристики споживачів електричної енергії, крім того, не в повній мірі використовуються переваги узгодженого регулювання напруги на всіх ієрархічних рівнях системи електропостачання промислового підприємства.

Мета дослідження: розробити систему керування напругою в системі електропостачання промислового підприємства, алгоритми управління на основі нечіткої логіки, які забезпечать економічні, інформаційні, точнісні, часові та інші характеристики ефективного функціонування системи управління напругою в системі електропостачання промислового підприємства.

Виклад основних результатів дослідження. Система електропостачання промислового підприємства як об'єкт керування має такі особливості: велика швидкість електричних процесів; застосування різних спеціалізованих терміналів для різного електрообладнання та різних напруг; необхідність наявності реєстраторів аварійних режимів і своєчасна передача осцилограм на верхній рівень керування; необхідність технічного та/або комерційного обліку елек-

тричної енергії з її функціями; необхідність АРМ електрика з можливістю віддаленої роботи з терміналами РЗА.

При регулюванні напруги в електричних мережах повинні бути забезпечені:

- відповідність показників напруги вимогам державного стандарту;
- відповідність рівня напруги значенням, допустимим для обладнання електричних станцій і мереж з урахуванням допустимих експлуатаційних підвищень напруги промислової частоти на електрообладнанні (відповідно до даних заводів-виготовлювачів і циркулярів);
- мінімум втрат електроенергії в електричних мережах енергосистем.

Режими напруги вибирають залежно від характеру підключених до мережі споживачів і їх віддаленості від центру живлення.

На рівні електрообладнання базою для побудови автоматизованої системи керування напругою (АСКН) є мікропроцесорні пристрої захисту, автоматики управління (термінали РЗА), які, крім функцій РЗА, виконують функцію УЗО і мають комунікаційні порти. Для інтеграції в систему об'єктів, неохоплених терміналами РЗА, також використовуються термінали УСО (контролери). Завданням АСКН є забезпечення нормативних режимів роботи технологічного обладнання при раціональних рівнях споживання електричної енергії і втрат в електричних мережах підприємства. Для реалізації цього завдання пропонується використати дворівневу систему автоматичного регулювання управління напругою (АСКН) (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема дворівневої системи керування напругою на промисловому підприємстві: 1 — блок нечіткого керування напругою трансформатора ГПП, що складається з ТН і ТС; АЦП; ЦАП; мікроконтролера; устрою зв'язку з об'єктом; РПН; нечіткого регулятора трансформатора ГПП; 2...5 — блок нечіткого керування напругою цехового трансформатора, що складається з ТН і ТС; АЦП; ЦАП; мікроконтролера; устрою зв'язку з об'єктом; ПБЗ; електронного комутатора; нечіткого регулятора цехового трансформатора

На нижньому рівні АСКН система складається з системи регулювання напруги цехового трансформатора (ЦТ) на основі ПБЗ з електронним комутатором, а на верхньому — із системи регулювання напруги трансформатора ГПП на основі РПН. Технічна реалізація системи керування електропостачанням і підсистеми управління напругою передбачає вирішення завдань установки технічних засобів реалізації функції управління напругою, збору та передачі інформації.

Для забезпечення вирішення завдань керування електроспоживанням використовується трирівнева інформаційна система. Верхній рівень включає в себе: один або більше базових серверів (наприклад, на основі MicroSCADA); сервер зв'язку, графічні робочі станції (АРМ) користувачів; периферійне обладнання тощо). Середній рівень включає в себе: процесори зв'язку, де здійснюється збір інформації і перетворення її до єдиного вигляду для подальшої обробки. Компоненти верхнього і середнього рівнів об'єднуються між собою за допомогою локальної обчислювальної мережі на базі Ethernet при необхідності резервованої. Нижній рівень утворюють такі пристрої: віддалені термінали (RTU) і пристрої телемеханіки (ТМ); програмовані логічні контролери (PLC); цифрові термінали релейного захисту та автоматики (РЗА); пристрої контролю якості електроенергії. Зв'язок між системами регулювання нижнього і верхнього рівнів доцільно виконати на основі промислової інформаційної мережі типу Fieldbus.

При побудові АСКН був використаний принцип декомпозиції з урахуванням ієрархічного принципу побудови системи електропостачання: на рівні цехової підстанції вирішується завдання підтримання раціонального рівня напруги, що забезпечує оптимальне електроспоживання електроприймачами цеху при різних режимах технологічного обладнання, а на рівні трансформатора ГПП вирішується завдання підтримання заданих рівнів напруги на шинах 10 (6) кВ цехових трансформаторів з урахуванням їх електричної віддаленості від центру живлення, конфігурації розподільної електричної мережі підприємства і забезпечення раціональних втрат електричної енергії в електричних мережах в періоди максимуму та мінімуму навантаження енергосистеми.

Підсистема керування напругою цехового трансформатора складається з блоку визначення раціональних значень напруги і регулятора на основі нечіткої логіки. Розрахунок уставок значень напруг регулятора проводиться на основі математичної моделі електричної мережі цеху й окремих електроприймачів з урахуванням їх статичних характеристик навантаження і засобів компенсації реактивної потужності з використанням значень напруги, активної та реактивної потужностей, що вимірюються на шинах 0,4 кВ цехової ТП. За раціональні напруги прийняті такі значення напруги на шинах ТП, при яких втрати активної потужності в елементах цехової електричної мережі і цеховому трансформаторі компенсуються за рахунок зменшення споживання активної потужності споживачами електричної енергії. Вхідними величинами нечіткого регулятора вибрані різниця заданої та поточної напруги на шинах 0,4 кВ трансформатора та похідна напруги у часі. Вихідними величинами прийняті затримка часу зміни напруги та уставка напруги

трансформатора. Для всіх змінних побудовані функції належності, а також складені нечіткі правила регулювання.

Розглянемо більш детально методи і засоби, що використані при розробці верхнього рівня АСКН. Для забезпечення раціональних втрат потужності в розподільній мережі величина напруги повинна прийматися на верхній межі допустимого значення напруги ($1,1 U_n$). Цехові трансформатори (ЦТ) знаходяться на різній електричній віддаленості від трансформатора ГПП, що обумовлює відмінності в рівнях напруги для різних ЦТ. Рівні напруг на стороні високої напруги ЦТ змінюються залежно від навантаження трансформаторів і рівня напруги на стороні ВН трансформатора ГПП (режим максимального і мінімального навантаження енергосистеми). Для забезпечення умов роботи САРН нижнього рівня при зміні навантаження і раціональних втрат енергії в розподільній мережі 10 (6) кВ необхідно підтримувати задані рівні напруг на шинах електрично найближчої та віддаленої ЦТ.

Побудова і розрахунок моделей електричних мереж 10 (6) кВ. Суть методу полягає в тому, що для центра живлення (ГПП) аналізуються параметри розподільчої мережі (конфігурація, протяжність і перетин ліній, кількість і потужності трансформаторів, $\cos\phi$ та ін.), на основі яких будуються розрахункові моделі електричних мереж.

Розрахунок робочих режимів розподільних мереж промислових підприємств більш простий, ніж районних. Розподільна мережа має невелику протяжність. У лініях місцевих мереж активні та індуктивні опори або приблизно однакові, або активні опори перевищують індуктивні. При цьому поперечна складова вектора падіння напруги дуже мала і її не враховують, в зв'язку з чим режими роботи цих мереж характеризуються майже повним збігом напруг у вузлах по фазі і порівняно невеликою відмінністю від номінальної напруги мережі. Схеми заміщення цих ліній складаються з поздовжніх елементів — активного та індуктивного опорів. У місцевих мережах, крім того, не враховується вплив втрат потужності на її втрати в наступних ланках.

Напруга в усіх точках лінії місцевої мережі приймається рівною номінальному значенню. Навантаження на будь-якій ділянці такої мережі визначається підсумовуванням навантаження цієї ділянки з навантаженнями попередніх ділянок:

$$\underline{S}_i = \sum_{i \max/2}^i \underline{S}_i . \quad (1)$$

Напруга у вузлових точках розподільної мережі розраховується за даними початку лінії з використанням такої формули:

$$U_i = U_{\text{ном}} - \frac{1}{U_{\text{ном}}} \sum_{i=1}^n (P_i R_i + Q_i X_i) . \quad (2)$$

Неврахування втрат потужності у місцевих мережах дає змогу розраховувати максимальні втрати напруги за даними навантаження (s_1, s_2, \dots, s_n) або потужностями, які перетікають по ділянкам. Сумарні втрати напруги в

лінії до будь-якого вузла i визначаються сумою втрат напруги на кожній ділянці, яка визначається формулою:

$$\Delta U_{0i} = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \sum_{i=1}^n (P_i R_i + Q_i X_i) = \sqrt{3} \left(\sum_{i=1} I_{ai} R_i + \sum_{i=1} I_{pi} X_i \right). \quad (3)$$

Враховуючи ймовірнісний характер параметрів, що описують стан навантаження і ліній живлення, для синтезу алгоритмів регулювання напруги на трансформаторі ГПП використовуємо метод теорії нечіткої логіки (Fuzzy технології).

Алгоритм нечіткого регулювання. У разі регулювання напруги трансформатора ГПП як нечіткий алгоритм був обраний алгоритм Мамдані, що пояснюється декількома факторами:

1. Простота програмування. Алгоритм Мамдані найбільш простий і зрозумілий для програмування.

2. Кількість змінних, необхідних для роботи контролера (див. нижче), була вибрана рівною п'яти. Кількість значень цих змінних може досягати 17. За цими значеннями можливе створення до 270 правил нечіткого висновку, що можна вважати надмірно великим.

3. При програмуванні алгоритму не настільки важлива точність виведення, скільки наочність і «зрозумілість» усіх складових алгоритму. Алгоритм Мамдані задовольняє цю вимогу.

Математично алгоритм Мамдані описується такою послідовністю кроків:

- приведення до нечіткості (фазифікація): знаходиться ступінь істинності для передумов кожного правила;
- нечіткий висновок: знаходяться рівні «відсікання» для передумов кожного з правил, потім знаходяться усічені функції приналежності;
- композиція: проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що призводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для вихідної змінної з функцією приналежності;
- приведення до чіткості (дефазифікація).

Цей алгоритм є найбільш часто вживаним на практиці, тому що дуже добре себе зарекомендував у ряді завдань управління в режимі реального часу.

Застосування нечіткої логіки в задачах мікропроцесорного керування. У загальному випадку інформація проходить три стадії обробки:

- перетворення вхідної фізичної змінної в нечітку множину — процедура фазифікації;
- логічна обробка нечітких змінних (композиція, імплікація) бази правил контролера, отримання локального і загального виведення з бази правил у вигляді нечіткої множини;
- перетворення нечіткої множини в фізичну змінну — процедура дефазифікації.

Структура FUZZY регулятора РПН трансформатора ГПП складається з блоку вхідних величин, до яких відносяться напруги на найбільш віддаленому та найбільш наближеному приєднанні, поточне відгалуження РПН трансформатора та кількість спрацювань РПН з початку доби; Fuzzy контро-

лера за алгоритмом Мамдані і блок вихідних величин, до яких відносяться напрям переміщення РПН та затримка часу спрацювання РПН.

При роботі за алгоритмом Мамдані для регулювання напруги трансформатора ГПП на вхід нечіткого контролера подавалися: напруга на шинах ВН ЦТ, яка є електрично найближчою до ГПП, напруга на шинах ВН ЦТ, яка є електрично найбільш віддаленою від ГПП, значення поточної відпайки трансформатора ГПП; кількість перемикачів регулятора під навантаженням (РПН) з початку поточної доби. З виходу нечіткого регулятора знімалися: напрям переміщення регулятора РПН (збільшити або зменшити кількість витків обмотки ВН) та час, за який має бути закінчене перемикачання відпайок.

Усі вхідні і вихідні величини є чіткими значеннями, оскільки знімаються з реальних приладів автоматики і телекерування. Далі, в самому контролері, ці величини вже перетворюються у нечіткі значення. Після опрацювання нечітких правил отримані вихідні змінні знову перетворюються до точного (нормального) виду.

У процесі дослідження були випробувані різні варіанти роботи контролера. Перевірялася доцільність застосування тих чи інших лінгвістичних змінних, зокрема «Кількість» (кількість перемикачів за день).

За вищенаведеним змінним для даної системи було складено 106 правил нечіткого виводу згідно з такими твердженнями:

1. Залежність часу перемикачання (змінна «затримка») вибиралася, враховуючи той факт, що у випадку, коли «напруга» найближчого чи найвіддаленішого ЦТ сильно відрізняється від «нормальної» («дуже низька» або «дуже висока») «затримка» повинна бути «коротка» або «дуже коротка». Якщо «напруга» близька до «нормальної», тоді «затримка» буде великою («довга» або «дуже довга»).

Якщо напруга дорівнює номінальній, тоді час перемикачання дуже довгий, а напрямок перемикачання — «Стоп».

2. Правила визначення значення нечіткої вихідної змінної «напрямок» визначалися таким чином: при нарузі, нижчій за номінальну («дуже низька», «низька»), напрямок перемикачання РПН повинен відповідати значенню «вниз». А при підвищеній нарузі («висока», «дуже висока») напрямок перемикачання РПН приймає значення «вгору». У тих випадках, коли напруга приблизно дорівнює номінальній («нормальне»), РПН не спрацьовує («Стоп»).

3. Окремо було розглянуто дії контролера при аварійних ситуаціях (при коротких замиканнях). У цих випадках необхідно заблокувати роботу РПН. У таких ситуаціях лінгвістична змінна «напруга» набуває значення «аварійне», і з виходу контролера знімається сигнал «Стоп».

4. Оскільки надійність роботи РПН залежить від кількості зроблених перемикачів, то для регулювання була використана відповідна змінна «кількість». У процесі роботи контролер обчислює кількість зроблених перемикачів за добу. Якщо кількість перемикачів «мало», тоді час перемикачання не змінюється. Якщо ж кількість перемикачів велика («не мало»), тоді і затримка перед перемикачанням теж збільшується.

Як об'єкт дослідження в середовищі Simulink була створена комп'ютерна модель підстанції 120/20 кВ, до шин якої підключена нелінійне динамічне навантаження. Структурна схема системи, що моделюється, представлена на рис. 2.

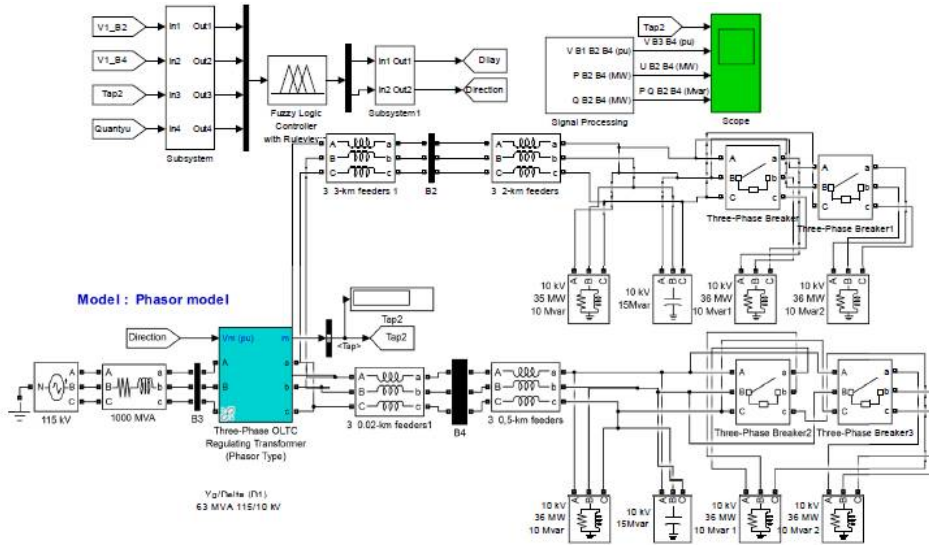


Рис. 2. Модель підстанції 110/10 кВ з нечітким контролером і РПН: Source 110 kV — блок, що описує систему живлення 110 кВ; Transformer — блок, що описує модель трифазного силового трансформатора 35 / 6кВ; Line — блоки, що задають параметри повітряної лінії; V-I measurement — блок вимірювання діючих значень струму і напруги; Dynamic load — блоки, що моделюють трифазне динамічне навантаження; Power demand — блоки, що мають завдання зміни споживаної потужності для блоків динамічного навантаження; Fuzzy-logic controller — блок нечіткого контролера; On-load regulator — блоки регулювання напруги силового трансформатора під навантаженням

У процесі дослідження на моделі були отримані графіки зміни напруги залежно від навантаження в часі.

Реалізація запропонованого алгоритму регулювання напруги на основі нечітких множин дає змогу підтримувати раціональні рівні напруги в розподільній мережі, які отримані на основі аналізу й оптимізації режимів електричної розподільної мережі, що забезпечить раціональний рівень втрат електричної енергії.

Висновки

1. Використання дворівневої системи керування напругою на промисловому підприємстві дає змогу реалізувати принцип декомпозиції і вирішувати завдання керування напругою окремо на рівні трансформатора ГПП і цехових трансформаторів. Координація роботи систем окремих рівнів надає можливість підвищити якість керування та забезпечити енергоефективні режими передавання електричної енергії.

2. Для розробки алгоритмів ефективного керування напругою й оптимізації режимів роботи електричних мереж необхідно створити математичні моделі різних ієрархічних рівнів системи електропостачання.

3. В умовах невизначеності інформації щодо режимних параметрів системи електропостачання алгоритми керування напруги цехового трансформатора і трансформатора ГПП доцільно проводити на основі нечіткої логіки.

Література

1. *Абрамович Б.Н.* Устройство управления режимом напряжения в электрических сетях предприятий сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Д.М. Тарасов, А.П. Шевчук // Записки Горного института. — 2012. — Том 196. — С. 214—217.
2. *Гусаров В.А.* Автоматизация централизованного регулирования напряжения с использованием интегрированной АСУ энергоресурсами / В.А. Гусаров // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2009. — № 3. — С.121—126.
3. *Грабко В.В.* Синтез структуры блока принятия решения ісрархічної системи регулювання напруги / В.В. Грабко, І.Ю. Львов // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 2/2000 (9). — Кременчуг : КГПУ, 2000. — С. 65—68.
4. *Манусов В.З.* Сравнение алгоритмов регулирования, основанных на четкой логике и нечеткой логике на примере работы электротехнической установки / В.З. Манусов, А.В. Мятаж // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов XIII Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 5—7 декабря, 2007. — Томск : изд-во ТПУ, 2007. — С. 47—50.
5. *Hany E.Z. Farag, Ehab F. El-Saadany* A Novel Cooperative Protocol for Distributed Voltage Control in Active Distribution Systems // IEEE Trans. Power Systems. — 2013. —Vol. 28, # 2. — P. 1645—1656.
6. *Балюта С.М.* Управління напругою в системі електропостачання промислового підприємства / С.М. Балюта, Л.О.Копилова, Є.О Корольов // Цукор України. — 2016. — № 3 (123). — С. 20—25.
7. *Штовба С.Д.* Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. — Москва : Горячая Линия — Телком, 2007. — 370 с.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С.Н. Балюта, В.Д. Йовбак, Л.А. Копылова, Е.А. Королев
Национальный университет пищевых технологий

Проблема управления напряжением в целях оптимизации потребления электрической энергии актуальна для промышленности, так как позволяет уменьшить энергоёмкость продукции, выпускаемой предприятиями отрасли. В статье представлена двухуровневая система регулирования напряжения в электрической сети промышленного предприятия, где нижний уровень — это цеховые трансформаторы с ПБВ с электронным коммутатором, а верхний — трансформатор ГПП с РПН. Для управления используется трехуровневая информационная система. Для контроллеров верхнего и нижнего уровней регулирования разработаны алгоритмы управления на основе нечеткой логики, которые обеспечивают информационные, точностные, временные, стоимостные и другие характеристики эффективности функционирования системы управления напряжением.

Ключевые слова: управление напряжением, нечеткая логика, система электроснабжения промышленного предприятия, оптимизация электропотребления, регулирование напряжения трансформатора.