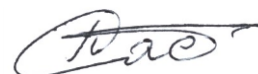


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

На правах рукопису

Пастух Олена Романівна



УДК 621.3.077.4:621.311.2.072(043.3)

**РЕЖИМИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕНЕРГОБЛОКУ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З
ДОДАТКОВИМ РОБОЧИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ**

Спеціальність 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Лисяк Георгій Миколайович,
професор кафедри електроенергетики
та систем управління
Національного університету "Львівська політехніка"

Офіційні опоненти:- доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
завідувач кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету;

- кандидат технічних наук, доцент
Бардик Євген Іванович,
доцент кафедри відновлюваних джерел енергії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського».

Захист відбудеться 27. 03. 2020 р. о 14 годині 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради № Д 35.052.02 Національного університету "Львівська політехніка" за адресою: 79013, Львів, вул. Ст. Бандери, 12, ауд. 114 г.к.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка".

Автореферат розіслано 20. 02. 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
канд. техн. наук, доцент



В.І. Коруд

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Третій етап Енергетичної стратегії України на період до 2035 року передбачає, зокрема, інноваційний розвиток електроенергетичної галузі. До основних заходів з оновлення потужностей після 2025 року віднесено: подовження терміну експлуатації АЕС та ТЕС; будівництво нових генеруючих потужностей замість тих, що будуть виведені з експлуатації; оновлення вимог до надійності роботи електроустаткування, захисту об'єктів, резервування електропостачання тощо. При цьому значна увага звертається на необхідність застосування нових перспективних технологій та схемо-технічних вирішень.

Відомо, що ефективність функціонування енергоблоків (ЕБ) потужних ТЕС і АЕС в значній мірі визначається надійністю систем електропостачання їх власних потреб (ВП) як у тривалих експлуатаційних, так і в аварійних режимах. Основною вимогою до таких систем є підтримання необхідного для роботи електроприймачів ВП рівня напруги на шинах розподільних устав власних потреб (РУВП) та забезпечення мінімального часу вимушених перерв їх живлення.

У традиційних системах живлення ВП ЕБ під час усталених експлуатаційних режимів регулювання напруги на шинах першого ступеня трансформації РУВП здійснюють пристроями регулювання під навантаженням (РПН) робочих трансформаторів власних потреб (РТВП), а для запобігання перервам електропостачання під час пошкоджень в електричних мережах (ЕМ) таких систем вводять резервні джерела живлення. Але під час пошкоджень у прилеглих до ЕБ зовнішніх ЕМ електроенергетичної системи (ЕЕС) можуть виникати збурення, які поширюються на систему живлення ВП, призводять до недопустимого зниження напруги на шинах РУВП і негативно впливають на режими приєднаних до неї електроприймачів і роботу механізмів ВП. Для зведення до мінімуму впливу цього фактора застосовують швидкодійний релейний захист, автоматичне регулювання збудження (АРЗ) генераторів тощо.

Однак, при цьому, в системі живлення ВП ЕБ відбуватимуться перемикання відповідних електромеханічних пристроїв і комутаційних апаратів, що за їх відмови чи помилкових дій оперативного персоналу спричинятиме або виникнення аварійного режиму, або його подальший розвиток і, як наслідок, аварійне вимкнення енергоблоку, недовідпуск електроенергії та зниження рівня стійкості електроенергетичної системи.

Отже, актуальність теми зумовлена необхідністю розгляду нових схемо-технічних вирішень першого ступеня трансформації систем живлення власних потреб енергоблоків, дослідження їх режимів і характеристик з метою обґрунтування доцільності застосування таких схем для підвищення ефективності роботи електричних станцій електроенергетичних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковому напрямку кафедри електроенергетики та систем управління "Моделювання, аналіз, синтез і оптимізація електроенергетичних й енергозабезпечувальних систем та інтелектуалізація управління ними", а також держбюджетними та госпдоговірними темами "Розвиток системного підходу до

синтезу та моделювання електроенергетичних об'єктів" (№ державної реєстрації 0119U100362), "Розроблення теоретичних засад створення високоефективних електротехнічних та електромеханічних систем і їх елементів для об'єктів з динамічним навантаженням та їх моделювання" (№ державної реєстрації 0198U007856), "Теоретичні засади оптимізації режимів роботи та автоматизація проектування електротехнічних і електромеханічних систем з динамічним навантаженням" (№ державної реєстрації 0101U000875), "Моделювання, аналіз, оптимізація й синтез електроенергетичних об'єктів і активних електричних мереж, їх систем керування, автоматики, захисту й діагностики станів та створення тренінгових систем" (№ державної реєстрації 0107U008816) та «Проведення патентного пошуку, обґрунтування обсягу та країн патентування, підготовка патентної документації зі схемно-технічних вирішень електричної частини підвищеної надійності потужних ТЕС» (госпдоговір на роботу з ВАТ "Західенерго", № 6593).

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є підвищення ефективності функціонування енергоблоків електростанцій шляхом забезпечення рівня напруги на шинах власних потреб першого ступеня трансформації, достатнього для надійної роботи їх електроприймачів як під час нормальних експлуатаційних режимів, так і під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проведено аналіз схем першого ступеня трансформації систем живлення ВП ЕБ електростанцій з урахуванням їх функціональних властивостей;
- розвинуто методи вибору параметрів основного електроустаткування для забезпечення необхідних режимних характеристик схеми першого ступеня трансформації системи живлення ВП ЕБ з додатковим робочим трансформатором власних потреб (ДРТВП);
- розроблено узагальнену математичну модель двообмоткового трансформатора, придатну для аналізу ustalених режимів за різних способів з'єднання його обмоток з іншими елементами електричних схем;
- вперше проведено експерименти на фізичній моделі фрагмента схеми системи живлення власних потреб з ДРТВП, які підтвердили результати комп'ютерного симулювання;
- здійснено аналіз статичної та динамічної стійкості режимів ЕБ з ДРТВП та без нього для порівняння їх характеристик;
- перевірено ефективність застосування ДРТВП для забезпечення необхідного рівня напруги на шинах власних потреб першого ступеня трансформації системи живлення ВП ЕБ під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі.

Об'єкт дослідження – процеси в електричній частині енергоблоку електростанції.

Предмет дослідження – вплив додаткового робочого трансформатора на режимні властивості енергоблоку електростанції.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених задач ґрунтувалося на застосуванні законів і методів теоретичної електротехніки, математичного моделювання і комп'ютерного симулювання та експериментах на фізичній моделі.

Узагальнену математичну модель двообмоткового трансформатора розроблено з використанням теорії прохідних чотириполіусників. Аналіз усталених режимів, статичної і динамічної стійкості здійснювався в середовищі програмного комплексу ДАКАР, а електромагнітних процесів – в середовищі програмного комплексу *RE*. Адекватність математичного моделювання і комп'ютерного симулювання підтверджена експериментами на статичній фізичній моделі та порівнянням результатів досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновано підхід до визначення потужностей основного і додаткового трансформаторів живлення системи власних потреб енергоблоку електростанції, що забезпечує його нормальні режими та достатні рівні напруги на шинах власних потреб під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі.

2. Розроблено узагальнену математичну модель двообмоткового трансформатора, яка на відміну від відомих враховує особливості роботи трансформаторів у режимах заданої напруги та заданого струму в розрахункових схемах електричних мереж для аналізу усталених режимів.

3. Встановлено за результатами математичного моделювання, що під час обтяжених режимів енергоблоку з додатковим робочим трансформатором забезпечується вищий рівень напруги на шинах власних потреб і не знижується запас статичної стійкості, порівняно з енергоблоками за традиційними схемами.

4. Встановлено, що в умовах несиметрії напруг на шинах генератора додатковий робочий трансформатор забезпечує зниження несиметрії напруг на шинах власних потреб і зменшує її негативний вплив на роботу обладнання системи власних потреб енергоблоку.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено методику порівняльної оцінки техніко-економічних показників електричної частини ЕБ з ДРТВП і ЕБ з традиційними схемами ВП, яка може бути використана в проектних рішеннях під час реконструкції діючих чи спорудження нових електростанцій.

2. Розроблено методику обчислення втрат потужності у системах живлення власних потреб електростанцій з додатковим трансформатором власних потреб, яка дає змогу враховувати режимні особливості їх елементів.

3. Розроблено алгоритм програмної реалізації узагальненої математичної моделі двообмоткового трансформатора, який використано в програмному комплексі ДАКАР у вигляді окремого модуля для аналізу усталених експлуатаційних режимів та перехідних процесів електроенергетичних систем.

Основні результати досліджень увійшли у зазначені вище звіти з науково-дослідних робіт. Окремі результати роботи використані у навчальному процесі кафедри електроенергетики та систем управління та під час виконання студентами наукових досліджень і магістерських кваліфікаційних робіт. Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Автору належить: визначення основних параметрів схеми живлення ВП з ДРТВП та меж зміни напруги на шинах ВП у такій схемі [1, 2, 11]; розроблення підходу до вибору сумарної установленої

потужності робочого та додаткового робочого трансформаторів ВП з урахуванням як характерних експлуатаційних режимів, так і вимог щодо забезпечення необхідного рівня напруги на шинах ВП під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі [3]; оцінка рівня втрат активної потужності у нових схемах живлення ВП з ДРТВП з урахуванням режимних особливостей їх елементів [6, 12]; розроблення узагальненої математичної моделі двообмоткового трифазного тристрижневого трансформатора для розрахунку усталених режимів [4]; комп'ютерне симулювання усталених режимів схеми живлення ВП ЕБ з ДРТВП та рекомендації щодо забезпечення достовірності одержуваних результатів [5]; комп'ютерне симулювання основних режимів трансформаторів і автотрансформаторів за характерних схем з'єднання їх обмоток [7]; формування рівнянь усталених режимів схеми живлення ВП енергоблоку з ДРТВП з розщепленими вторинними обмотками, їх комп'ютерна симуляція та аналіз результатів [8]; проведення розрахунків для порівняльної оцінки стійкості режимів ЕБ зі схемами живлення ВП без і з ДРТВП та аналіз їх результатів [10]; дослідження рівня напруги на шинах ВП під час режимів симетричних і несиметричних зовнішніх коротких замикань [9].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на: III-й Міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці”, м. Львів, 1999 рік; IV-й Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми економії енергії”, м. Львів, 2003 рік; IV-й Міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці”, м. Львів, 2003 рік; VI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Математичне моделювання в електротехніці, електроніці й електроенергетиці” (ММЕлектро-2009), м. Львів, 2009 рік; III International Scientific-Engineering Conference Optimum control of electric installations (OCEI -2015), Ukraine, Vinnytsia, 14-15 October, 2015 p.; VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методи аналізу усталених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу». 12-18 лютого 2018 року, смт. Славсько.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 9 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, включеному до наукометричних баз Index Copernicus, РИНЦ, 2 тези доповідей у збірниках наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 110 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи 174 сторінки, з них 42 рисунки, 9 таблиць, а також 11 сторінок зі списком використаних джерел і 24 сторінки додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, визначена мета роботи і шляхи вирішення поставлених завдань, вказано методи дослідження, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, викладені відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** розглянуто вимоги до систем живлення ВП ЕБ та їх елементів, проведено класифікацію за різними ознаками, а також сформульовано узагальнюючі функціональні властивості та вказано недоліки основних схем.

Аналіз схем устав власних потреб ЕС показав, що для підвищення надійності їх електропостачання застосовують такі заходи: електроустанови ВП живлять не менш, ніж від двох джерел електроенергії; виконують секціонування шин ВП; збірні шини генераторної напруги розділяють на кілька секцій; трансформатори ВП виконують з пристроями РПН; трансформатори власних потреб потужністю, більше 25 МВ·А виконують з розщепленими обмотками; здійснюють автоматичне ввімкнення резерву (АВР) як джерел живлення так і резервних механізмів ВП; застосовують швидкодійний релейний захист, що забезпечує короткочасність (0,5 с) зниження напруги на шинах ВП.

Однак ці заходи мають певні недоліки, зокрема неможливість без дії АРЗ генератора підтримувати бажаний рівень напруги під час зовнішніх коротких замикань, оскільки пристрої РПН трансформаторів ВП не призначені для перемикачів у таких режимах. Окрім того, вартість трансформаторів з пристроями РПН є значно вищою від вартості трансформаторів такої ж потужності, але без них, а їх надійність є відносно низькою. Збільшення кількості секцій розподільних устав ВП (РУВП) для трансформаторів ВП з номінальною потужністю 25 МВ·А і більше веде до зростання кількості комутаційних апаратів у вторинних колах цих трансформаторів і вартості схеми живлення ВП, а також збільшує ймовірність припинення виробітку електричної енергії в цілому через можливі помилкові дії оперативного персоналу або відмову пристроїв автоматики та комутаційної апаратури.

Тому необхідно розглянути нові схемо-технічні рішення електричної частини ЕБ, які б забезпечували рівень напруги, необхідний для роботи електроприймачів ВП як у нормальних експлуатаційних режимах, так і під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі, та дослідити їх характеристики.

У **другому розділі** розглянуто питання визначення та порівняльної оцінки основних характеристик електроустаткування схем першого ступеня трансформації електропостачання власних потреб ЕБ, який через розподільну уставу вищої напруги (РУВН) видає потужність в електроенергетичну систему С. На рисунку 1, а наведена традиційна схема ЕБ з РТВП (Т2), а на рисунку 1, б – узагальнена нова схема ЕБ з ДРТВП (Т3). Характерною особливістю схеми ЕБ з ДРТВП порівняно з традиційною є спосіб приєднання первинної обмотки трансформатора Т3, а саме - увімкнення її послідовно в електричне коло на генераторній напрузі між точкою приєднання первинної обмотки трансформатора Т2 і первинною обмоткою блокового трансформатора БТ (Т1). У загальному випадку вторинні обмотки

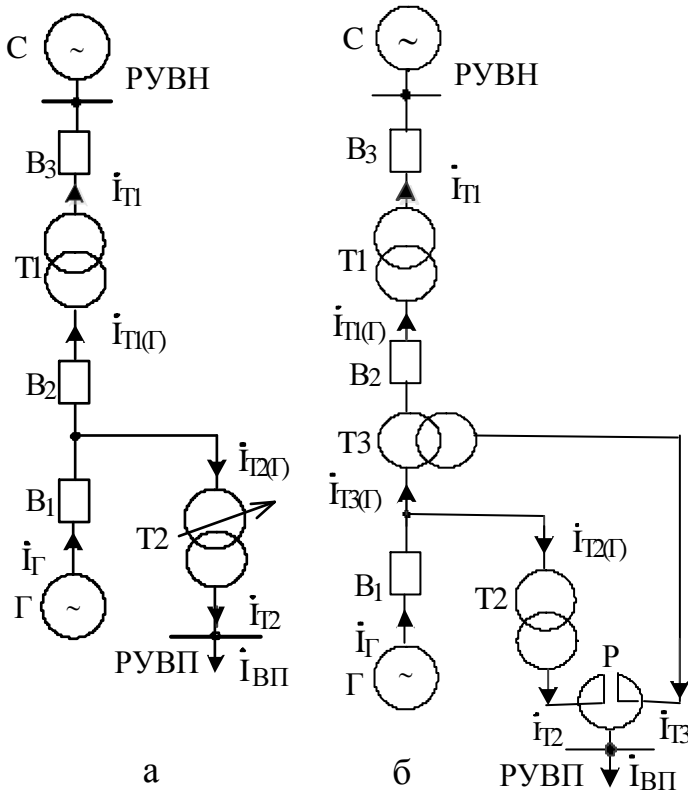


Рисунок 1 - Схеми першого ступеня трансформації системи живлення власних потреб енергоблоку: а – традиційна; б – узагальнена з ДРТВП

трансформаторів Т2 і Т3 можуть приєднуватися до РУВП через здвоєний реактор Р. Отже, живлення навантаження ВП здійснюється одночасно через ці трансформатори: Т2 працює у звичайному режимі заданої генератором Г напруги, а Т3 – в режимі заданого навантаження ЕБ струму в Т1, що й забезпечуватиме без застосування пристроїв РПН підтримання бажаного рівня напруги на шинах РУВП як в усталених експлуатаційних режимах, так і під час тривалих зовнішніх коротких замикань в ЕМ, прилеглий до РУВН енергоблоку. Враховуючи, що техніко-економічні показники нової схеми (рисунок 1,б) найперше визначатимуться сумарною установленою потужністю трансформаторів Т2 і Т3, нами запропонований підхід до визначення мінімально можливого її значення

$S_{Ty} = S_{T2 \text{ ном}} + S_{T3 \text{ ном}} \Rightarrow \min$, за таких основних положень і допущень:

1. У тривалих експлуатаційних режимах перевантаження трансформаторів Т2 і Т3 не допускається, тобто $S_{T2 \text{ ном}} \geq S_{T2 \text{ нб}}$ та $S_{T3 \text{ ном}} \geq S_{T3 \text{ нб}}$,

де $S_{T2 \text{ нб}}$ та $S_{T3 \text{ нб}}$ – найбільше можливе тривале завантаження кожного з трансформаторів Т2 і Т3 відповідно.

2. Групи з'єднання обмоток Т2 і Т3 однакові та $\underline{K}_{T2} = K_{T2} = \text{const} < 1$ і $\underline{K}_{T3} = K_{T3} = \text{var} > 1$.

3. Під час визначення поточкорозподілу не враховуємо поперечні елементи схем заміщення та приймаємо, що напруги вузлів дорівнюють їх номінальним значенням. Це допущення також означає, що потужності та струми, виражені у відносних номінальних одиницях, будуть відповідно однаковими.

Прийнявши за базові величини номінальні значення напруги і потужності навантаження ВП,

$$U_6 = U_{\text{ВП ном}}; \quad S_6 = S_{\text{ВП ном}}; \quad I_6 = S_6 / (\sqrt{3} \cdot U_6) = S_{\text{ВП ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВП ном}}) = I_{\text{ВП ном}}, \quad (1)$$

з урахуванням п.3 одержимо такі співвідношення:

$$\dot{S}_{\text{ВП}*} = \dot{I}_{\text{ВП}*}^*; \quad \dot{S}_{T2*} = \dot{I}_{T2*}^*; \quad \dot{S}_{T3*} = \dot{I}_{T3*}^*; \quad \dot{S}_{\Gamma*} = \dot{I}_{\Gamma*}^* \cdot U_{\Gamma \text{ ном}} / U_{\text{ВП ном}}. \quad (2)$$

З урахуванням (2) були одержані вирази для обчислення поточкорозподілу у схемі рисунку 1,б та завантаження трансформаторів Т2, Т3 для експлуатаційних режимів генератора Г і навантаження ВП, заданих потужностями у відносних одиницях та їх коефіцієнтами:

$$I_{T3*} = \frac{\sqrt{(I_{Г*} \cdot \cos \varphi_{1Г} - K_{T2} \cdot I_{ВП*} \cdot \cos \varphi_{1ВП})^2 + (I_{Г*} \cdot \sin \varphi_{1Г} - K_{T2} \cdot I_{ВП*} \cdot \sin \varphi_{1ВП})^2}}{K_{T3} - K_{T2}}; \quad (3)$$

$$\varphi_{1Т3} = \arctg((I_{Г*} \cdot \sin \varphi_{1Г} - K_{T2} \cdot I_{ВП*} \cdot \sin \varphi_{1ВП}) / (I_{Г*} \cdot \cos \varphi_{1Г} - K_{T2} \cdot I_{ВП*} \cdot \cos \varphi_{1ВП}));$$

$$I_{T2*} = \sqrt{(I_{ВП*} \cdot \cos \varphi_{1ВП} - I_{T3*} \cdot \cos \varphi_{1Т3})^2 + (I_{ВП*} \cdot \sin \varphi_{1ВП} - I_{T3*} \cdot \sin \varphi_{1Т3})^2};$$

$$\varphi_{1Т2} = \arctg((I_{ВП*} \cdot \sin \varphi_{1ВП} - I_{T3*} \cdot \sin \varphi_{1Т3}) / (I_{ВП*} \cdot \cos \varphi_{1ВП} - I_{T3*} \cdot \cos \varphi_{1Т3})).$$

Усі подальші дослідження і розрахунки проводились для системи С з $U_{С\text{ ном}} = 220$ кВ та, якщо інше не зазначено, для енергоблоку з турбогенератором ТГВ-200 М і такими номінальними параметрами.:

$$P_{Г\text{ ном}} = 200 \text{ МВт}; \quad U_{Г\text{ ном}} = 15,75 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{Г\text{ ном}} = 0,85; \quad \cos \varphi_{СГ\vartheta} = 0,96;$$

$$P_{ВП\text{ ном}} = \alpha_{ВП\text{ ном}} P_{Г\text{ ном}}; \quad \alpha_{ВП\text{ ном}} = 0,08; \quad U_{ВП\text{ ном}} = 6 \text{ кВ}; \quad \cos \varphi_{ВП\text{ ном}} = 0,7.$$

За розрахунків приймалися експлуатаційні режими генератора ЕБ, під час яких можливе найбільше завантаження кожного з трансформаторів Т2 і Т3, зокрема: режим 1 – робота генератора з номінальними параметрами; режим 2 – робота недозбудженого генератора з видаванням номінальної активної потужності та мінімально допустимим ємнісним коефіцієнтом потужності; режим 3 – вимикач В1

вимкнений, генератор Г в режимі неробочого ходу, навантаження ВП живиться від РУВН через трансформатори Т1, Т2, Т3, а його потужність, як і в попередніх двох режимах, дорівнює номінальній.

На рисунку 2 наведені результати досліджень у вигляді залежностей розподілу потужностей між трансформаторами Т2 і Т3 та суми найбільших потужностей їх завантаження від коефіцієнта трансформації $K_{Т3}$ в допустимому діапазоні його значень. На цьому ж рисунку штриховими лініями показані необхідні значення номінальних потужностей трансформаторів Т2 і Т3 та їх сумарної установленної потужності. Отже, відношення сумарної установленної потужності трансформаторів Т2 і Т3 до номінальної потужності трансформа-

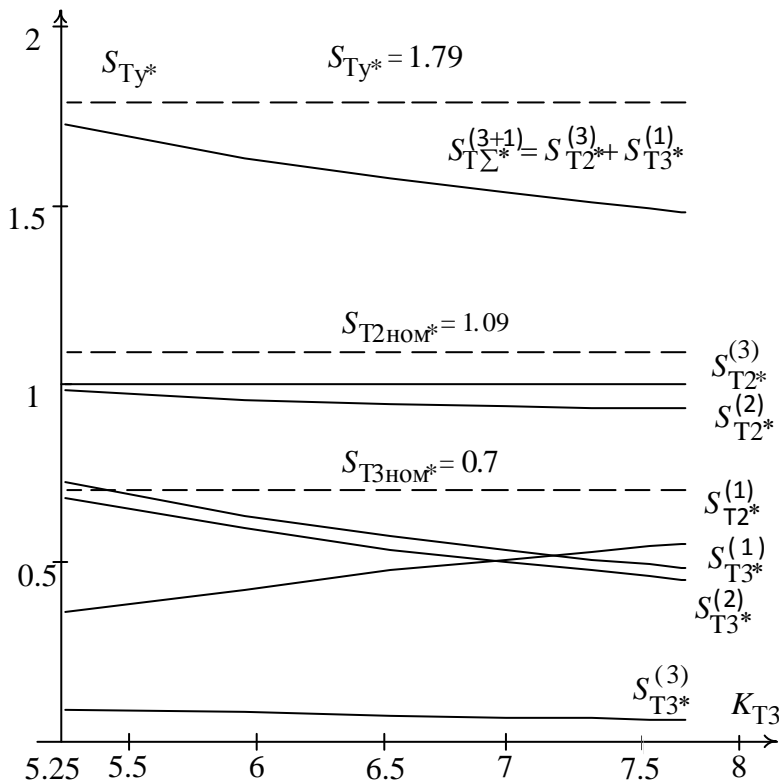


Рисунок 2 - Залежності розподілу потужностей між трансформаторами Т2 і Т3 від коефіцієнта трансформації $K_{Т3}$

тора Т2 становить $S_{Ту*}/S_{Т2 ном*}=1,79/1,09=1,64$. Якщо ж робота генератора в режимі 2 не передбачається, а в режимі 3 (неробочий хід генератора) потужність ВП не перевищуватиме 50% номінального значення, то визначальним стає режим 1, при цьому величина сумарної установленної потужності обох трансформаторів Т2 і Т3 може бути прийнятою $S_{Ту*} \approx 1,1$, тобто практично дорівнюватиме номінальній потужності трансформатора Т2 з пристроєм РПН у традиційній схемі рисунок 1,а. Відомо, що виконання трансформаторів з пристроями РПН збільшує їх вартість у $1,5 \div 2$ рази. Це дає підстави розглядати нову схему ЕБ з ДРТВП як альтернативний за техніко-економічними показниками варіант до традиційних схем живлення ВП.

Для практичного застосування розроблена методика порівняльної оцінки у першому наближенні рівня втрат активної потужності у різних схемах з урахуванням їх режимних особливостей шляхом використання як модулів струмів, так і модулів та складових повних потужностей відповідних елементів. У результаті одержані такі співвідношення сумарних втрат активної потужності у новій (Н) та традиційній (Т) схемах: $\Delta P_{ВП.Н} / \Delta P_{ВП.Т} = 0,95 \div 1,12$ – в елементах схеми живлення ВП; $\Delta P_{ЕЧ.Н} / \Delta P_{ЕЧ.Т} = 0,99 \div 1,02$ – в елементах електричної частини ЕБ (з урахуванням Т1). Отже, за рівнем втрат активної потужності порівнювані схеми є практично рівнозначними, що підтверджує перспективність застосування схеми ЕБ з ДРТВП.

У **третьому розділі** розглянуто особливості математичного моделювання схеми живлення ВП ЕБ з ДРТВП і комп'ютерного симулювання характерних усталених експлуатаційних режимів в середовищі програмного комплексу (ПК) ДАКАР, а також досліджено регульовальні щодо напруги властивості такої схеми. Для врахування особливостей роботи трансформаторів ВП в режимах заданої напруги (РТВП) і заданого струму (ДРТВП) була розроблена узагальнена математична модель двообмоткових трансформаторів, яка на відміну від наявних дає змогу методологічно коректно будувати схеми заміщення за довільних способів з'єднання їх обмоток з іншими елементами електричних мереж.

Основою стала розроблена показана на рисунку 3 узагальнена схема заміщення

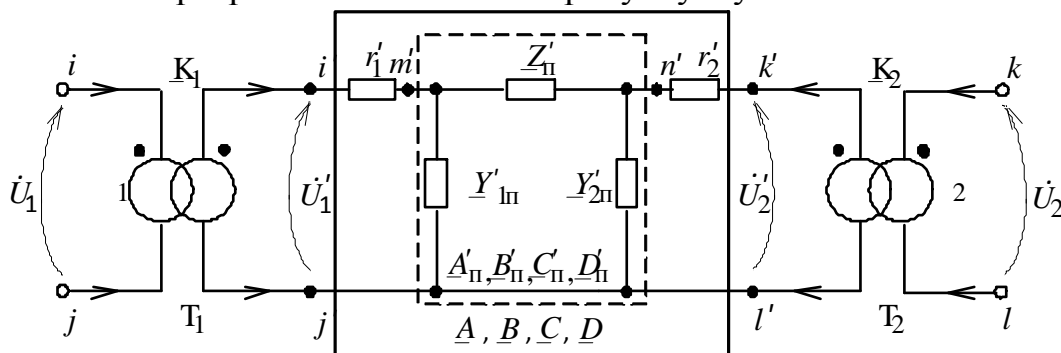


Рисунок 3 - Узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора у вигляді трансформаторного ПЧП

двообмоткового трансформатора у вигляді трансформаторного прохідного чотириполосника (ПЧП) з дійсними напругами і струмами внутрішньої (1) і

зовнішньої (2) обмоток та позначеними штрихом параметрами гілок, елементів і координат режиму цієї схеми, які зведені до заданого значення базової напруги.

Тут r'_1, r'_2 - резистанси обмоток 1, 2; $Z'_{1\pi} = jx'_{1\pi}$, де $x'_{1\pi}$ - реактанс розсіювання пари обмоток 1, 2; $Y'_{1\pi} = g'_{1\pi} - jb'_{1\pi}$, $Y'_{2\pi} = g'_{2\pi} - jb'_{2\pi}$ - комплексні провідності, які відображають втрати активної потужності та магнітні потоки у стрижні трансформатора, на якому розміщена обмотка 1, та в його елементах за межами обмоток 1 і 2 відповідно. Інші позначення загальноприйняті.

Використовуючи Y-форму рівнянь для трансформаторного ПЧП одержимо рівняння стану двообмоткового трансформатора стосовно дійсних напруг і струмів його полюсів (выводів обмоток) i, j, k, l у вигляді:

$$\dot{I}_i = Y_{i,i}\dot{U}_i + Y_{i,j}\dot{U}_j + Y_{i,k}\dot{U}_k + Y_{i,l}\dot{U}_l \quad \text{та} \quad \dot{I}_j = -\dot{I}_i; \quad (4)$$

$$\dot{I}_k = Y_{k,i}\dot{U}_i + Y_{k,j}\dot{U}_j + Y_{k,k}\dot{U}_k + Y_{k,l}\dot{U}_l \quad \text{та} \quad \dot{I}_l = -\dot{I}_k,$$

де $Y_{i,i} = (D/B)/K_1^2$; $Y_{i,j} = -Y_{i,i}$; $Y_{i,k} = -(1/B)/(K_1^* \cdot K_2)$; $Y_{i,l} = -Y_{i,k}$; $Y_{k,i} = -(1/B)/(K_1 \cdot K_2^*)$; $Y_{k,j} = -Y_{k,i}$; $Y_{k,k} = (A/B)/K_2^2$; $Y_{k,l} = -Y_{k,k}$; $K_1 = K_1 \angle \xi_1 = U_{1\text{ном}}/U_6 \angle \xi_1$; $K_2 = K_2 \angle \xi_2 = U_{2\text{ном}}/U_6 \angle \xi_2$. (5)

Рівнянням (4) з урахуванням (5) відповідає узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора у вигляді повного чотириполюсника (рисунок 4) з елементарними та трансформаторними гілками між відповідними вузлами, для якої значення параметрів обчислюються за такими формулами:

$$Z_{i,j} = -1/Y_{i,j} = K_1^2 B/D; \quad Z_{k,l} = -1/Y_{k,l} = K_2^2 B/A; \quad (6)$$

$$Z'_{i,k} = B; \quad Z'_{j,l} = Z'_{i,k}; \quad Z'_{i,l} = -Z'_{i,k}; \quad Z'_{j,k} = -Z'_{i,k}.$$

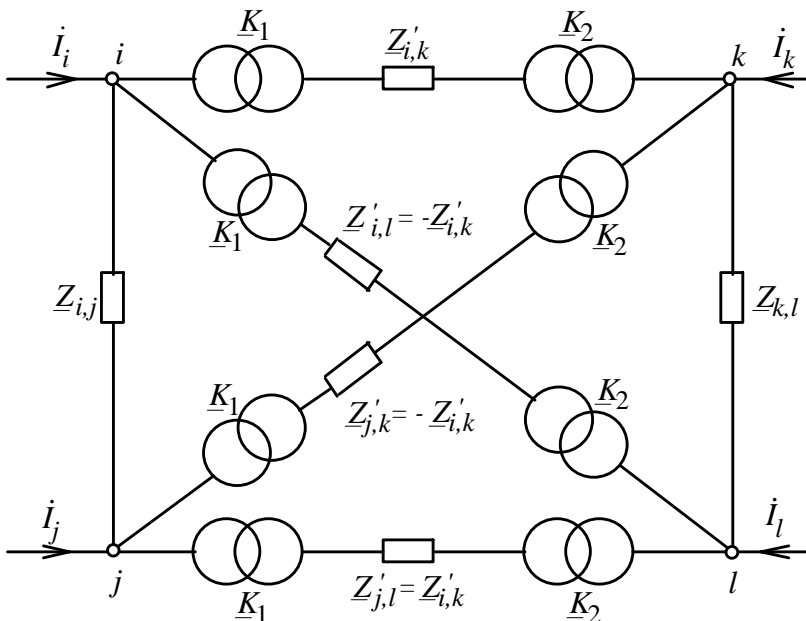


Рисунок 4 - Узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора у вигляді повного чотириполюсника

Співвідношення (6) вказують на можливість прояву резонансних властивостей відповідних контурів такої схеми заміщення, зумовлених способом

приєднання обмоток ДРТВП до інших елементів ЕМ. Це вимагало високої точності обчислення значень параметрів віток таких контурів. Тому ПК ДАКАР було доповнено процедурами обчислення параметрів схеми заміщення ДРТВП і введення їх у режимну схему, а також автоматичного формування рівнянь стану для заданого приєднання його обмоток. З урахуванням викладеного, схема ЕБ з ДРТВП матиме вигляд режимної електричної схеми заміщення, зображеної на рисунку 5. Тут схеми

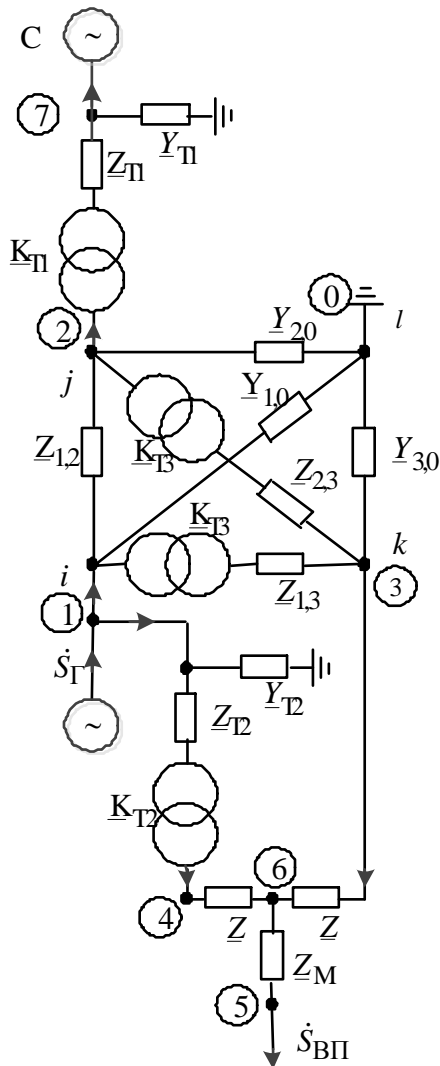


Рисунок 5 - Режимна схема заміщення ЕБ з ДРТВП

заміщення блокового трансформатора Т1 і РТВП Т2 прийняті традиційними Г-подібними, а ДРТВП Т3 – на основі рисунка 3,б у вигляді повного чотириполосника за умов: $U_6 = U_{2\text{ном}} = U_{Т3(\text{ВП})\text{ном}}$; $K_2 = 1$; $K_1 = 1/K_{Т3}$. При цьому генератор Г розглядається як опорний генерувальний вузол 1 (i), навантаження ВП – як навантажувальний 5, ЕЕС – як балансувальний 7. Аналіз результатів розрахунку тестового режиму підтвердив обґрунтованість вимог щодо забезпечення високої точності обчислень, оскільки струми та потужності внутрішніх гілок 1-2, 1-3, 2-3, 1-0, 2-0, 3-0 схеми заміщення ДРТВП Т3 на рисунку 4 більш ніж на 2 порядки перевищують значення реальних струмів і потужностей інших гілок режимної схеми заміщення ЕБ з ДРТВП.

Характерною режимною властивістю досліджуваної схеми є нерівномірний розподіл складових потужності навантаження ВП між Т2 і Т3 за практично однакового струмового завантаження їх вторинних обмоток: модулі струмів у гілках 4-6 і 3-6 практично однакові, при цьому співвідношення активної і реактивної потужностей, що пересилаються через Т2 до навантаження ВП (гілка 4-6) становить орієнтовно 1:2, а для Т3 (гілка 3-6) – орієнтовно 2:1. Такий розподіл потужностей за однакових груп з'єднання обмоток Т2 і Т3 зумовлений різними номінальними

значеннями коефіцієнтів потужності генератора (0,85) та навантаження ВП (0,7).

Згідно з Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж регулювання напруги в ЕЕС повинно здійснюватись в контрольних вузлах, які визначаються відповідними службами ДП «НЕК «Укренерго» та ЕЕС. Тому дослідження режимних властивостей ЕБ з ДРТВ щодо рівня напруги на шинах РУВП в усталених режимах проводились з дотриманням рекомендацій згаданих Правил для двох випадків: за контрольний вузол приймалися шини генераторної напруги (вузол 1); за контрольний вузол приймалися шини РУВН (вузол 7).

Аналіз одержаних результатів показав, що під час режимів генератора з індуктивним коефіцієнтом потужності в діапазоні $\cos\varphi_{LG} = 0,85 \div 0,9$ і зміні напруг генератора та системи відповідно в межах $U_{Г*} = 0,95 \div 1,05$ та $U_C = 220 \div 252$ кВ рівень напруги на шинах РУВП знаходиться в допустимих межах $U_{ВП*} = 0,9 \div 1,1$ без дії пристрою РПН РТВП незалежно від того, який з вузлів є контрольним. Під час режимів генератора з індуктивним коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та з ємнісним коефіцієнтом потужності рівень напруги на шинах РУВП знижується, особливо під час зменшення напруги генератора, хоч й знаходиться в допустимих для таких короточасних режимів межах також без дії пристрою РПН РТВП. Якщо режими генератора з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці або з ємнісним його значенням є тривало допустимими, то застосування РТВП з пристроєм РПН дає змогу суттєво підвищити рівень напруги на шинах РУВП енергоблока. Враховуючи, що рівень напруги на шинах РУВП залежить також від завантаження генератора реактивною потужністю, можна вважати кращими умови роботи, якщо контрольним вузлом є шини вищої напруги РУВН.

Зазначимо, що для підтвердження достовірності отримуваних результатів дослідження проводять з використанням різних програмних комплексів і фізичних моделей (ФМ) та, коли це можливо, виконують натурні експерименти. Тому нами були проведені експерименти на ФМ фрагмента електричної частини ЕБ як без, так і з ДРТВП, принципова схема та зовнішній вигляд якої показані на рисунку 6.

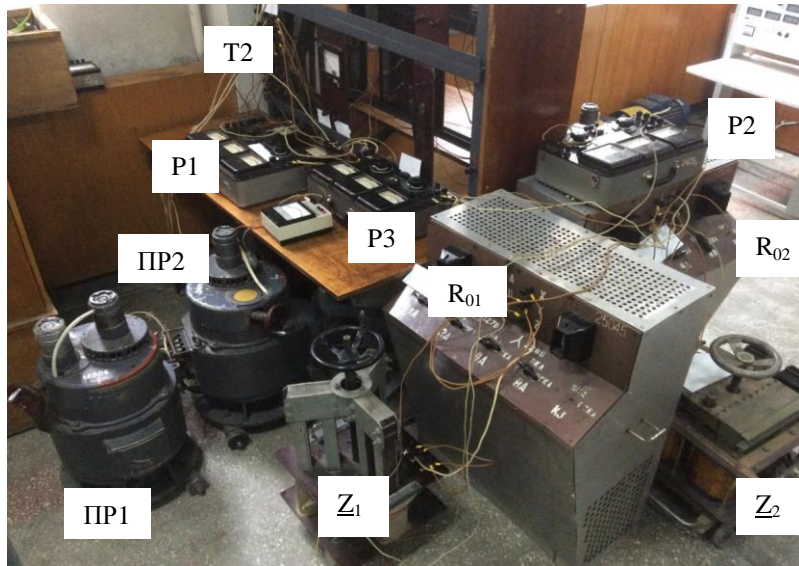
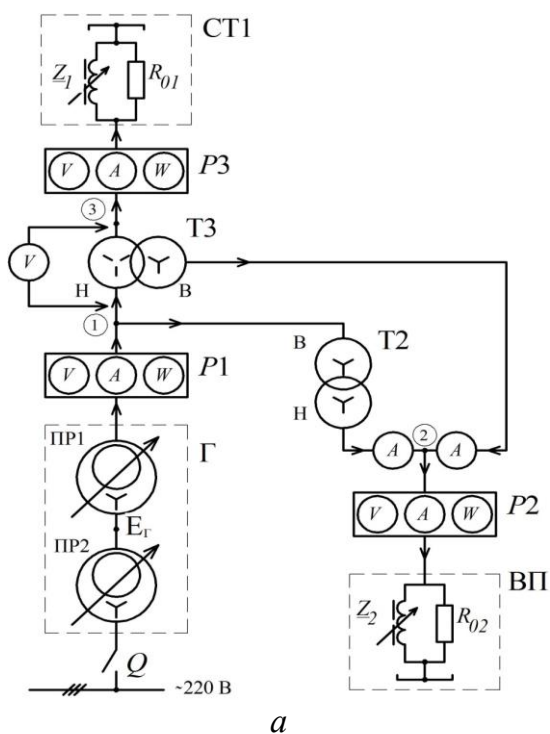


Рисунок 6 – Фізична модель фрагмента електричної частини ЕБ з ДРТВП:
а – схема; б – зовнішній вигляд

У **четвертому розділі** проведено порівняльний аналіз властивостей схем живлення ВП ЕБ з ДРТВП і традиційної під час характерних обтяжених та аварійних режимів і процесів в прилеглої ЕМ у вигляді двокової лінії

електропередачі 220 кВ, через яку ЕБ видає активну потужність в ЕЕС. Для комп'ютерного симулювання використовувались ПК ДАКАР та RE.

Під час дослідження статичної стійкості режимів враховувалася наявність пристроїв АРЗ генераторів в обох схемах, які забезпечували підтримання заданого рівня напруги на їх виводах. Тому за параметр обтяжування була прийнята активна потужність завантаження генераторів. З урахуванням рекомендацій керівних вказівок зі стійкості енергосистем дослідження проводилось за методикою, яка містить такі етапи:

1. Розрахунок характерних вихідних усталених режимів.

2. Перевірка вихідних усталених режимів на статичну стійкість динамічним методом з урахуванням можливості саморозхитування генераторів (нестійкість таких режимів, як правило, зумовлена помилками у вхідній інформації).

3. Визначення граничних режимів з умов аперіодичної статичної стійкості шляхом розрахунку послідовно обтяжуваних за активною потужністю завантаження генераторів усталених режимів до порушення збіжності ітераційного процесу розв'язування рівнянь цих усталених режимів.

4. Перевірка серії обтяжених режимів на коливну статичну стійкість динамічним методом і визначення граничних режимів з урахуванням саморозхитування генераторів.

5. Визначення запасів статичної стійкості характерних вихідних усталених режимів стосовно граничних режимів для менших із значень граничних потужностей, одержаних з умов аперіодичної та коливної статичної стійкості.

Для обох схем за вихідні приймалися усталені режими з номінальними значеннями активних потужностей завантаження генератора ($P_{Г} = 200$ МВт) і навантаження ВП ($P_{ВП} = 16$ МВт з $\cos\varphi_{ВП} = 0,7$) для трьох значень напруги на виводах генератора $U_{Г*} = 0.95; 1.0; 1.05$. За контрольований переріз було прийнято початок ЛЕП. Як і очікувалося, для обох схем значення активних потужностей в контрольованих перерізах, одержаних для граничних щодо коливної статичної стійкості режимів ($P_{гр.к}$), набагато менші за відповідні значення активних потужностей в цих же перерізах, одержаних для граничних щодо аперіодичної статичної стійкості режимів ($P_{гр.а}$), тобто в усіх розглянутих випадках мало місце співвідношення $P_{гр.к} < P_{гр.а}$. Тому в таблиці 1 наведені у відносних одиницях лише основні результати розрахунку характерних вихідних усталених режимів та режимів, граничних щодо коливної статичної стійкості (з урахуванням саморозхитування генераторів). Там же наведені значення коефіцієнтів запасу статичної стійкості k_P для вихідних режимів та максимально допустимих активних потужностей $P_{м.д}$, обчислені за формулами:

$$k_P = (P_{гр.к} - \Delta P_{н.к} - P_0) / P_{гр.к} \text{ та } P_{м.д} = P_{гр.к} \cdot (1 - k_{P\partial}) - \Delta P_{н.к}, \quad (7)$$

де P_0 – активна потужність вихідного режиму в контрольованому перерізі; $\Delta P_{н.к}$ – амплітуда нерегульованих коливань активної потужності в контрольованому перерізі; $k_{P\partial}$ – нормативне допустиме значення коефіцієнта запасу статичної стійкості (для нормальних вихідних усталених режимів $k_{P\partial} = 0.2$).

Показники статичної стійкості режимів

Режим	Параметр, в.о.	$U_{Г, в.о.}$					
		Традиційна схема			Схема з ДРТВП		
		0.95	1.0	1.05	0.95	1.0	1.05
Вихідний	$U_{ВП}$	0.954	1.012	1.069	0.897	1.015	1.126
	U_7	1.033	1.057	1.082	1.037	1.058	1.080
Граничний	$U_{ВП}$	0.953	1.012	1.069	1.079	1.166	1.252
	U_7	1.025	1.051	1.078	1.022	1.046	1.070
	$P_{гр.к}$	2.701	2.722	2.702	2.679	2.704	2.7
Допустимий	$P_{м.δ}$	2.16	2.178	2.162	2.143	2.163	2.16
Вихідний	k_p	0.63	0.633	0.63	0.627	0.63	0.63

Аналіз результатів досліджень показав, що властивості схем з ДРТВП та традиційної щодо статичної стійкості як вихідних, так і граничних режимів практично однакові. При цьому для обтяжених режимів, аж до граничних включно, рівень напруги на шинах ВП ЕБ з ДРТВП за рахунок перерозподілу струмового завантаження трансформаторів Т2 і Т3 є вищим порівняно з традиційною схемою..

Дослідження динамічної стійкості проводились за умов: генератори оснащені пристроями АРЗ, форсування збудження, автоматичного регулювання частоти й активної потужності (АРЧП) та автоматичного регулювання частоти обертання (АРЧО); в ЕЕС наявні пристрої релейного захисту та протиаварійної автоматики, а саме резервування відмови вимикача (РВВ) та автоматичного повторного ввімкнення (АПВ). З урахуванням рекомендацій керівних вказівок зі стійкості енергосистем були досліджені електромеханічні процеси за таким списком розрахункових збурень:

1. Вимкнення одного кола лінії.
2. Виникнення та вимкнення трифазного КЗ на початку кола лінії та успішне АПВ цього кола.
3. Виникнення та вимкнення трифазного КЗ на початку кола лінії та неуспішне АПВ цього кола.
4. Виникнення трифазного КЗ на початку кола лінії, відмова вимикачів цього кола під час вимкнення КЗ та дія пристроїв РВВ.

Аналіз одержаних результатів (окремі з них, як приклад, проілюстровані на рисунку 7) показав, що електромеханічні процеси в схемі ЕБ з ДРТВП порівняно з традиційною характеризується меншими кутами вибігу ротора генератора, меншими максимальними значеннями струмів статора генератора та вищим рівнем його напруги під час зовнішніх КЗ, швидшим відновленням синхронного режиму генератора та, що особливо важливо, рівнем напруги на шинах ВП не нижчим за критичне для електроприймачів ВП значенням і, як наслідок, позитивним демпфуючим впливом активного навантаження ВП на такі процеси. Усе це свідчить, що за динамічною і результуючою стійкістю режимів та рівнів напруги на шинах ВП схема ЕБ з ДРТВП має кращі характеристики порівняно з традиційною.

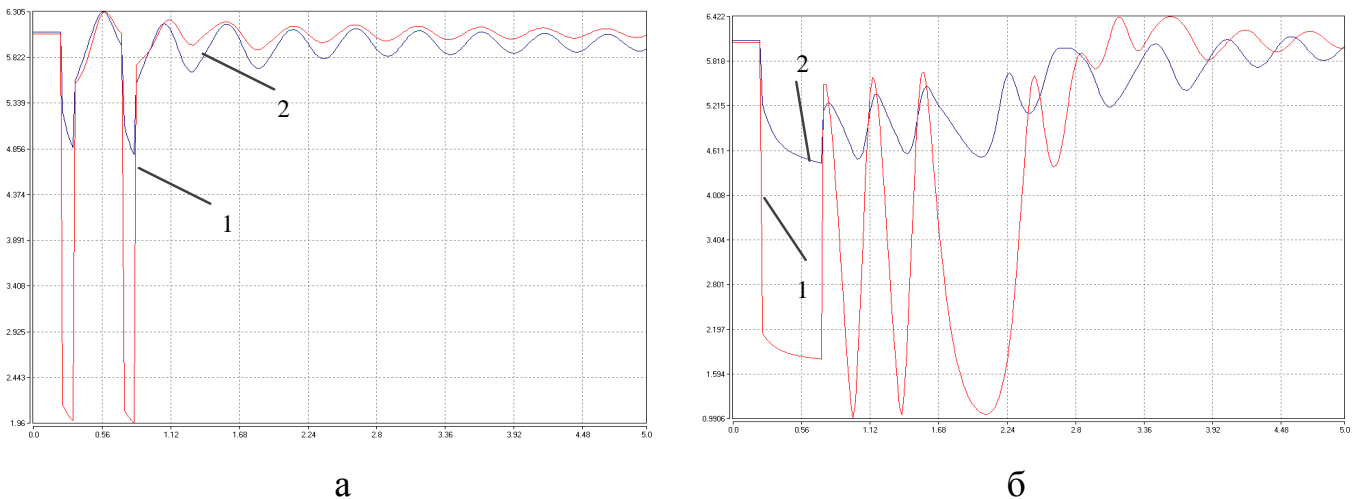


Рисунок 7 - Напруги на шинах РУВП під час розрахункових збурень: а - третього; б – четвертого; 1 - традиційної схеми; 2 - схеми ЕБ з ДРТВП.

Дослідження електромагнітних процесів під час зовнішніх симетричних і несиметричних КЗ проводились у фазних координатах на трифазній цифровій моделі в середовищі ПК *RE*. Аналіз одержаних результатів, основні з яких наведені у таблиці 2, показав, що рівень несиметрії напруг і струмів генератора в обох схемах є значним і практично однаковим.

Поряд з цим, якщо рівень несиметрії напруг на шинах РУВП у традиційній схемі становить орієнтовно від 20% (для $K^{(1,1)}$) до 30% (для $K^{(2)}$), то у схемі з ДРТВП рівень несиметрії цих напруг є набагато меншим і становить від 3,5% (для $K^{(1,1)}$) до 5,4% (для $K^{(2)}$).

Таблиця 2

Симетричні складові координат режиму у в.о. під час зовнішніх КЗ

Схема ЕБ		традиційна				з ДРТВП			
Величина	Складова	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1,1)}$
$U_{Гф}$	пряма	0.363	0.679	0.781	0.568	0.418	0.709	0.803	0.607
	обернена	-	0.32	0.218	0.209	-	0.295	0.201	0.192
$I_{Гф}$	пряма	3.716	2.223	1.775	2.695	3.449	2.085	1.68	2.549
	обернена	-	1.569	1.069	0.908	-	1.448	0.986	0.944
$U_{ВПф}$	пряма	0.353	0.66	0.758	0.552	0.898	0.952	0.969	0.933
	обернена	-	0.311	0.212	0.202	-	0.054	0.037	0.035

Це означає, що схемі ЕБ з ДРТВП під час зовнішніх несиметричних КЗ притаманна природна симетрувальна властивість щодо напруги на шинах РУВП, оскільки вплив несиметрії фазних напруг генератора компенсується відповідним впливом несиметрії струмів через ДРТВП. При цьому значення складової прямої послідовності цієї напруги перевищує $0.9U_{ВПном}$, що покращує умови роботи електроприймачів ВП в таких режимах. Окрім того, рівень струмів генератора та БТ Т1 в схемі з ДРТВП на 5÷7% менший за їх рівень у традиційній схемі ЕБ.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішене актуальне науково-практичне завдання, що полягає у підвищенні ефективності функціонування енергоблоків електростанцій шляхом використання впливу додаткового робочого трансформатора власних потреб на їх режими і характеристики та визначення факторів і умов для забезпечення рівня напруги на шинах власних потреб першого ступеня трансформації, достатнього для надійної роботи їх електроприймачів як під час нормальних експлуатаційних режимів, так і під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі.

Основні висновки за результатами проведених дослідження подано нижче.

1. Проведений аналіз недоліків режимних властивостей, притаманних традиційним системам електропостачання власних потреб енергоблоків щодо забезпечення достатнього для надійної роботи їх електроприймачів рівня напруги, зокрема необхідність виконання перемикань пристроями РПН трансформаторів під час експлуатаційних режимів чи вимушене введення резервних джерел живлення під час тривалих аварійних режимів у зовнішній електричній мережі зі значним зниженням напруги, свідчать про необхідність підвищення ефективності функціонування енергоблоків шляхом застосування нових схемо-технічних вирішень з додатковим робочим трансформатором систем живлення власних потреб першого ступеня трансформації.

2. Запропоновано підхід до визначення потужностей основного і додаткового трансформаторів першого ступеня трансформації систем живлення власних потреб енергоблоків електростанцій, що дає змогу досліджувати такі схеми з реальним електроустаткуванням та забезпечувати як їх експлуатаційні режими, так і вимоги щодо достатнього рівня напруги на шинах власних потреб під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі.

3. Розроблено методику обчислення втрат потужності у системах живлення власних потреб електростанцій з додатковим трансформатором власних потреб, яка дає змогу враховувати режимні особливості їх елементів. Показано, що за величиною втрат активної потужності розглянуті нові та традиційні схеми є практично рівноцінними. Проведені на прикладі енергоблоку з турбогенератором ТГВ-200 М аналіз і розрахунки, підтвердили, що схема з робочим і додатковим робочими трансформаторами власних потреб за техніко-економічними показниками може бути альтернативою до традиційних схем.

4. Розроблено узагальнену математичну модель двообмоткового трансформатора, яка на відміну від наявних дає змогу враховувати особливості роботи трансформаторів у режимах заданої напруги та заданого струму в розрахункових схемах електричних мереж для аналізу усталених режимів. Розроблений алгоритм її програмної реалізації використовується в програмному комплексі ДАКАР у вигляді окремого модуля для аналізу усталених експлуатаційних та перехідних режимів електроенергетичних систем.

5. Показано, що резонансні властивості схеми заміщення додаткового робочого трансформатора власних потреб енергоблоків, зумовлені способом його приєднання, вимагають високої точності обчислення значень параметрів гілок такої схеми заміщення, що необхідно враховувати під час комп'ютерного симулювання.

6. Аналіз результатів досліджень ustalених режимів і регулювальних характеристик енергоблоку з додатковим робочим трансформатором власних потреб показав, що під час роботи генератора з індуктивним коефіцієнтом потужності в діапазоні $\cos\varphi_{LG} = 0,85 \div 0,9$ і зміні напруг генератора та системи в межах $U_{Г*} = 0,95 \div 1,05$ та $U_C = 220 \div 252$ кВ відповідно рівень напруги на шинах власних потреб знаходиться в допустимих межах $U_{ВП*} = 0,9 \div 1,1$ без дії пристрою РПН робочого трансформатора власних потреб незалежно від того, який з вузлів схеми є контрольним.

7. Порівняльний аналіз результатів експериментів на фізичній моделі та комп'ютерного симулювання підтвердив ефективність застосування додаткового робочого трансформатора власних потреб першого ступеня трансформації для забезпечення рівня напруги, достатнього для надійної роботи їх електроприймачів як під час нормальних експлуатаційних режимів, так і під час аварійних режимів у зовнішній електричній мережі. Збіжність одержаних результатів свідчить про коректність прийнятих припущень, методології, математичних методів і моделей, а також доцільність використання програмних комплексів для проведення досліджень режимів і характеристик нових схемо-технічних рішень об'єктів електроенергетики.

8. Встановлено за результатами математичного моделювання, що під час обтяжених режимів енергоблоку з додатковим робочим трансформатором власних потреб можна забезпечити вищий рівень напруги на їх шинах не знижуючи запасу статичної стійкості, порівняно з енергоблоками з традиційними схемами.

9. Обґрунтовано і підтверджено результатами комп'ютерного симулювання, що застосування додаткового робочого трансформатора власних потреб забезпечує зниження несиметрії напруг на їх шинах в умовах несиметрії напруг на шинах генератора, що зменшує її негативний вплив на роботу обладнання системи власних потреб. Так рівень несиметрії напруг на шинах власних потреб під час різних видів зовнішніх несиметричних КЗ становив у традиційній схемі від 20% (для $K^{(1,1)}$) до 30% (для $K^{(2)}$), а в схемі з додатковим робочим трансформатором власних потреб зменшився до 3,5% (для $K^{(1,1)}$) та 5,4% (для $K^{(2)}$) відповідно.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лисяк Г.М., Пастух О. Р. Режими та характеристики енергоблоку електростанції з додатковим робочим трансформатором власних потреб // Вісник Вінницького політехнічного інституту "Електроенергетичні та електромеханічні системи". 2016. № 2 (125). С. 116-121.

2. Лисяк Г. М., Маліновський, А. А., Пастух О. Р. Методика вибору основних параметрів схеми підвищеної надійності блочних електростанцій з умов підтримання бажаного рівня напруги на шинах власних потреб під час зовнішніх трифазних коротких замикань // Технічна електродинаміка. 2000. № 4. С. 51 - 55.

3. Лисяк Г. М., Пастух О. Р. Оцінка діапазону зміни рівня напруги на шинах власних потреб схеми підвищеної надійності енергоблоків під час зовнішніх

трифазних коротких замикань // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2001. № 435. С. 77-84.

4. Лисяк Г. М., Пастух О. Р. Оцінка необхідної встановленої потужності робочих трансформаторів першого ступеня трансформації схеми підвищеної надійності електропостачання власних потреб енергоблоків електростанцій // "Технічна електродинаміка". 2003. № 5. С. 50-54.

5. Лисяк Г. М., Коновал В. С., Пастух О. Р. Узагальнена схема заміщення двообмоткових трансформаторів для розрахунку усталених режимів // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2003. № 479. С. 112-121.

6. Коновал В. С., Лисяк Г. М., Пастух О. Р., Скрипник О. І. Комп'ютерне симулювання усталених режимів енергоблока електростанції з додатковим робочим трансформатором власних потреб // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2003. № 487. С. 81-88.

7. Лисяк Г. М., Пастух О. Р. Оцінка рівня втрат активної потужності в схемах підвищеної надійності електропостачання власних потреб енергоблоків електростанцій // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. 2004. № 506. С. 45-49.

8. Лисяк Г. М., Коновал В. С., Пастух О. Р. Узагальнена схема заміщення трансформаторів і автотрансформаторів для математичного моделювання усталених режимів електроенергетичних систем // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2005. № 544. С. 74-88.

9. Лисяк Г. М., Пастух О. Р. Оцінка рівнів напруг під час усталених режимів енергоблоків з додатковим робочим трансформатором власних потреб // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2008. № 615. с. 58-64.

10. Лисяк Г. М., Пастух О. Р., Равлик О. М. Перехідні процеси під час зовнішніх коротких замикань енергоблоку з додатковим робочим трансформатором власних потреб // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи . 2010. № 671. С. 51-57.

Тези доповідей:

11. Лисяк Г. М., Маліновський, А. А., Пастух О. Р. Методика вибору основних параметрів схеми підвищеної надійності блочних електростанцій з умови підтримання бажаного рівня напруги на шинах власних потреб під час зовнішніх трифазних коротких замикань // Тези доповідей 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції "Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці". 25-30 жовтня 1999 рік, Україна Львів. С.153-154.

12. Лисяк Г. М., Пастух О. Р. Оцінка рівня втрат активної потужності в схемах підвищеної надійності електропостачання власних потреб енергоблоків електростанцій // Тези доповідей IV-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми економії енергії". 8-12 жовтня 2003 року, Львів. С.46.

АНОТАЦІЯ

Пастух О.Р. Режими та характеристики енергоблоку електростанції з додатковим робочим трансформатором власних потреб. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 - електричні станції, мережі і системи, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2019 р.

У дисертаційній роботі обґрунтовано доцільність впровадження нових схемних вирішень електричної частини енергоблоків (ЕБ) з додатковим робочим трансформатором власних потреб (ДРТВП). Особливістю цих схем є те, що ДРТВП працює в режимі заданого навантаженням ЕБ струму, що забезпечує підтримання бажаної напруги на шинах власних потреб (ВП) як в усталених експлуатаційних режимах, так і під час коротких замикань в прилеглій до ЕБ електричній мережі.

Результати оцінки вартості нових схем і втрат потужності в них, а також аналізу усталених режимів і перехідних процесів за допомогою комп'ютерної техніки показали: схеми ЕБ з ДРТВП без пристроїв РПН за техніко-економічними показниками можуть бути альтернативою до традиційних схем; під час режимів завантаження генератора активною потужністю, близькою до номінальної, і зміни напруг генератора й енергосистеми в достатньо широких межах на шинах ВП забезпечується допустима напруга; за динамічною та результуючою стійкістю режимів та напругами на шинах ВП схема з ДРТВП має кращі властивості порівняно з традиційною; схемі ЕБ з ДРТВП притаманна природна симетрувальна властивість щодо напруги на шинах ВП під час зовнішніх несиметричних КЗ.

Ключові слова: електрична станція, енергоблок, трансформатор власних потреб, моделювання, регулювання напруги, усталений режим, коротке замикання, стійкість.

ABSTRACT

Pastukh O.R. The modes and characteristics of a power unit of a power-station with an auxiliary working transformer of own necessities. – On the rights of the manuscript.

The dissertation for the attainment of the scientific degree of Kandydat of Technics, speciality 05.14.02 – Electric Power Stations, Networks and Systems. Lviv Polytechnics National University. – Lviv, 2019.

This Dissertation justifies the feasibility of introducing new scheme, technical decisions for the electrical part of power stations units, in particular, new option of the power supply system implementation for the auxiliaries with an additional auxiliary working transformer. The conducteds comprehensive investigation and analysis of their modes and characteristics. The fundamental difference between such systems and the traditional ones is the application and circuitry of the inclusion of an additional auxiliary transformer, which works simultaneously with a working auxiliary transformer on the busbar of the first transformation stage of the auxiliaries power supply system. At the same time, in accordance with the chosen values of the parameters of the system elements, in particular, coefficients of transformation of the two auxiliary working transformers, the mode of operation of the additional auxiliary working transformer will be close to the

current source mode, the value of which will be determined by the current load of the generator power units, both in the stable operating modes and during external short circuits in the electric network adjacent to the power units. This is the additional auxiliary working transformer mode that provides the voltage level, sufficient for their electrical power.

Approach of selecting nominal and total power of the working and additional auxiliary working transformer power units of electric power stations, which gives the opportunity to take into account both characteristic operating modes of the power units and the requirement to the desired voltage is offered.

Develop the methodology of evaluation of active-power losses in the new electric power supply schemes of the power units with an additional auxiliary working transformer, which allows to take into account the operating features of their elements is offered. It is shown that the magnitude of active-power loss is practically equivalent in both new and traditional schemes.

The conducted analysis and the calculation example for the power units with a 200 MW turbo-generator showed that the scheme with a working and additional auxiliary working electric power transformer with without on-load tap changing (OLTC) devices by technical and economic indicators can be an alternative to the traditional schemes with the auxiliary working transformer of own with the OLTC device.

A generalized equivalent circuit of replacement of two-winding transformer for calculation of the steady state modes is created in this work, which allows to take into account the features of magnetic systems without bringing the coordinates of the mode of windings to one voltage level. As also – account work transformers operates in the modes given by voltage and given by current. Developed correspondingly mathematical model.

It is shown that the resonant properties of the equivalent circuit of additional auxiliary working transformer of the power units of power plants, predetermined by the way of bonding of such transformer, require high accuracy calculation of values of parameters of branches. This needs to be considered during usage of software complexes for computer simulation of the steady state modes.

Computer simulation allowed revealing peculiarities of the mathematical and digital models of additional auxiliary working transformer and recommendations for their implementation.

It's shown that for the power units with an additional auxiliary working transformer in modes of generator loading with nominal active power with the voltage change of the generator and electric power system in sufficiently wide limits voltage is provided on the buses of auxiliary, sufficient for their electrical power.

It's well-proven that dynamic and resultant stability of the modes and voltage on buses of an additional auxiliary working transformer scheme has better properties than the traditional scheme.

It's shown that during external symmetric and asymmetric short circuit the phase voltage on buses of the auxiliari are enough for the normal operation of the auxiliari receivers during the lifespan of the short circuit, the phase voltage unbalance is low and the residual voltage is higher and the currents of the elements of the electrical part are

lower compared to the traditional circuit. This increases the efficiency of the the power units.

In this paper, it's established that the schemas of the has a natural symmetric property regarding the voltage on the buses of the auxiliari during external asymeric short circuits.

Experiments on a static physical model of a fragment of an electrical part of a power unit with an additional working auxiliary transformer have proved that the natural properties of the investigated circuit provide its operation in a mode close to the current source mode, the value of which is determined by the current load of the power units. At the same time, natural properties power units with an additional auxiliary working transformer, unlike the traditional power unit without an additional working auxiliary transformer, provide the level of residual voltage on the auxiliary power unit basbars, sufficient for the operation of their electrical receivers in three-phase short-circuit modes.

Comparative analysis and the evaluation of the mathematical and physical modelling results of the power unit with and without an additional auxiliary working transformer have confirmed the research effectiveness using appropriate mathematical and digital models of such schemes and software systems that provide the required accuracy of the results.

The results of the dissertation work are implemented as a separate module under the name of VAT in the digital computing complex DAKAR.

On the basis of theoretical studies and calculations, recommendations were given regarding the admissible areas of voltage change of the generator in the characteristic steady state modes.

Key words: *electric power station, power unit, system auxiliary transformer, simulation, voltage control, steady state, shortcut, stability.*

АННОТАЦИЯ

Пастух Е.Р. Режимы и характеристики энергоблока электростанции с дополнительным рабочим трансформатором собственных нужд. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 –электрические станции, сети и системы, Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 2019 г.

В диссертационной работе обосновано целесообразность внедрения новых схемных решений электрической части энергоблоков (ЭБ) с дополнительным рабочим трансформатором собственных нужд (ДРТСН). Особенностью этих схем является то, что ДРТСН работает в режиме заданного нагрузкой ЭБ тока, что обеспечивает желаемое напряжение на шинах собственных нужд (СН) как в установившихся эксплуатационных режимах, так и при коротких замыканиях в примыкающей к ЭБ электрической сети.

Результаты оценки стоимости новых схем и потерь мощности в них, а также анализ установившихся режимов и переходных процессов с помощью компьютерной техники показали: схемы ЭБ с ДРТСН без устройств РПН по технико-экономическим показателям могут быть альтернативой традиционным схемам; при режимах загрузки генератора активной мощностью, близкой к номинальной, и изменении напряжений генератора и энергосистемы в довольно широких границах на шинах СН обеспечивается допустимое напряжение; по динамической и результирующей устойчивости режимов и напряжениям на шинах СН схема с ДРТСН обладает лучшими качествами по сравнению с традиционной; схема ЭБ с ДРТСН имеет естественное симметрирующее свойство касательно напряжений на шинах СН при внешних несимметрических КЗ.

Ключевые слова: электрическая станция, энергоблок, трансформатор собственных нужд, моделирование, регулирование напряжения, установившийся режим, короткое замыкание, устойчивость.

Підписано до друку 06. 02. 2020 р.

Формат 60x90 1/16. Папір офсетний.

Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.

Тираж 100 прим. Зам. 200100

Поліграфічний центр

Видавництва Національного університету "Львівська політехніка"

вул. Ф. Колесси, 4, 79013, Львів

Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27. 12. 2012 р.