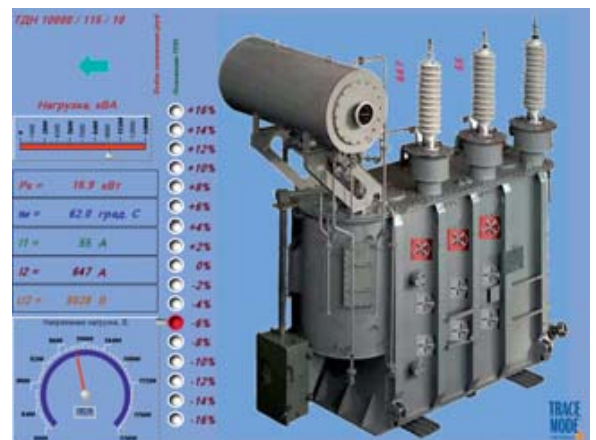
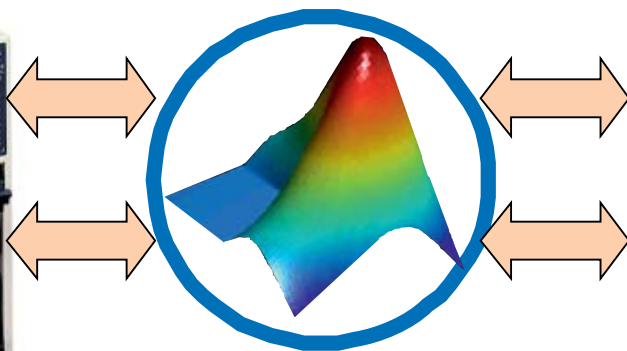
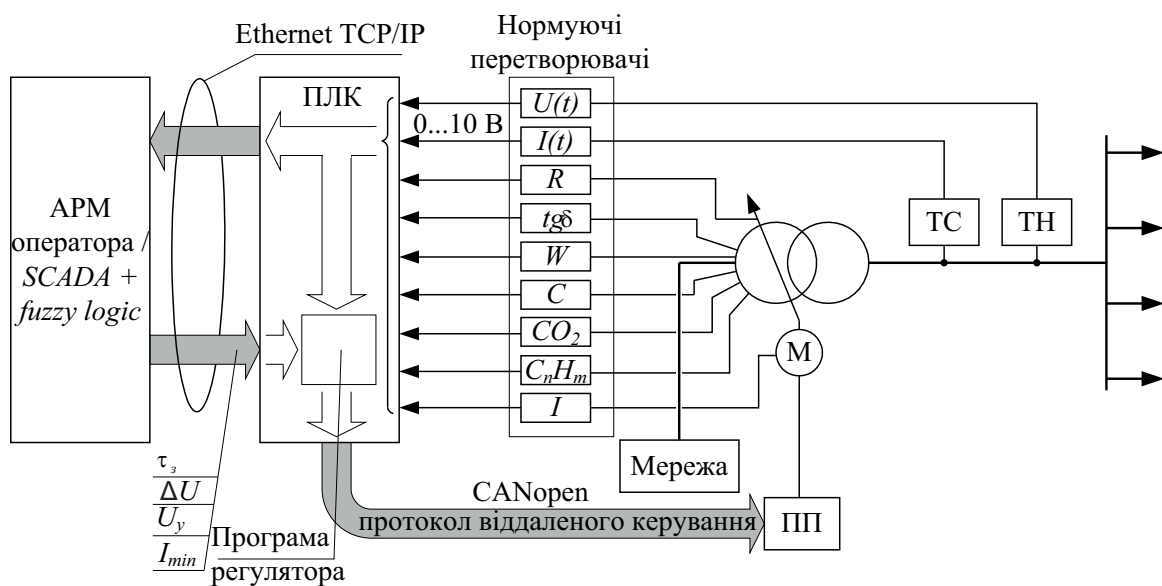


С. М. Левицький, К. І. Колмачов

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. М. Левицький, К. І. Колмачов

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ
РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 681.51: 621.314.222

ББК 32.965: 31.268.88

ЛЗ7

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 30.04.2015 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

О. В. Садовой, доктор технічних наук, професор

Левицький, С. М.

ЛЗ7 Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором напруги : монографія / С. М. Левицький, К. І. Колмачов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 72 с.
ISBN 978-966-641-630-1

В монографії представлено математичну, структурну та комп'ютерну моделі системи автоматичного керування трансформаторної підстанції з інтелектуальним регулятором напруги, які виконано на основі синтезованого закону керування. Розроблено програмне забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи автоматичного керування трансформаторами

Робота розрахована на інженерно-технічних працівників електроенергетичних компаній, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, які спеціалізуються в галузі розробки систем автоматичного керування електротехнічними комплексами.

УДК 681.51: 621.314.222

ББК 32.965: 31.268.88

ISBN 978-966-641-630-1

© С. Левицький, К. Колмачов, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	7
1.1 Види регулювання напруги в електричних мережах	7
1.2 Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації силових трансформаторів	11
1.2.1 Трансформатори з ПБЗ	11
1.2.2 Трансформатори з механічними пристроями РПН	12
1.2.3 Трансформатори з безконтактними пристроями РПН	27
1.3 Узагальнення результатів аналізу	31
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ ЗАКОНУ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ	32
2.1 Синтез закону регулювання напруги трансформаторної підстанції	32
2.2 Синтез структури системи автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором напруги	36
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ	40
3.1 Математичні моделі елементів системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	40
3.2 Математична модель визначення часу затримки на перемикання відгалуження	43
3.3 Комп'ютерне моделювання роботи системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	46
РОЗДІЛ 4 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором	56
4.1. Структурна схема віддаленого керування трансформаторною підстанцією	56
4.2 Розробка програмного забезпечення мікропроцесорного регулятора для системи автоматичного керування трансформаторами	58
ВИСНОВКИ	64
ЛІТЕРАТУРА	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРМ	– автоматизоване робоче місце
ВН	– висока напруга
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина
НН	– низька напруга
ПБЗ	– перемикання без збудження
ПЛК	– програмований логічний контролер
ППП	– пакет прикладних програм
РПН	– регулювання під навантаженням
СІФУ	– система імпульсно-фазового управління
ТН	– трансформатор напруги
ТС	– трансформатор струму

ВСТУП

Актуальність роботи. Впровадження сучасних технологій та новітніх систем автоматизації у вітчизняній промисловості ставить нові вимоги до якості електроенергії та надійності електропостачання підприємства. Електроенергія розглядається як предмет споживання та продажу і повинна відповідати нормам якості [1]. Причому для надання послуг електропостачання слід підтримувати вказані показники (відхилення, несиметрію, несинусоїдність напруги, частоту та ін.) на належному рівні за допомогою спеціальних технічних засобів [2, 3], оскільки електроенергія є специфічним товаром, що споживається практично миттєво, відразу ж після її виробництва.

Існують три основні групи методів підвищення якості електроенергії [4]. В першу чергу, це раціоналізація засобів електропостачання. До цієї групи відносять підвищення потужності мережі, живлення нелінійних споживачів підвищеною напругою тощо. Друга група передбачає удосконалення самих споживачів: номінальне завантаження електродвигунів, використання багатофазних схем випрямлення, введення до складу споживача коригувальних пристроїв тощо. Третя група передбачає використання пристроїв корекції якості – регуляторів одного або деяких параметрів електроенергії.

Найкращою за економічним фактором сьогодні є третя група методів, оскільки зміна структури мережі або оновлення всіх споживачів призведе до значних затрат. Для забезпечення надійної роботи існуючого обладнання необхідне розроблення методів і засобів регулювання якості електричної енергії.

Внаслідок значної протяжності ліній електропередач від електростанцій до споживачів та багатоетапної трансформації електроенергії особливо важливе значення має підтримання норм якості електроенергії не на самих електростанціях, а безпосередньо на вводах споживачів електроенергії. Вирішення цієї проблеми необхідне саме на рівні розподільчих мереж [5]. Більшість крупних споживачів потребують надійного підтримання встановленого рівня напруги на їх вводах, оскільки інші критерії (форма та частота напруги) впливають на втра-

ти енергії в лініях електропередач та обладнанні підстанцій і, відповідно, в їх зменшенні зацікавлені електропостачальні організації [6].

Найважливішим параметром якості електроенергії є рівень напруги. Відхилення напруги, особливо в бік її зменшення, спричиняють збитки в усіх галузях промисловості [7]. Також при пониженнях напруги збільшуються втрати потужності в електромережах [8–9]. В теперішній час в енергосистемах застосовується велика кількість пристроїв, які забезпечують підтримання режиму напруги. Це в першу чергу трансформатори з регульованим під навантаженням коефіцієнтом трансформації, конденсаторні батареї, реактори, синхронні компенсатори, генератори електростанцій тощо [10]. Вказані пристрої оснащуються регуляторами, які забезпечують підтримання напруги на певному рівні.

Основними засобами регулювання напруги в електричних мережах є силові трансформатори з пристроями регулювання під навантаженням (РПН). Ресурс механічних контактів пристрою РПН силового трансформатора порівняно малий, оскільки доводиться комутувати робочі струми. Ремонт пристрою РПН – операція трудомістка (з бака трансформатора потрібно зливати масло), і вартість такого ремонту значна. Крім того, додаються збитки від припинення електропостачання споживачів. Все це приводить до того, що оперативний персонал підстанцій намагається проводити перемикання відпайок силового трансформатора якомога рідше. З цієї причини автоматичні регулятори напруги силових трансформаторів, як правило, відключаються. Відповідно, якість напруги значно знижується, а втрати від неякісного електропостачання зростають [11].

Отже, питання розробки електротехнічних комплексів для регулювання напруги та одночасного створення задовільного режиму системи електропостачання є актуальним як з технічної точки зору, що забезпечить гнучкість у вирішенні поставлених завдань, так і з економічної сторони, оскільки присутнє спрямування на зменшення втрат електроенергії та покращення її якості.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Види регулювання напруги в електричних мережах

Для підтримання рівня напруги на затискачах споживача в допустимих межах в різних місцях електричної мережі проводять регулювання напруги, яке може бути *централізованим* і *локальним* [12].

Централізоване регулювання напруги проводиться у вузлах електричних мереж і використовується при живленні великої кількості споживачів (велике підприємство, місто). В такому регулюванні можна виділити три підходи: стабілізація напруги, двоступінчасте регулювання напруги і зустрічне регулювання напруги.

Стабілізація напруги застосовується для споживачів з практично незмінним навантаженням, наприклад для тризмінних підприємств, де рівень напруги необхідно підтримувати постійним на протязі доби. Добовий графік таких споживачів приведений на рис. 1.1.

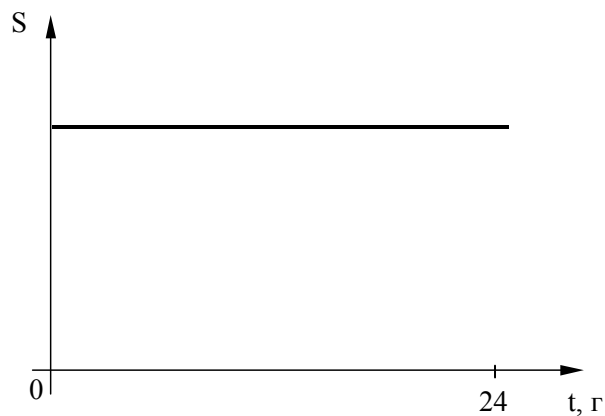


Рисунок 1.1 – Добовий графік для споживачів з незмінним навантаженням

Для споживачів з чітко вираженим двоступінчастим графіком навантаження (рис. 1.2), наприклад, для однозмінних підприємств, застосовують *двоступінчасте регулювання напруги*. При цьому підтримуються два рівні напруги впродовж доби у відповідності до графіка навантаження.

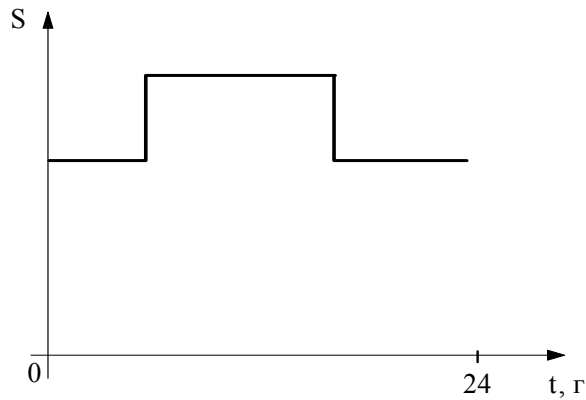


Рисунок 1.2 – Добовий графік для споживачів з двоступінчастим навантаженням

У випадку змінного протягом доби навантаження (рис. 1.3) здійснюється так зване *зустрічне регулювання напруги*. Для кожного значення навантаження будуть мати своє значення і втрати напруги, отже, і сама напруга буде змінюватись зі зміною навантаження. Для того, щоб відхилення напруги не виходили за межі допустимих значень, необхідно регулювати напругу в залежності від струму навантаження.

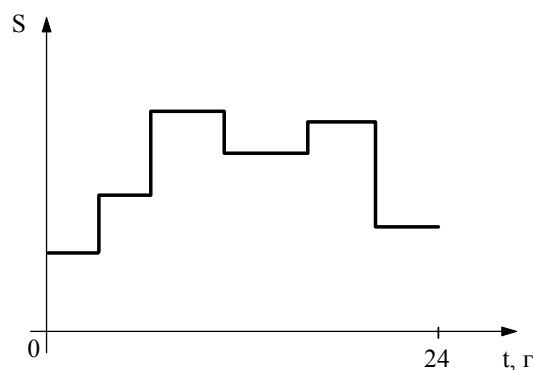


Рисунок 1.3 – Добовий графік споживачів із змінним навантаженням

Для детального розгляду зустрічного регулювання напруги використаємо схему, подану на рис. 1.4а, де трансформатор представлений як опір трансформатора та ідеальний коефіцієнт трансформації n [12].

На рис. 1.4а прийняті такі позначення: U_1 – напруга на шинах ЦП; $U_{2В}$ – напруга на шинах високої напруги (ВН) районної підстанції; $U_{2Н}$ – напруга на шинах низької напруги (НН) районної підстанції; U_3 – напруга у споживачів.

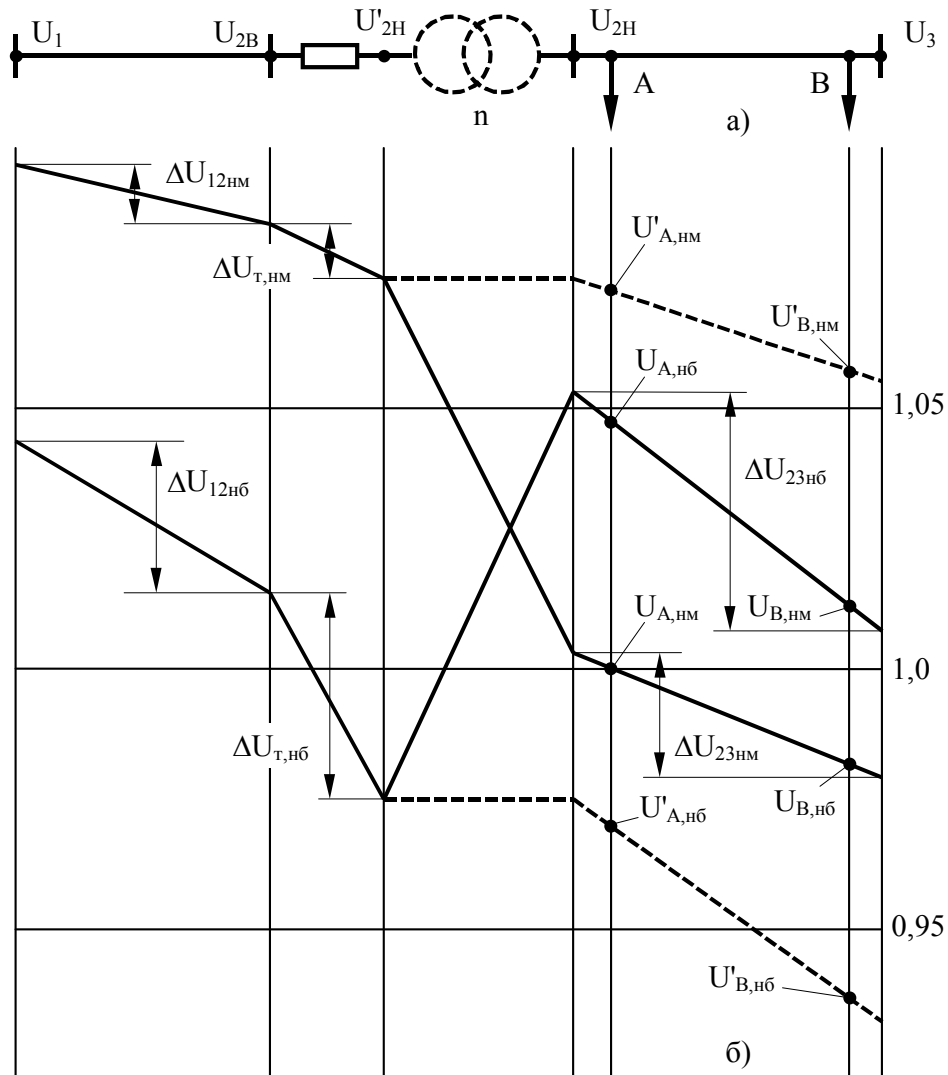


Рисунок 1.4 – Зустрічне регулювання напруги:

а – схема заміщення; б – епюри напруг

Напруга на шинах ВН районної підстанції визначається за формулою

$$U_{2B} = U_1 - \Delta U_T. \quad (1.1)$$

Напруги на шинах ВН і НН відрізняються на величину втрат напруги в трансформаторі ΔU_T , і, крім того, в ідеальному трансформаторі напруга понижується у відповідності до коефіцієнта трансформації, що необхідно враховувати при виборі регулювального відгалуження.

На рис. 1.4б показані графіки зміни напруги для двох режимів: найменших та найбільших навантажень. При цьому по осі абсцис від-

кладені втрати напруги, а по осі ординат – значення відхилень напруги.

З рис. 1.4б (пунктирні лінії) видно, що при $n = 1$ в режимі мінімальних навантажень напруга у споживачів буде вищою, а в режимі максимальних навантажень – нижчою за допустиме значення (тобто відхилення U більші за допустимі). При цьому приймачі електроенергії, що під'єднані до мережі НН (тобто в точках А і В), працюватимуть в недопустимих умовах. Змінюючи коефіцієнт трансформації трансформатора районної підстанції n , змінюють $U_{2Н}$, тобто регулюють напругу на споживачах (суцільна лінія на рис. 1.4б).

В режимі найменших навантажень підвищують коефіцієнт трансформації n , зменшуючи вторинну напругу $U_{2Н}$ до значення, якомога ближчого до $1,0U_{ном}$. В такому режимі вибирають таке найбільше стандартне значення n , щоб виконувалась умова

$$U_{2Н,нм} \geq 1,0 U_{ном}. \quad (1.2)$$

В режимі найбільших навантажень знижують n , збільшуючи напругу $U_{2Н}$ до значення, якомога ближчого до $1,05U_{ном}$. В цьому режимі вибирають таке найбільше стандартне значення n , щоб виконувалась така умова:

$$U_{2Н,нб} \geq 1,05U_{ном}. \quad (1.3)$$

Таким чином напруга на затискачах споживачів як віддалених, так і близькорозташованих, вводиться в допустимі межі. При такому регулюванні в режимі найбільших навантажень напруга нижча і вона підвищується, а в режимі найменших навантажень, навпаки, напруга вища і вона понижується. Тому таке регулювання напруги називається **зустрічним**.

Локальне регулювання напруги проводиться безпосередньо біля споживачів (електродвигунів, електричних печей, тощо) і поділяється на групове та індивідуальне. Групове регулювання застосовується для групи споживачів, а індивідуальне – в основному, в спеціальних цехах.

1.2 Регулювання напруги зміною коефіцієнта трансформації силових трансформаторів

Основним засобом регулювання напруги є трансформатори районних підстанцій, оскільки за їх допомогою можна узгодити вимоги до напруги близьких і віддалених споживачів [12–14].

Трансформатори можуть бути під'єднані в різних пунктах електричних мереж, в яких режим напруги заздалегідь, як правило, невідомий і, крім того, може змінюватись в процесі експлуатації мережі. Тому трансформатори мають крім основних ще й додаткові регульовальні відгалуження. Змінюючи ці відгалуження, можна дещо змінити коефіцієнт трансформації (в межах 10–20 %).

За конструктивним виконанням розрізняють трансформатори двох типів:

- з перемиканням регульовальних відгалужень без збудження, тобто з відключенням від мережі (скорочено трансформатори з ПБЗ);
- з перемиканням регульовальних відгалужень під навантаженням (скорочено – трансформатори з РПН).

Як правило, регульовальні відгалуження виконуються на стороні високої напруги ВН трансформатора, яка має менший робочий струм. При цьому спрощується пристрій перемикання.

1.2.1 Трансформатори з ПБЗ

В теперішній час трансформатори з ПБЗ виготовляють з основним і чотирма додатковими відгалуженнями. Принципова схема такого трансформатора наведена на рис. 1.5. Основне відгалуження має напругу, рівну номінальній напрузі мережі, до якої приєднується цей трансформатор (6, 10, 20 кВ). При основному відгалуженні коефіцієнт трансформації трансформатора називають номінальним. При використанні чотирьох додаткових відгалужень коефіцієнт трансформації відрізняється від номінального, відповідно, на +5, +2,5, –2,5 і –5 %.

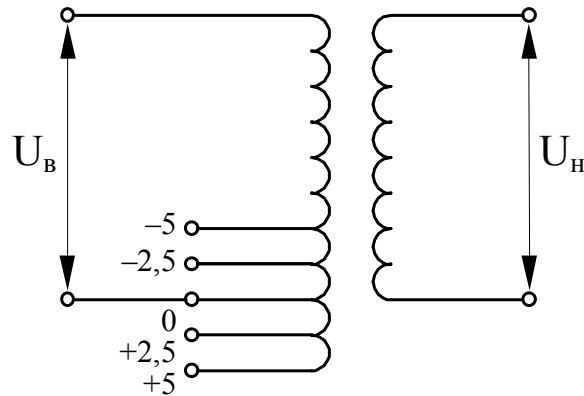


Рисунок 1.5 – Принципова схема трансформатора з ПБЗ

Для того, щоб здійснити перемикання регульовального відгалуження, необхідно відключити трансформатор від мережі. Такі перемикання виконуються рідко, практично лише при сезонній зміні навантажень. Тому в режимі найбільших і найменших навантажень впродовж доби (наприклад, вдень і вночі) трансформатор з ПБЗ працює на одному регульовальному відгалуженні і, відповідно, з одним і тим же коефіцієнтом трансформації. При цьому неможливо виконати вимоги зустрічного регулювання, що є основним недоліком трансформаторів з ПБЗ.

1.2.2 Трансформатори з механічними пристроями РПН

Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням [15], тобто з вбудованим пристроєм РПН [16–18] (рис. 1.6а) відрізняються від трансформаторів з ПБЗ наявністю спеціального пристрою перемикання, а також збільшеною кількістю ступенів регульовальних відгалужень і діапазоном регулювання.

На рис. 1.6б зображена принципова схема трансформатора з РПН. Обмотка високої напруги ВН цього трансформатора складається з двох частин – регульованої та нерегульованої. На регульованій частині є низка відгалужень до нерухомих контактів 1–4. Відгалуження 1–2 відповідають частині витків, які ввімкнуті узгоджено з витками основної обмотки (напрямок струму вказаний на рис. 1.6б стрілками). При вмиканні відгалужень 1–2 коефіцієнт трансформації збільшується. Відгалуження 3–4 відповідають частині витків, які з'єднані зустрічно по

відношенню до витків основної обмотки. Їх вмикання зменшує коефіцієнт трансформації, оскільки компенсує дію частини витків основної обмотки. Основним виводом обмотки ВН трансформатора є точка 0. Число витків, що діють узгоджено і зустрічно з витками основної обмотки, може бути неоднаковим.

На регульованій частині обмотки є пристрій перемикання, який складається з рухомих контактів ϵ і z , контакторів K1 і K2 та реактора P. Середина обмотки реактора з'єднана з нерегульованою частиною обмотки трансформатора. В нормальному режимі струм навантаження обмотки ВН розподіляється рівно між половинами обмотки реактора. Тому магнітний потік малий і втрати напруги в реакторі також малі.

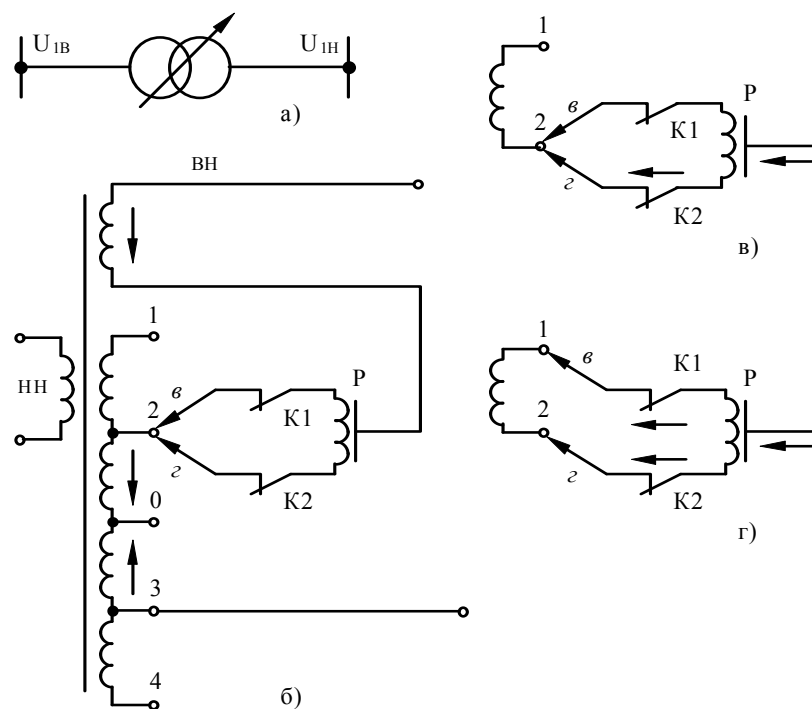


Рисунок 1.6 – Трансформатор з РПН: а–умовне позначення;
б–принципова схема; в, г–перемикання відгалужень

Припустимо, що необхідно переключити пристрій з відгалуження 2 на відгалуження 1. При цьому вимикають контактор K1 (див. рис. 1.6в), переводять рухомий контакт ϵ на відгалуження 1 і знов вмикають контактор K1 (див. рис. 1.6г). Таким чином, секція 1–2 обмотки виявляється замкнутою на обмотку реактора P. Значна індукти-

вність реактора обмежує урівнюючий струм, який виникає внаслідок наявності напруги на секції 1–2 обмотки. Після цього вимикають контактор К2, переводять рухомий контакт z на відгалуження 1 і вмикають контактор К2.

За допомогою РПН можна перемикає відгалуження, змінюючи тим самим коефіцієнт трансформації, під навантаженням, тобто впродовж доби. При цьому можливо вибрати в режимах найбільших і найменших навантажень необхідні відгалуження і заокруглити їх до таких найближчих значень, щоб виконувались вимоги зустрічного регулювання.

Недоліками трансформаторів з РПН є їх висока вартість і обмежена кількість перемикачів, що знижує якість регулювання. Часто трансформатори з РПН комплектуються автоматичними регуляторами, які реалізують певний закон регулювання напруги.

Найпростішим законом регулювання напруги є регулювання за її відхиленням. Відомий пристрій для регулювання напруги на силовому трансформаторі [19], який реалізує такий закон регулювання. Функціональна схема цього пристрою наведена на рис. 1.7.

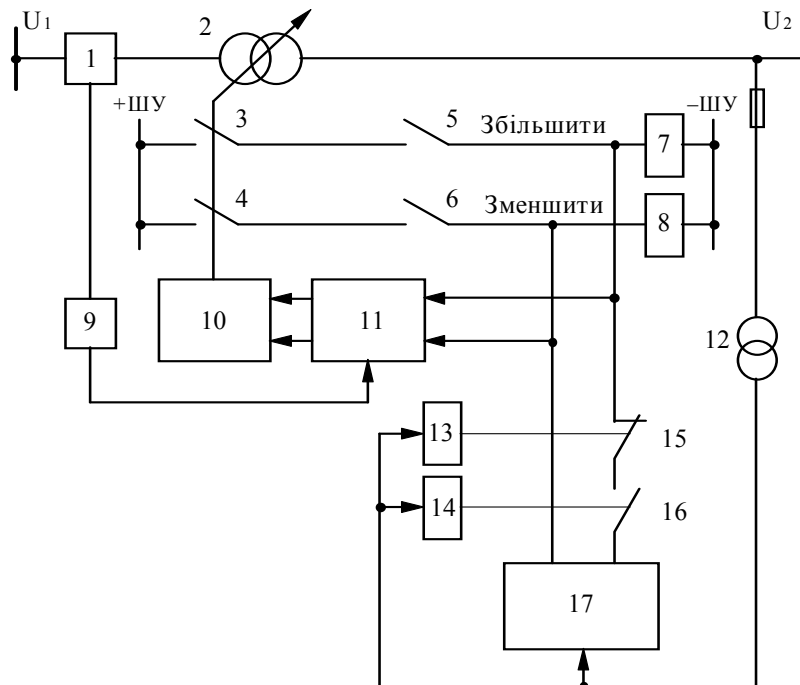


Рисунок 1.7 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги силового трансформатора

На рис. 1.7: 1 – датчик струму; 2 – силовий трансформатор з РПН; 3, 4 – контакти слідкування веденого валу перемикача; 5 – контакти реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити»; 6 – контакти реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити»; 7 – реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити»; 8 – реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити»; 9 – реле максимального струму; 10 – електропривод пристрою РПН; 11 – блокувальний елемент; 12 – трансформатор напруги; 13 – реле мінімальної напруги; 14 – реле максимальної напруги; 15 – контакти реле мінімальної напруги; 16 – контакти реле максимальної напруги; 17 – автоматичний регулятор напруги.

При перевищенні напругою верхньої межі зони нечутливості регулятор напруги 17 подає короткочасний сигнал «Зменшити» на електропривод 10 для перемикання відгалужень трансформатора на пониження напруги. При виході напруги за нижню межу зони нечутливості регулятор подає короткочасний сигнал «Збільшити» на підвищення напруги. Сигнал «Зменшити» (або «Збільшити») також надходить на реле запам'ятовування циклу перемикання «Зменшити» 8 (або реле запам'ятовування циклу перемикання «Збільшити» 7), яке продовжує подавати команду на електропривод до закінчення процесу перемикання.

Також цей пристрій реалізує блокування електропривода при виникненні надструмів в силовому трансформаторі 2 під час перемикання за допомогою реле максимального струму 1 і блокувального елемента 11. Після зникнення надструмів блокування знімається і відбувається завершення початого перемикання. При великих пониженнях напруги сигнал «Збільшити» блокується, і перемикач не приходить до руху.

Описаний пристрій для регулювання напруги силових трансформаторів не враховує навантаження споживачів, тому за допомогою нього неможливо реалізувати закон зустрічного регулювання напруги.

Пристрій для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі, який дає змогу врахувати навантаження споживачів, описано в [20]. Функціональна схема такого пристрою наведена на рис. 1.8.

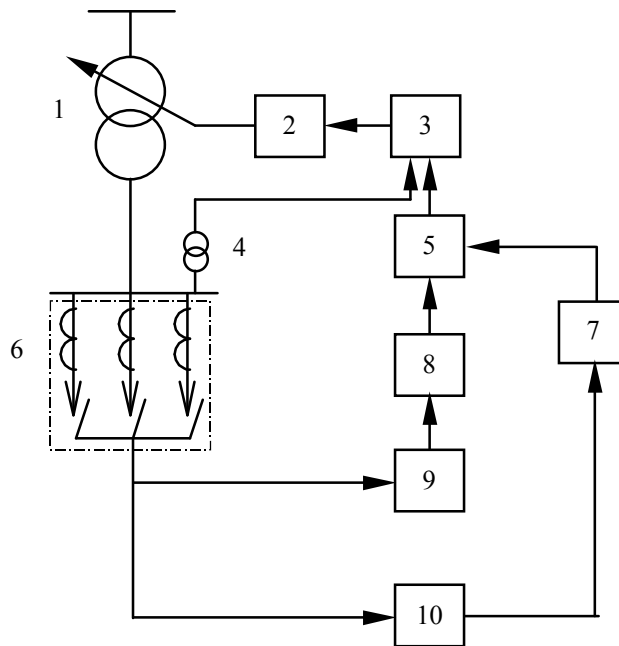


Рисунок 1.8 – Функціональна схема пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Постійна складова струму навантаження, яка виділяється фільтром 9 і проходить через функціональний перетворювач 8, забезпечує оптимальну напругу в центрі живлення за умовами найменшої кількості споживаної електроенергії поза допустимим діапазоном зміни напруги. Змінна складова з блоків струмової компенсації 6, яка виділяється фільтром 10 і проходить через підсилювач 7, забезпечує зміну напруги в центрі живлення при коливаннях навантаження у споживачів. Обидві складові додаються одна до одної в суматорі 5 і сума надходить на блок автоматичного регулювання напруги 3. На цей же блок надходить значення напруги вторинної обмотки силового трансформатора, яка вимірюється датчиком напруги 4.

Хоча описаний пристрій враховує зміну навантаження споживачів, при частих коливаннях цього навантаження кількість перемикачів пристрою РПН 2 буде досить великою, що призведе до швидкого спрацювання ресурсу контактів пристрою РПН.

Відомий також спосіб регулювання напруги силового трансформатора [21], в якому для зменшення зони нечутливості регулятора передбачається після перемикачів блокувати команду на перемикачів в протилежну сторону, доки не буде явної тенденції регульованої на-

В описаному способі регулювання напруги на силовому трансформаторі не враховується напрям зміни напруги після виходу її за межі зони нечутливості, що призводить до зайвих перемикань пристрою РПН.

На підстанціях широко використовуються пристрої автоматичного регулювання трансформаторів під навантаженням типу АРТ-1Н [22], перевагою яких є підвищення стійкості регулювання напруги за рахунок затримки сигналу на перемикання на деякий час. Цим досягається уникнення реакції системи на короткочасні коливання напруги, а тим самим підвищується надійність системи в цілому. До того ж такий пристрій дає змогу проводити оперативну дистанційну зміну уставки, що нерідко використовується в різних системах регулювання напруги, побудованих на цьому регуляторі [23, 24].

Однак цей пристрій не відслідковує напрямок зміни напруги і тим самим нерідко виконує зайві перемикання пристрою РПН, що негативно відображається на ресурсі останнього. Також АРТ-1Н не здатний швидко реагувати на значні відхилення напруги, що знижує якість регулювання напруги.

Існує спосіб регулювання напруги силового трансформатора [25], який передбачає автоматичну зміну уставки регулятора напруги при перевищенні напругою струмової компенсації граничного значення. Це запобігає недопустимому підвищенню регульованої напруги на близькорозташованих споживачах при великому струмі навантаження лінії.

Функціональна схема пристрою, що реалізує цей спосіб, наведена на рис. 1.10, де: 1, 2 – датчики струму; 3 – пусковий орган; 4 – елемент затримки часу; 5 – виконавчий орган; 6 – елемент блокування струмової компенсації; 7 – силовий трансформатор; 8 – трансформатор напруги; 9 – електропривод; 10 – блок автоматичного регулювання.

В заданому пристрої пусковий орган 3 порівнює сумарну напругу струмової компенсації з максимально допустимою і при її перевищенні подає сигнал через блок часової затримки 4 на виконавчий орган 5, який видає команди на зміну уставки блока автоматичного регулювання 10 і блокування струмової компенсації на елемент блокування струмової компенсації 6. Кількість датчиків струму 1 і 2, кожний з

яких має два струмових входи, може бути довільною (в залежності від кількості змінних регулювання). При зменшенні сумарної напруги струмової компенсації до значення, меншого за максимально допустиме, пристрій повертає блок автоматичного регулювання 10 до нормального режиму роботи.

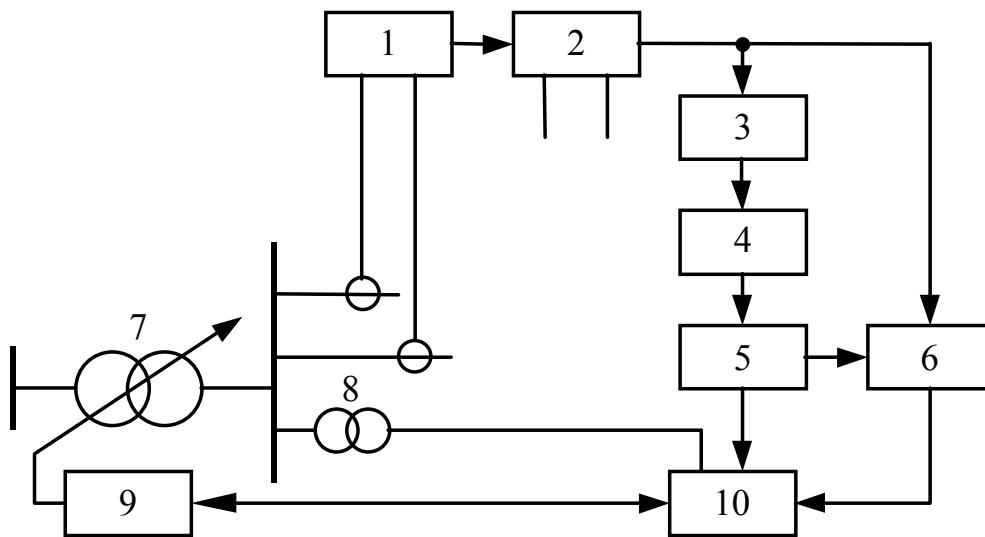


Рисунок 1.10 – Функціональна схема пристрою регулювання напруги силового трансформатора

Схожий спосіб регулювання напруги реалізує пристрій для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі [26], функціональна схема якого наведена на рис. 1.11, де 1 – силовий трансформатор; 2 – пристрій РПН; 3 – блок автоматичного регулювання напруги; 4 – датчик напруги; 5 – функціональний перетворювач струму компенсації; 6 – блоки струмової компенсації.

Цей пристрій в режимі мінімальних навантажень здійснює регулювання напруги за усередненими відхиленнями напруги, а при збільшенні навантажень до максимальних відбувається перехід до регулювання за граничними відхиленнями напруги в вузлах мережі з мінімізацією споживання неякісної енергії. Якість регулювання напруги на споживачах розподільчої електричної мережі підвищується за рахунок зниження кількості електроенергії, яка споживається поза допу-

стимим діапазоном зміни напруги, при зміні навантаження в широких межах.

Обидва описані вище пристрої регулювання напруги змінюють уставку типового регулятора напруги АРТ-1Н, тому мають ті ж самі обмеження.

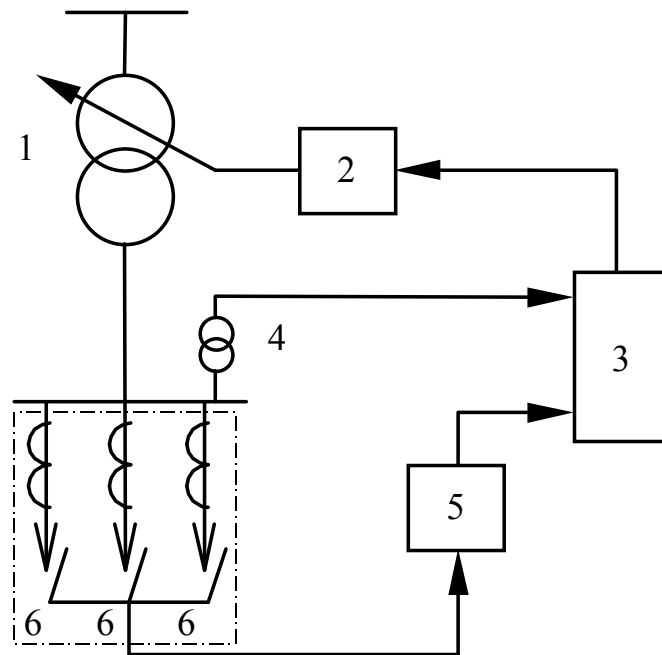


Рисунок 1.11 – Функціональна схема пристрою для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

Існує спосіб регулювання напруги за критерієм економічних збитків від відхилення напруги від нормованого значення [27]. В [28] описаний пристрій автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі за критерієм економічних збитків від неякісного енергопостачання, функціональна схема якого показана на рис 1.12.

На рисунку 1.12: 1 – силовий трансформатор з пристроєм РПН; 2 – блок керування відпайками трансформатора; 3 – датчик напруги; 4 – датчик активної потужності; 5 – датчик реактивної потужності; 6–8 – аналогово-цифрові перетворювачі; 9 – мікроконтролер.

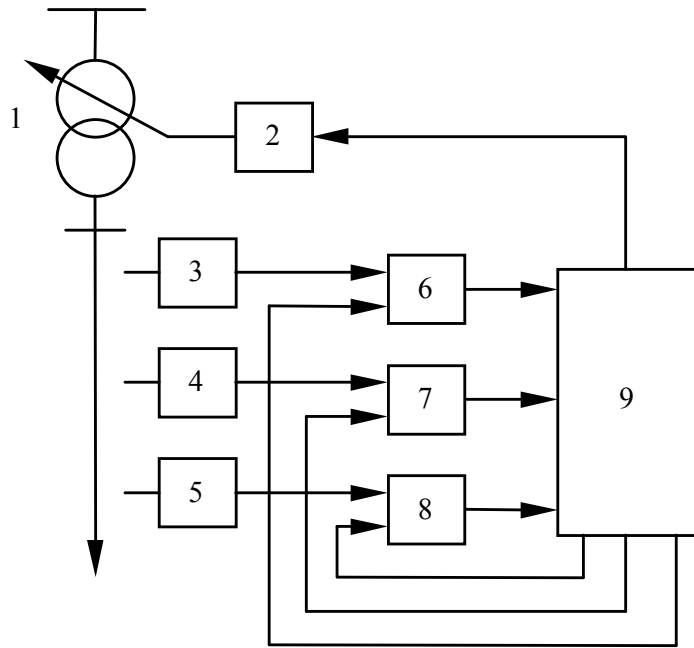


Рисунок 1.12 – Функціональна схема пристрою
для автоматичного регулювання напруги вузла електричної мережі

З датчиків напруги 3, активної 4 та реактивної 5 потужності через аналогово-цифрові перетворювачі 6–8, відповідно, здійснюється паралельне програмно-синхронне введення параметрів режиму, які змінюються в часі – напруги U , активної і реактивної потужностей P і Q в мікроконтролер 9, де за заданою програмою розраховують:

– відхилення поточного значення напруги від номінального

$$v = U - U_{\text{н}}; \quad (1.4)$$

– економічну характеристику вузла навантаження електричної мережі

$$y(v) = \alpha v^2 + \beta v + c, \quad (1.5)$$

де α , β і c – коефіцієнти, які залежать від режиму роботи і складу обладнання в даному вузлі

$$\begin{cases} \alpha = f(Q, P), \\ \beta = f(P, Q); \end{cases} \quad (1.6)$$

– функцію приналежності нечіткого обмеження відхилень напруги

$$M_n(v) = \begin{cases} 0, & v \leq a; \\ \frac{\max : y(v_i) - y(v_i)}{\max : y(v_i) - \min : y(v_i)}, & v \in [a, b]; \\ 0, & v > b, \end{cases} \quad (1.7)$$

де a і b – значення граничних допустимих величин відхилень напруги;
 $\max : y(v_i)$, $\min : y(v_i)$ – максимальне і мінімальне значення функції економічних збитків в діапазоні допустимих значень відхилень напруги;

– оптимальне значення відхилення напруги для даного вузла навантаження

$$v_{\text{опт}} = \text{opt } M(v); \quad (1.8)$$

– гістограму відхилень напруги від номінального значення як густину розподілу ймовірностей $P(v)$;

– значення нечіткого інтеграла від функції приналежності нечіткого обмеження за імовірнісною мірою $P(v)$ як

$$F = f M(v). \quad (1.9)$$

Перемикання проводиться лише в тому випадку, коли воно приведе до значного зменшення збитків від неякісної електроенергії, зменшуючи тим самим кількість перемикачів пристрою РПН.

Цей же спосіб регулювання напруги з дещо простішою реалізацією забезпечує пристрій, описаний в [29]. Як і попередні, такий спосіб регулювання напруги не дає можливості швидко відпрацювати значне різке відхилення напруги.

Спосіб регулювання напруги за розрахованими залежностями струму від напруги в центрі живлення описаний в [30]. Спосіб полягає в тому, що за залежностями $f_n = I(U)$ струму і напруги в центрі живлення для n характерних режимів розподільчої мережі визначають оптимальну залежність за мінімумом втрат електроенергії з урахуванням обмежень напруги за мінімумом і максимумом і за вимірними поточними значеннями I та U поточний режим ідентифікують з одним з n заздалегідь розрахованих характерних режимів. За оптимальною залежністю визначають оптимальну напругу для заданого режиму і здійснюють перемикання РПН з попередньою перевіркою допустимості такого перемикання.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 - ГОСТ 13109-97. – [Введ. 1999-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 33 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях. / Б. И. Мокин , Ю. Ф. Выговский – К. : Техніка, 1985. – 104 с.
3. Карташев Илья Ильич. Управление качеством электрической энергии : монографическое издание / И. И. Карташев, В. Н. Тульс. – М. : МЭИ, 2005. – 320 с.
4. Скороходов В. А. Обеспечение энергосбережения при повышении качества электрической энергии/ В. А. Скороходов, П. Ф. Митрясов // Научные основы создания энергосберегающей техники и технологий : тезисы докладов Всесоюзной конференции. – Москва, 1990. – С. 254–56.
5. Воротницкий Валерий Эдуардович. Повышение эффективности управления распределительными сетями [Электронный ресурс] / В. Э. Воротницкий // Энергосбережение. 2005. – № 10. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3046
6. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 720 с.
7. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – 2-е изд., перераб. и доп./ И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
8. Поспелов Г. Е., Потери мощности и энергии в электрических сетях. / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч; под ред. Г. Е. Поспелова. – М. : Энергоиздат, 1981. – 216 с.
9. О потреблении активной мощности электроприемников при отклонении напряжения/ Н. М. Яндульский, Н. Ф. Головатюк, В. М. Хлыстов, и др // Национальный университет Украины «КПИ». – К. 1996. – 15 с. Деп. в ГНТБ Украины 12.06.96 г., № 1437–Ук96.
10. Орлов В. С. Дополнительные потери мощности и энергии при отклонении напряжения и частоты / В. С. Орлов // Изв. вузов. Сер. «Энергетика». – 1985. – № 6. – С. 19–23.

11. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : монографія / В. В. Грабко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
12. Веников В. А., Регулирование напряжения в электроэнергетических системах./ В. А. Веников, В. И. Идельчик, М. С. Лисеев – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
13. Электрические системы и сети / [Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. И. Денисенко и др.] ; под. ред. Г. И. Денисенко.– К. : Вища школа, головное изд-во, 1986. – 584 с.
14. Testa Alfredo. Regolazione della tensione in cabine MT/BT in presenza di carichi non omotetici /Testa Alfredo, Curcio Ciuseppe, Menniti Daniele // Energ. elett. – 1993. – 70, № 10. – P. 416–422.
15. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой // Мировая энергетика. – 1996. – № 4. – С. 27–33.
16. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. – 2-е изд., перераб. и исправл./ В. В. Порудоминский – М. : «Энергия», 1974. – 288 с.
17. Пат. 44616А Україна, МКИ Н 01 F 29/04, Н 01 Н 19/12. Трифазний перемикач відгалужень обмоток трансформатора під навантаженням/ А. Л. Вайнштейн, Р. А. Ангоріна, М. Ф. Андросов, Т. М. Синицина (Україна); ВАТ «Український наук.-досл. проектно-конструк. та технол. інститут трансформаторобудування». – № 2001064055; Заявл. 13.06.2001; Опубл. 15.02.2002.
18. Пат. 27824 Україна, МКИ Н 01 F 29/02, Н 01 Н 9/00. Перемикач ступенів обмоток трансформатора/ Д. Дохнальд, Д. Неймер, В. Альбрехт, Г. Клос, Р. Лаутерволд, Х. Лісманн-Міске (Німеччина); Машинен фабрик рейнхаузен Гмбх. – № 94005451; Заявл. 06.05.93; Опубл. 16.10.2000.
19. А. с. 729810 ССРСР, МКИ Н 02 Р 13/06 Устройство для регулирования напряжения на силовом трансформаторе / Н. М. Балдин (ССРСР). – № 2468831/24-07; Заявл. 23.03.77; Опубл. 25.04.80, Бюл. № 15.
20. А. с. 1598044 ССРСР, МКИ Н 02 J 3/12 Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети / Е. Ю. Линькова, А. В. Лужнов, Ф. Н. Рассказов (ССРСР). – № 4447584/24-07; Заявлено 12.05.88; Опубл. 07.10.90, Бюл. №37.

21. А. с. 1757015 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Способ регулирования напряжения в электрической сети/ В.Г. Васильев (СССР). – № 4921817/07; Заявл. 29.01.91; Оpubл. 23.08.93, Бюл. №31.

22. Устройство автоматического регулирования трансформаторов под нагрузкой типа АРТ-1Н. Техническое описание и инструкция по эксплуатации устройства АРТ-1Н. – Рига : РОЗ «Энергоавтоматика», 48 с.

23. Круть Н. С. Регулирование напряжения силовых трансформаторов подстанций энергосистемы по каналам телемеханики / Н. С. Круть, В. А. Ерошенко. // Электрические станции. – 1989. – № 6. – С. 81–89.

24. Яндульский Я. С. Вопросы регулирования напряжения в электрических сетях/ Я. С Яндульский, Н. Ф. Головатюк, В. М. Хлыстов // Энергетика и электрификация. – 1996. № 4. – С. 36–38.

25. А. с. 1473003 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Способ регулирования напряжения в электрической сети / В. М. Слодарж (СССР). – № 4033802/24-07; Заявл. 06.03.86; Оpubл. 15.04.89, Бюл. № 14.

26. А. с. 1171901 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети / К. В. Киреев, Ф. Н. Рассказов (СССР). – № 3468435/24-07; Заявл. 14.07.82; Оpubл. 07.08.85, Бюл. № 29.

27. Немцев Г. А., Некряченко Г. П. Регулирование напряжения в системах электроснабжения с учетом ущерба от его отклонения \ Г. А. Немцев, Г. П. Некряченко // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Тезисы докладов Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Чебоксары, – 1996. – С. 22–24.

28. А. с. 1654917 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Способ автоматического регулирования напряжения узла электрической сети/ Г. Г. Трофимов, О. М. Ройзман, Р. Д. Абилов (СССР). – № 4498743/07; Заявл. 25.10.88; Оpubл. 07.06.91, Бюл. № 21.

29. А. с. 1312676 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Устройство для автоматического регулирования напряжения узла электрической сети / С. П. Гнипа, Ф. Н. Рассказов (СССР). – № 3864626/31-07; Заявл. 11.03.85; Оpubл. 23.05.87, Бюл. № 19.

30. А. с. 1562960 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Способ регулирования напряжения в центре питания распределительной сети / В. И. Идельчик, В. Н. Ковалевич, Ю. Г. Кононов, Ф. А. Сбитнев

(СССР). – № 4292551/24-07; Заявл. 30.07.87; Оpubл. 07.05.90, Бюл. № 17.

31. А. с. 1288816 СССР, МКИ Н 02 J 3/12 Устройство автоматического регулирования напряжения в электрических сетях/ В. И. Зак, Н. С. Маркушевич (СССР). – № 3904043/24-07; Заявл. 30.04.85; Оpubл. 07.02.87, Бюл. № 5.

32. А. с. 1140094 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06. Регулятор напряжения для силовых трансформаторов/ Б. И. Мокин, Н. А. Головатюк, А. Г. Маладыка (СССР). – № 3529866/24-24; Заявл. 24.12.82; Оpubл. 15.02.85, Бюл. № 6.

33. Gueth Gerhard. Statische Pegeltransformatoren für electrische Energienebertragungssysteme: Diss. Dokt. Techn. Wiss Eidgenoess / Tech. Hochschul.–Zürich, 1982.

34. Применение тиристорov в переключающих устройствах трансформаторов общего назначения [Дмитренко А. И., Красов А. И., Пироженко А. Н. и др.] // НТС, ЭП. Сер. «Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы». – 1974. – № 9/14. – С. 15–17.

35. А. с. 1257747 СССР, МКИ Н 02 J 3/18 Устройство для регулирования переменного напряжения / А. И. Дорошенко, В. А. Николаенко, Ю. И. Елумахов (СССР). – № 3848458/24-07; Заявлено 24.01.85; Оpubл. 1986, Бюл. № 34.

36. А. с. 599326 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06, Н 03 К 17/56 Устройство для переключения ответвлений силового трансформатора / В. П. Дудин, А. Н. Пироженко (СССР). – № 2376889/24-07; Заявл. 24.06.76; Оpubл. 25.03.78, Бюл. № 11.

37. Замятин В. Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – М. : Радио и связь, 1988. – 576 с.

38. Скаржепа В. А., Устройства автоматики на тиристорах./ В. А. Скаржепа, А. А. Морозов – К. : Техника, 1974. – 224 с.

39. Пат. 25246 України, МКИ Н 02 J 3/24. Спосіб регулювання напруги В. О. Удовенко; Заявл. 15.01.98; Оpubл. 25.12.98, Бюл. № 6.

40. Пат. 4733158 США, МКИ G 05 F 1/16. Control circuit for tap-switching power supplies and multitap transformers: Marchione Vito J., Brunelle James W; Datametrics Corp. – № 898713; Заявл. 21.08.86; Оpubл. 22.03.88; НКИ 323/258.

41. Черепов В. И. Оценка влияния выбросов и провалов напряжения на работу электроприемников/ В. И. Черепов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1982. – № 12. – С. 1476–1477.
42. Ермаков В. Ф. Экспериментальное исследование влияния провалов напряжения питающей сети на работу электроприемников/ В. Ф. Ермаков, В. И. Черепов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 1997. – № 1. – С. 38–41.
43. Рубаненко О. Є. Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання [Електронний ресурс]. / О. Є. Рубаненко // Видавництво Львівської політехніки. – № 597. – 2007. – С. 14–19. – Режим доступу : http://vlp.com.ua/files/03_12.pdf.
44. Пат. 81615 Україна. Інтелектуальний регулятор напруги трансформаторної підстанції/ С. М. Левицький, К. І. Колмачов ; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № U 2012 14128 ; Заявл. 11.12.2012 ; Опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.
45. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования./ В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – М. : Наука, 1975. – 768 с.
46. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогранов. – М. : Высшая школа, 1977. – 519 с.
47. Востриков Анатолий Сергеевич. Теория систем автоматического регулирования : учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М. : Высшая школа, 2006. – 365 с.
48. Бугров Яков Степанович. Высшая математика : учеб. для вузов : [в 3 т.] / Я. С. Бугров, С. М. Никольский ; под ред. В. А. Садовниченко. – Изд. 7-е, стер. – М. : Дрофа, 2005. – Т. 2. – 512 с.
49. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для электротехн., энерг. и приборостроит. спец. вузов : [в 3 т.] / [К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин]. – СПб. : Питер, 2004. – Т. 2. – 576 с.
50. Михайлов Виталий Степанович. Теория управления : учеб. пособие для студ. вузов / В. С. Михайлов. – К. : Выща школа, Головное изд-во, 1988. – 312 с.
51. Трухаев, Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М. : Наука, 1981. – 258 с.
52. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 208 с.

53. Алтунин, А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень : ТГУ, 2000. – 352 с.
54. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
55. Zimmerman, H. J. Fuzzy Set Theory and Its Applications / H. J. Zimmerman. – Kluwer, Dordrecht, 1991. – 315 p.
56. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения: монография / [С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова, П. В. Сараев, И. В. Черпаков]. – Липецк : ЛЭГИ, 2002. – 113 с.
57. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособие / В. Н. Тутубалин. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.
58. Левицький С. М. Комп'ютерна модель системи автоматичного керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором / С. М. Левицький, К. І. Колмачов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – № 3(2013). – С. 51–56 .
59. Гультаев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие / А. Гультаев. – СПб. : КОРОНА принт, 1999. – 288 с.
60. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. – [2-е изд.]. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.
61. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.
62. Жорняк Л. Б. Моделирование системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН / Л. Б. Жорняк, В. И. Осинская, И. В. Тарасовская // Електротехніка та електроенергетика, 2006. – № 1. – С. 79–86.
63. Левицький С. М. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в умовах дефіциту реактивної потужності / С. М. Левицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 6. – С. 80–83.
64. Лагутин Валерий Михайлович. Контроль положения переключающих устройств трансформаторов в системе автоматического регулирования напряжения / В. М. Лагутин, П. Д. Лежнюк, И. М. Котенко // Устройства преобразования информации для контроля и управления

в энергетике : тезисы докладов 3 Республиканской научно-технической конференции. – Харьков, 1988. – С. 218–219.

65. Теџес Zlatka. Some Issues of Microprocessor-based Power System Stabilizer Implementation [Электронный ресурс]./ Z. Теџес, V. Їесић, I. Petrović; KONĆAR Electrical Engineering Institute, Zagreb, Croatia // 15th Mediterranean Conference on Control & Automation.- Athens, Greece : July 27–29; 2007. – T11-004. – Режим доступа до каталогу : <http://med.ee.nd.edu/MED15-2007/papers/T11-004-371.pdf>.

66. Чичёв С. И. Информационно-измерительная система центра управления электрических сетей: монография / С. И. Чичёв, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. – М. : Машиностроение, 2009. – 176 с.

67. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике: научное издание / [В. А. Баринов, А. З. Гамм, Ю. Н. Кучеров и др.]; ред. Ю. Н. Руденко, ред. В. А. Семенов. – М. : МЭИ, 2000. – 647 с.

68. IEC 60870-5-101:2003 Telecontrol equipment and systems. Part 5. Transmission protocol. Section 101. Companion standard for basic telecontrol tasks. – European Committee for Electrotechnical Standardization : Apr 1, 2003. – 189 p.

69. Решения Siemens для автоматизированных систем оперативно-диспетчерского управления в энергетике // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 11. – С. 10–12.

70. Электронная система управления трансформаторами типа ТЕС. Руководство для пользователя монитора системы ТЕС. – Компания АВВ, 2006. – 44 с. – 1ZSC000857-AAD ru, Rev. 1, 2006-06-15.

71. Устройство РПН типа V. Инструкция по эксплуатации ВА 081/05. – Компания Reinhausen GmbH (Германия) – 06 / 2010. – 40 с. – ВА 081/05-RU-06/10 F0049101.

72. Грабко В. В. Система віддаленого керування пристроєм регулювання під навантаженням трансформаторної підстанції / В. В. Грабко, С. М. Левицький // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 с. 42 – 45.

73. Twido. Программируемые контроллеры. Справочное руководство по программному обеспечению. – Schneider Electric. – Telemecanique. – TWDUSE10AF ver 2.1 – 2004. – 478 с.

Наукове видання

**Левицький Сергій Михайлович
Колмачов Костянтин Ігорович**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРОМ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ
РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено К. Колмачовим

Підписано до друку 3.09.2015 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 4,16
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-30

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.