

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 143 с., 32 рисунка, 23 таблиць, 78 джерел, 1 додаток

ПРИСТРІЙ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, РЕАКТОР, ТРАНСФОРМАТОР, ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ОБМОТКИ, МАГНИТОПРОВІД, БАК, ТРАНСФОРМАТОРНЕ МАСЛО

**Актуальність.** В даний час в електричних мережах високої напруги знаходять все більш широке застосування керовані підмагнічуванням реактори з граничним насиченням магнітного кола. Зростаюча потреба в цьому обладнанні з боку багатьох енергосистем України та інших країн визначається його унікальними можливостями та високими техніко-економічними показниками. Плавність і великий діапазону регулювання цих реакторів при низькому рівні нелінійних спотворень і простоті експлуатаційного обслуговування дозволяє по новому і набагато ефективніше вирішувати проблеми компенсації ємнісних струмів однофазного замикання на землю в мережах з ізольованою нейтраллю, забезпечувати регулювання реактивної потужності, підтримання рівня напруги і зменшення втрат.

Актуальність магістерської роботи пояснюється тим, що питання регулювання перетоків реактивної потужності та підтримки допустимого рівня напруги особливо загострилися в останні роки в енергосистемах України для мереж напругою 110 кВ і вище в зв'язку зі спадом промислових навантажень і зростанням надлишків реактивно потужності. Ці завдання все важче вирішувати раніше встановленим обладнанням, що підтверджується відповідними роботами різних дослідників та розробників цих пристроїв.

**Об'єкт дослідження** – режими роботи керованих шунтуючих реакторів в електричних мережах та їх електродинамічні характеристики.

**Предмет дослідження** – пристрій компенсації реактивної потужності на номінальну напругу 110 кВ, номінальну потужність 63000 кВАр з регулюванням.

**Мета роботи** – дослідження можливостей підвищення надійності роботи керованих підмагнічуванням реакторів на етапі проектування за рахунок поєднання теоретичних і чисельних методів при розробці, розроблення конструкції пристрою компенсації реактивної потужності зовнішньої установки з природною циркуляцією масла, визначення масо-габаритних розмірів всього пристрою в цілому, до складу якого входять електромагнітна частина, трансформатор з тиристорним перетворювачем, система керування, регулювання, захисту та автоматики. А також розробка способу більш ефективного використання КШР в електричній мережі на основі математичного моделювання керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора для дослідження комутаційних і динамічних режимів роботи КШР в складі електроенергетичної системи.

**Метод дослідження** – розрахунково-аналітичний, пошуковий, математичного моделювання, послідовних наближень.

**Публікації.** 1. Кислань А. В. Исследование технических решений повышения эффективности работы шунтирующих реакторов 110 кВ [Электронный ресурс] / Л.Б. Жорняк, В.И. Осинская, И.И. Чердаклиев, А.В. Кислань // Тижень науки: наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів ЗНТУ, 15-19 квітня 2019 р.: тези доповідей. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – С.94-96. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – Режим доступу: [http://www.zntu.edu.ua/uploads/dept\\_s&r/2019/conf/1/TN\\_2019 ETF.pdf](http://www.zntu.edu.ua/uploads/dept_s&r/2019/conf/1/TN_2019 ETF.pdf)

2. Кислань А. В. Исследование технических решений повышения эффективности работы шунтирующих реакторов 110 кВ / А.В. Кислань // Тижень науки: наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів ЗНТУ, 15-19 квітня 2019 р.: доповідь. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019.

## ЗМІСТ

Завдання .....	2
Реферат .....	4
Вступ .....	9
1 Огляд існуючих конструкцій пристроїв компенсації реактивної потужності .....	15
1.1 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтуючих реакторів.....	15
1.2 Принцип дії керованого шунтуючого реактора з підмагнічуванням .....	21
1.3 Основні технічні характеристики керованого шунтуючого реактора, що досліджується .....	29
1.4 Переваги керованого шунтуючого реактора перед іншими альтернативними пристроями .....	30
1.5 Технічне завдання на розробку та дослідження.....	30
1.5.1 Мета розробки та дослідження.....	30
1.5.2 Основні параметри пристрою компенсації реактивної потужності.....	31
1.5.3 Технічні вимоги .....	31
2 Електромагнітний розрахунок реактора.....	34
2.1 Розрахунок коефіцієнтів трансформації обмоток пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП).....	34
2.2 Розрахунок обмоток пристрою компенсації реактивної потужності.....	35
2.2.1 Розрахунок мережевої обмотки .....	39
2.2.2 Розрахунок обмотки керування .....	44
2.2.3 Розрахунок компенсаційної обмотки .....	48
2.3 Розрахунок магнітопроводу.....	51
3 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора.....	56

3.1 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора.....	60
3.1.1 Головні припущення.....	61
3.1.2 Конструкція фази КШР.....	62
3.2 Розробка моделі КШР в середовищі Simulink (Matlab).....	65
4 Розрахунок маси електромагніної частини пристрою компенсації реактивної потужності.....	76
4.1 Розрахунок маси масла.....	76
4.2 Розрахунок повної маси.....	78
5 Електродинамічний розрахунок.....	79
5.1 Міцність жорсткість і стійкість обмотки при дії радіальних і дотичних сил.....	79
5.1.1 Визначення середніх напруг.....	79
5.1.2 Перевірка міцності.....	80
5.1.3 Перевірка жорсткості.....	80
5.1.4 Визначення необхідної сили осьового пресування.....	84
5.2 Міцність, жорсткість і стійкість обмоток при дії осьових сил.....	85
5.2.1 Визначення осьових критичних сил полягання провідників.....	86
5.2.3 Розрахунок провідників на вигин.....	90
5.2.4 Визначення осьових переміщень, зусиль і напружень.....	91
5.2.5 Перевірка міцності, жорсткості і стійкості.....	93
5.2.6 Перевірка міцності, жорсткості і стійкості до вигниання провідників.....	94
6 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	96
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	96
6.2 Заходи з охорони праці.....	98
6.2.1 Заходи по забезпеченню безпеки.....	98
6.2.2 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці.....	101
6.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	110
6.3.1 Заходи з пожежної безпеки.....	110

6.3.2 Організація навчання працюючого та непрацюючого населення діям у надзвичайних ситуаціях.....	112
7 Економічне обґрунтування пристрою компенсації реактивної потужності.....	115
7.1 Техніко-економічні показники пристрою компенсації реактивної потужності.....	115
7.2 Оцінка ринку збуту.....	116
7.3 Розрахунок калькуляції собівартості і цін ПКРП.....	117
7.4 Розрахунок економії виробничих ресурсів.....	123
7.5 Аналіз безбитковості виробництва.....	124
7.6 Розрахунок річного економічного ефекту.....	127
Висновки.....	128
Перелік джерел посилання.....	130
Додаток А.....	140

## ВСТУП

Величезна кількість споживачів електроенергії постійно навантажує мережу реактивної складової споживаної потужності, причому це навантаження постійно зростає. Впровадження компенсуючих пристроїв реактивної потужності дозволяє підвищити надійність електроживлячих мереж і збільшити пропускну здатність енергосистеми.

Як зазначають автори в своїх дослідженнях та роботах «на теперішній час в електроенергетиці країн СНД і зарубіжних країн велике значення надається створенню керованих або гнучких ліній електропередач, які є складовою частиною «інтелектуальних» (Smart Grid) мереж з пристроями FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems). Для оптимального ведення режимів таких енергосистем необхідні високоефективні засоби регулювання потоків як активної, так і реактивної потужності» [1, 2]. Причому розробниками пристроїв та досліджувальниками електромагнітних процесів в них відзначається, що для керування режимами по напрузі і реактивної потужності поряд з традиційним застосуванням генераторів, синхронних і статичних компенсаторів, комутованих реакторів і конденсаторних батарей в останнє десятиліття все більш широко використовуються нові пристрої - керовані шунтуючі реактори (КШР). Трансформаторне виконання для відкритої установки на будь-який клас напруги з можливістю плавного регулювання споживаної реактивної потужності дозволяє встановити КШР в будь-якій частині енергосистеми і забезпечити стабілізацію напруги, оптимізацію перетоків реактивної потужності, підвищення пропускну спроможності електропередач, зниження втрат, числа комутацій вимикачів і дій РПН трансформаторів. Поєднання КШР з паралельно встановленою батареєю статичних конденсаторів (БСК) дозволяє забезпечити не лише плавно регульовану компенсацію (споживання) реактивної потужності, але і її видачу відповідно до потужності БСК при розвантаженні КШР до режиму холостого ходу [5... 7].

Наприклад, В.В. Кучанський в своїй роботі відзначає, що «застосування керованих шунтувальних реакторів у лініях електропередачі надвисокої напруги дає змогу підвищити пропускну здатність. Визначено значення індуктивностей керованих шунтувальних реакторів, за яких досягаються максимальні допустимі значення потужності». При аналізі зміни ступеня компенсації зарядної потужності при застосуванні керованих шунтувальних реакторів, він з'ясував, що за певного діапазону індуктивності значення допустимої потужності лінії електропередач залишаються незмінними. Застосування концепції Smart Grid дало змогу модернізувати лінії електропередачі надвисокої напруги відповідно до вимог гнучких ліній електропередачі змінного струму. Наведені автором результати показують, що керовані шунтувальні реактори є перспективними та затребуваними для керування параметрами режимів об'єднань енергосистем [4].

Всі автори робіт при розробках нових та аналізі експлуатації існуючих конструкцій таких пристроїв вважають, що керовані шунтуючі реактори відносяться до класу пристроїв, зміна індуктивності в яких здійснюється насиченням магнітного ланцюга підмагнічуванням. У функціональному відношенні керовані підмагнічуванням реактори є потужними малоінерційними індуктивностями з широким діапазоном регулювання споживаного струму. Вони призначені для підвищення надійності експлуатації електричних мереж, оптимізації режимів роботи і зниження втрат електроенергії в лініях електропередач [5...25].

В основу їх створення покладені дві оригінальні ідеї:

— збудження і керування потоками підмагнічування шляхом послідовного, періодично повторюваного замикання частини витків обмоток ректора напівпровідниковими ключами;

— сильне насичення магнітного ланцюга реактора в номінальному режимі, коли робоча точка магнітного потоку не менше половини періоду частоти мережі знаходиться в області технічного насичення кривої намагнічування.

У пристроях FACTS почали використовувати нові силові електронні прилади (GTO, IGCT, IGBT), які дозволяють використовувати перетворювачі струму і напруги для забезпечення швидкодіючої компенсації реактивної потужності. На основі подальшого розвитку систем керування, вдосконалення напівпровідникових приладів і нових технологій перетворювачів напруги в даний час компенсація реактивної потужності є ключовим фактором для надійної передачі енергії змінного струму [3...5].

Генерація електричної енергії та її споживачі зазвичай не знаходяться близько один від одного. Великі міста і великі промислові регіони часто отримують електроенергію від джерел, що знаходяться на великій відстані. Складові системи і навантаження включають в себе джерела реактивної потужності (конденсатори і котушки індуктивності), які впливають на профіль напруги мережі і стабільність системи. Лінії передачі високовольтних систем (735 кВ) можуть мати до 200 МВАр ємнісної потужності на довжину 100 км. Кабельні з'єднання можуть давати навіть більшу реактивну потужність. Великі навантаження, що містять електричні дугові печі або потужні приводи, можуть мати до 100 МВАр індуктивної реактивної потужності. Без відповідної компенсації реактивної потужності в довгих лініях передачі можуть наступити критичні умови роботи системи через сильні коливань напруги і проблем зі стабільністю. Ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою схем паралельної і послідовної компенсації.

Реактивний струм, що циркулює між генератором енергопостачальної компанії і споживачем, перетворюється на теплову енергію в системі розподілу електроенергії, тобто створюється додаткове навантаження на генератори, трансформатори, кабелі та розподільчий пристрій.

Це призводить до втрат електроенергії і падіння напруги. Якщо частка реактивного струму висока, наявні перетину провідників не можуть повністю використовуватися для передачі корисної енергії, можливо, їх потрібно відповідно збільшити.

З точки зору енергопостачальної компанії низький коефіцієнт потужності призводить до збільшення витрат на інвестиції і обслуговування, і ці додаткові витрати перекладаються на тих, хто за них відповідальний, тобто на споживачів з низьким коефіцієнтом потужності. Тому на додаток до лічильника активної енергії встановлюється лічильник реактивної енергії.

Серед цілого ряду переваг від застосування пристроїв компенсації реактивної потужності можна виділити п'ять головних:

- економія енергоспоживання, тобто за умови впровадження компенсуючих пристроїв реактивної потужності дає суттєвий економічний ефект. Зниження рівня енергоспоживання може скласти до 40-50% від загального обсягу. При таких обсягах термін окупності систем компенсації потужності складе не більше одного року;

- збільшення терміну служби обладнання, тобто засоби компенсації збільшують термін служби силових трансформаторів, оскільки їх використання знижує навантаження на устаткування. Використання установок компенсації також знижує навантаження на лінії передач і нагрів проводів, що дозволяє використовувати струмопровідні жили меншого перетину;

- економія витрат на пристрій електромереж, тобто на етапі проектування і будівництва нових будівель монтаж системи компенсації реактивної потужності дозволяє істотно заощадити на облаштуванні розподільчої електромережі;

- покращення якості енергопостачання, тобто застосування засобів компенсації реактивної потужності дає можливість подавити мережеві перешкоди, уникнути глибокої просадки напруги і мінімізувати несиметрію фаз. Крім того, системи компенсації в складі пасивних фільтрів дозволяють знизити рівень вищих гармонік; тобто пристрій компенсації реактивної потужності дозволяє уникнути штрафних санкцій від постачальника електроенергії за погіршення показників коефіцієнта потужності.

Висновок. У даний час виникли об'єктивні передумови для розвитку електроенергетики України XXI століття на новій технологічній основі, що

характеризує перехід до нового розвитку світової економіки шляхом створення інтелектуальної енергосистеми з активно-адаптивною електричною мережею, що побудована на концепції Smart Grid («розумні мережі») [1–7]. Розвиток електроенергетики в передових країнах супроводжується інтенсивним пошуком нових технологій для вирішення проблеми подальшого підвищення ефективності роботи магістральних електричних мереж з метою оптимального розподілу потоків потужності об'єднаної енергосистеми. У США, Індії, Європейському Союзі, Канаді, Китаї концепція Smart Grid є по суті державною політикою технологічного розвитку електроенергетики майбутнього.

Таку ж політику почала реалізовувати Україна до міжсистемних ліній електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) 500–750 кВ, що утворюють магістральні електричні мережі. У таких сучасних умовах експлуатації електроенергетичної галузі необхідно застосовувати технічні засоби регулювання реактивної потужності, що, на відміну від застарілих концепцій [7–9] дали б змогу підвищити пропускну здатність ЛЕП НВН. Результати, наведені в публікаціях [10–15], вказують на те, що застосування керованих шунтувальних реакторів (КШР) у ЛЕП НВН приводить до більш ефективної експлуатації магістральних електричних мереж.

Тенденції розвитку сучасних магістральних електричних систем у світі вказують на зростаючу роль концепції Smart Grid як необхідної складової забезпечення ефективності експлуатації об'єднаних енергосистем. Керовані шунтувальні реактори є технічним засобом підвищення ефективності роботи об'єднаної електроенергетичної системи України шляхом збільшення пропускну здатності ЛЕП НВН. Більш повне використання пропускну здатності існуючих електричних мереж, зокрема окремих міжсистемних і міждержавних зв'язків, може забезпечити:

— передачу додаткової електроенергії з надлишкових енергосистем з більш низькими;

— тарифами в дефіцитні з витісненням там менш економічних джерел енергії;

— збільшення видачі активної потужності електростанцій за рахунок підвищення максимально-допустимих перетоків потужності.

Також застосування гнучких (керованих) ліній електропередачі (ГЛЕП) дасть змогу розглянути питання про перенесення термінів введення генеруючих потужностей і будівництва нових високовольтних ліній електропередачі з метою збільшення пропускної здатності електричних мереж, а в окремих випадках, можливо, і відмову від цих заходів.

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

## 1.1 Огляд існуючих конструкцій керованих шунтуючих реакторів

Аналіз та дослідження електромагнітних параметрів пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП) проведено на основі керованого шунтуючого реактора (КШР) типу РТУ, який відноситься до класу пристроїв, в яких зміна індуктивності здійснюється через насичення магнітного ланцюга підмагнічуванням.

В своїх роботах автори зазначають, що «За попередній період часу (до 2013 р) в країнах СНД і ближнього зарубіжжя введено в експлуатацію понад шістдесят керованих реакторів напругою від 6 до 500 кВ. На підставі проведеного огляду існуючих конструкцій реакторів, їх переваг і недоліків, відповідно до завдання на магістерську роботу, а також аналізу тенденцій, що намітилися в електроапаратобудуванні, можна зробити ряд висновків, що стосуються вибору напрямку дослідження конструкції реактора. Так, в даний час для обмеження струмів при несиметричних КЗ в розподільних пристроях АЕС використовують однофазні масляні реактори з природною циркуляцією масла та повітря. У таких реакторах застосування масла дозволяє поліпшити охолодження обмотки за рахунок конвекції масла, а також зменшити ізоляційне відстань між обмоткою і заземленими частинами, що забезпечує зменшення габаритних розмірів реактора [5 ...17].

За характером виконання обмоток реакторів існує відмінність, але найбільше застосування знаходять кабельні та дискові обмотки. Кабельні обмотки здійснюються з гнучкого багатожильного голого або ізольованого проводу, зазвичай безперервним намотуванням, навиваються горизонтальними рядами, ряд за рядом, при цьому з проміжками між проводами як по вертикалі, так і по горизонталі (з метою кращого охолодження). Для більш високих напруг (від 20 кВ до 35 кВ), щоб уникнути розряду між крайніми витками,

схил обмотки розсовують на великі відстані, тобто виконують похилими рядами. Обмотка з декількох паралельних гілок здійснюється відповідним числом кінців кабелю. Дисккові обмотки здійснюються з одного або декількох дисків, розташованих на одній осі і мають вигляд плоских спіралей, виконаних з плоскою міді [11...14]. Основні типи керованих шунтуючих реакторів (КШР), їх потужність, основні технічні параметри, країна-виробник і інші дані вказані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Характеристики керованих шунтуючих реакторів [14]

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Країна виробник	Країна впровадження	Кількість
Регулювання перемикачів отпаек	Одна обмотка з РПН	180 МВА, 330кВ	Західна Європа	Білорусь	1
Трансформаторного типу (КШРТ) потужність тиристорних ключів для керування дорівнює номінальній потужності пристрою	Трансформатор з напругою к. з. 100% і тиристорні ключі на номінальну потужність КШР	50 МВА, 420 кВ	Індія	Індія	1
		60 МВА, 230кВ	ПАТ Запорозький трансформатор Ансольді -ВЕІ	Ангола	1
		25 МВА, 110 кВ	Росія і Білорусь	Росія	2

Закінчення таблиці 1.1

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Виробники	Де введені, країна	Кількість
Керовані підмагнічуванням стрижнів магнітопровода, потужність керування становить близько 1% номінальної потужності КШР	3 2 обмотками, поєднаний. СО і ОУ	180 МВА, 500кВ	Московський електрозавод	Росія	1
	з декількома обмотками	3,3 МВА, 6-10 кВ	Раменский з-д, ТОВ Енергія-Т	Росія, Мон-Голія	3
	з 2 обмотками, поєднаний. ОУ і КО	10-25 МВА, 35-110кВ	ПАТ Запорозь-стансформатор, ВАТ ЕЛУР, ТОВ Енергія-Т	Росія, Казах-стан, Беларусь, Литва	29
	з 3 окремими обмотками	63-180 МВА, 110-500 кВ			31

За принципом дії трифазні плавно регульовані реактори для компенсації реактивної потужності можна розділити на три класи - керовані підмагнічуванням магнітопровода, трансформаторного типу і реактори з перемиканням отпаек (аналогічно РПН трансформаторів) [13...15].

Керовані шунтуючі реактори трансформаторного типу (КШРТ) розроблялися в Санкт-Петербурзькому політехнічному університеті під керівництвом проф. Александрова Г.М. КШРТ є силовий трансформатор з напругою короткого замикання 100%, на вторинній обмотці якого встановлені зустрічно-паралельні тиристорні ключі на повну потужність реактора. Аналогічно відомій схемі статичного тиристорного компенсатора (СТК): повністю відкриті тиристори закорочують вторинну обмотку і забезпечують максимальну

споживану потужність КШРТ, при закритих тиристорах його потужність відповідає холостому ходу трансформатора, а в проміжних режимах споживана потужність плавно регулюється зміною кута керування вентилів з відповідною появою вищих гармонік в споживаному струмі. Для зниження рівня цих гармонік з боку нижчої напруги встановлюються фільтри [17, 18].

Таким чином, схема КШРТ зводиться до схеми СТК, в електромагнітній частині якого поєднані індуктивності фаз з трансформатором зв'язку з вищою напругою. Це дозволяє, на відміну від СТК, підключати КШРТ до будь-якого класу напруги, однак тиристорні ключі великої потужності зумовлюють підвищену вартість виготовлення, монтажу та експлуатації. Досвід застосування КШРТ в Росії поки обмежений двома реакторами напругою 110 кВ, введеними в експлуатацію менше двох років тому.

Керовані підмагнічуванням реактори типу РТУ на напруги від 35 до 500 кВ більше 10 років випускає ВАТ «Запоріжтрансформатор». В комплектації, проектуванні, поставці та налагодженні цих КШР беруть участь ВАТ «Електричні керовані реактори», м.Москва і ТОВ «Енергія-Т», м Тольятті. Прототипи цих реакторів були створені в Алма-Атинському енергетичному інституті більше 20 років тому. Перший промисловий зразок КШР типу РТУ-25000/110 був виготовлений в 1998 році і після випробувань на стенді ВЕІ в м Тольятті введено в експлуатацію в Північних електричних мережах Пермнерго (головний підстанція 110 кВ в м Кудимкар, вересень 1999 р.) [2...7, 13, 14]. В даний час КШР аналогічного принципу дії освоює Московський електротехнічний завод. Пілотний зразок реактора напругою 500 кВ поставлений на підстанцію «Нелим-500» в кінці 2009 року. Основною відмінністю цього КШР від виробів ВАТ «Запоріжтрансформатор» є поєднання в первинній мережевій обмотці функцій споживання реактивної потужності і підмагнічування магнітопроводу. При цьому тиристорний перетворювач випрямленої напруги підключається до нейтралей «зірок» розщепленої мережевої обмотки реактора, між секціями якої циркулюють постійні складові струму підмагнічування. Наявність в розщеплених гілках мережевої обмотки цього ре-

актора основного споживаного струму промислової частоти, випрямленого струму підмагнічування і вищих гармонік обумовлює додаткові вимоги до конструкції, джерела підмагнічування, схеми з'єднань трансформаторів струму, алгоритмів релейного захисту та автоматики.

У свою чергу номенклатура КШР, які випускаються заводом «Запоріж-трансформатор», має ряд схемо-технічних виконань залежно від класу напруги, потужності реактора і вимог замовника за складом обладнання, виду охолодження, алгоритмам керування, числу вбудованих трансформаторів струму, функцій моніторингу і т.д. При однаковому принципі дії основні відмінності між модифікаціями КШР серії РТУ для різних класів напруги (35 кВ ... 110 кВ, 220 кВ... 330 кВ, 500 кВ... 750 кВ) полягають в схемі електромагнітної частини і в складі системи підмагнічування [13, 14].

Для КШР напругою 35 або 110 кВ порівняно невеликої потужності (10 МВА ... 25 МВА) кращим техніко-економічним є виконання електромагнітної частини з двома обмотками - мережевою обмоткою (МО) і обмоткою керування (ОК) за схемою подвійного розімкнутого трикутника, що поєднує в собі функції підмагнічування та компенсації в струмі реактора вищих гармонік, кратних трьом. Силова частина системи підмагнічування виконується з двох однофазних перетворювачів невеликої потужності, розміщених на загальній рамі з живлячими трансформаторами, підключеними до відводів ОК реактора через високовольтні запобіжники. Як правило, такі КШР працюють паралельно з БСК та можуть на вимогу замовника мати загальну систему автоматичного керування (САУ) реактором і секційною конденсаторною батареєю.

Реактори 220 і 330 кВ потужністю 63-180 МВА (як і КШР 110 кВ з потужністю понад 50 МВА) виконуються з трьома обмотками - мережева (МО), компенсаційна (КО) і обмотка керування (ОК), кожна з яких виконує свою функцію відповідно споживання реактивної потужності, компенсації (замикання в «трикутнику») основних вищих гармонік і керування (підмагнічування стрижнів магнітопроводу). У комплект поставки входять два однако-

вих трифазних трансформатора з тиристорним перетворювачем (ТМП), з яких основний підключається через вимикач 10 кВ до виводів компенсаційної обмотки реактора, а резервний - до розподільних пристроїв підстанції напругою 6 або 10 кВ.

КШР напругою 500 кВ і вище, що встановлюються на шини або лінії транзитних електричних мереж СВН, мають підвищені вимоги по швидкодії — час повного набору або скидання потужності за час не більше 0,3 сек. Тобто не більше ніж за 15 періодів змінного струму (при частоті 50 Гц). Тому, при однаковій схемі і тому ж складі обмоток електромагнітної частини, до складу системи підмагнічування входить додатковий третій ТМП, що має збільшену максимальну випрямлену напруга. Цей ТМП підключається до зовнішнього живлення 6 або 10 кВ, забезпечуючи форсовані режими набору або скидання потужності, а також попереднє підмагнічування реактора при включенні. Крім того, виконання електромагнітної частини цих реакторів може бути як трифазним, так і однофазним для зменшення транспортних габаритів і маси.

Слід зауважити, що застарілі модифікації КШР всіх зазначених вище класів напруги тепер заводом не випускаються. Перші реактори напругою 110 кВ мали електромагнітну частину з трьох однофазних магнітопроводів в загальному баку і підмагнічування без резервування від відокремленого трифазного ТМП із зовнішнім живленням. В сучасних КШР типу РТУ-25000/110 (35) забезпечено самопідмагнічування з резервуванням, а магнітна система виконується трифазною, що призвело до зниження габаритів і маси.

Реактори 220...330 кВ також підмагнічувались від єдиного ТМП із зовнішнім живленням, а крім того оснащувались вбудованими струмообмежувачами дроселями (при напрузі к.з. між МО та КО близько 20%) і заземлюючими фільтрами типу ФМЗО на вивідах компенсаційної обмотки. Тепер дроселі (при напрузі к.з. більше 50%) і фільтри відсутні, а основне підмагнічування забезпечується безпосередньо від реактора з повним резервуванням ТМП [18... 22].

Перші КШР напругою 500 кВ, встановлені на ПС «Таврійська» і «Барабинская» МЕМ Сибіру, мали оригінальне двообмоткове виконання електромагнітної частини з трьох фаз Р0ДУ-60000/500 з однофазними перетворювачами в приставних баках на кожній фазі. Незважаючи на компактну конструкцію і п'ятирічний досвід експлуатації такі реактори більше не випускаються через властивих їм недоліків - відсутність резервування і низька ремонтпридатність системи підмагнічування, а також незадовільна схеми попереднього підмагнічування. Тепер всі реактори цього класу напруги, як трифазного, так і однофазного виконання, мають описану вище трьообмоткову електромагнітну частину і систему підмагнічування з трьох трифазних ТМП однакової потужності (1 МВА) і габаритів.

## 1.2 Принцип дії керованого шунтуючого реактора з підмагнічуванням

Основним призначенням керованих шунтуючих реакторів є регулювання напруги та реактивної потужності. У КШР з підмагнічуванням для плавного регулювання споживаної реактивної потужності, а значить і напруги в точці підключення, використовується насичення сталі магнітопроводу постійним потоком, створюваним випрямленим струмом в спеціальній обмотці керування. Фактично для потужного високовольтного трансформаторного пристрою використовується принцип магнітного підсилювача, коли в міру насичення стрижнів магнітопроводу знижується індуктивність розташованої на них мережевої обмотки, і також пропорційно знижується її індуктивний опір. У міру зниження або зворотного підвищення індуктивного опору мережевої обмотки реактора пропорційно зростає або зменшується її струм, а значить і споживана потужність КШР в діапазоні від холостого ходу (близько 1%) до номінальної потужності або допустимого перевантаження (100% ...120%). Таким чином, використання ділянок сталі магнітопроводу КШР у режимах від ненасиченого стану до глибокого насичення, близького до граничного, коли магнітна проникність наближається до магнітної проникності

повітря, дозволяє отримати діапазон плавного регулювання реактивної потужності з кратністю понад 100.

З великого числа пропорованих раніше схемотехнік і конструкцій підмагнічувающихся реакторів - з поздовжнім, поперечним, кільцевим підмагнічуванням, з обертовим магнітним полем і т.д., — практичне застосування отримали КШР трансформаторного типу з поздовжнім підмагнічуванням стрижнів, на яких розташовані обмотки реактора. Для того, щоб забезпечити незалежність електромагнітних процесів в обмотках МО і ОК, розташованих на одному магнітопроводі, необхідно дві умови — зустрічне включення секцій цих обмоток (тоді на виводах обмотки керування не буде змінної напруги) і створення окремих шляхів для змінного і постійного потоків, що забезпечується бронестрижневою конструкцією магнітопроводу з розщепленими стрижнями фаз.

На рисунку 1.1 приведена схема однієї фази такого реактора з бронестрижневим магнітопроводом і двома полустрижнями, на яких розташовані секції мережевої обмотки і обмотки керування, до якої в свою чергу підключене джерело постійної або випрямленої напруги для підмагнічування. Постійний потік підмагнічування, створюваний струмом ОК, замикається між центральними полустрижнями, а змінний потік — через верхні і бічні ярма магнітопроводу, складаючись в полустрижнях з постійним.

На рисунку 1.2 розрахункова осцилограма для досліджуваного реактора 110 кВ потужністю 63 МВА показаний струм мережевої обмотки в залежності від струму обмотки керування при наборі потужності від мінімальної (холостий хід) до номінальної, якій відповідають значення струмів 200 А в МО і 1,9 кА в ОК (масштаби явищ в програмному забезпеченні НРАСТ наводяться в лівому верхньому кутку кожного з виведених явищ в кА). Залежність між струмами практично лінійна.

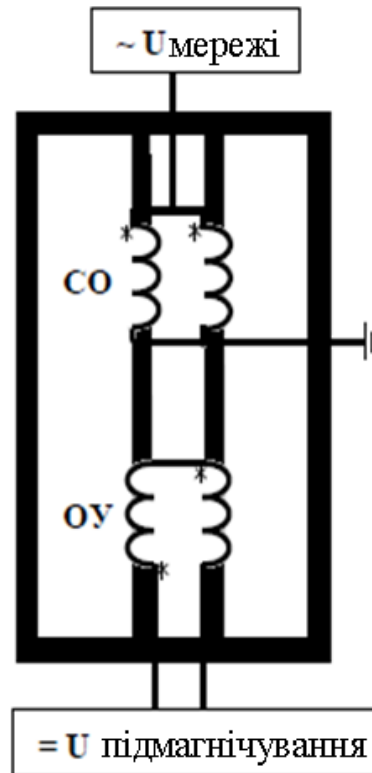
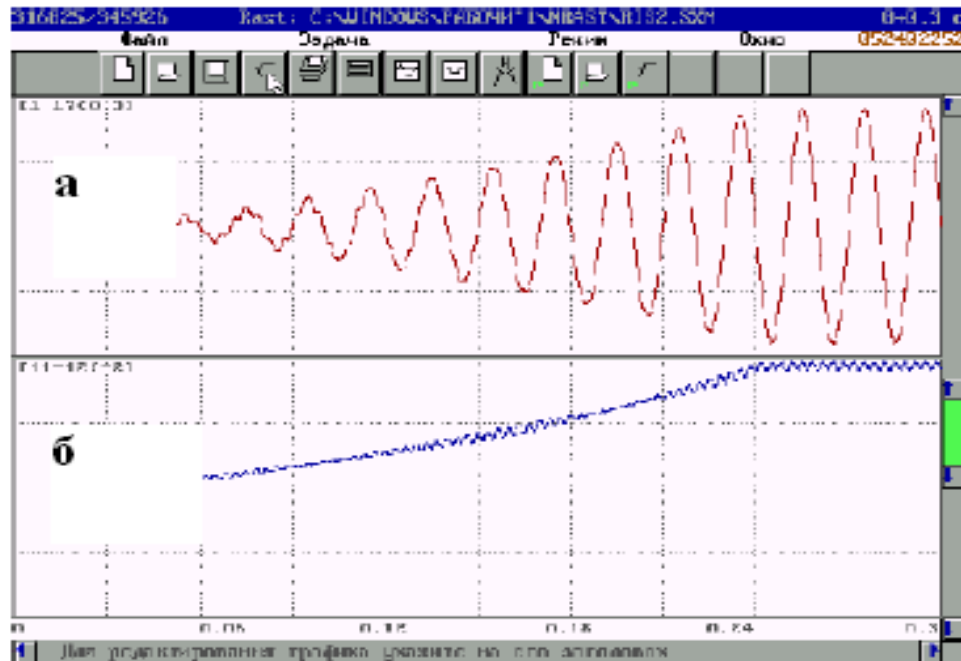


Рисунок 1.1 — Електромагнітна схема фази КШР [14]

В області мінімальних навантажень в струмі МО (СО) реактора спостерігаються спотворення 5 і 7 гармоніками, при цьому сумарний струм спотворення в самому несприятливому з навантажувальних режимів не перевищує 3,5% від номінального струму КШР, що не робить істотного впливу на синусоїдальність напруги в точці його підключення ( не більше 0,1..0,2%).

Слід зазначити, що така форма струму МО (СО) КШР забезпечується тільки за умови повної компенсації в споживаному струмі найбільш потужною третьою гармоніки і кратних їй. Для трифазних реакторів це забезпечується наявністю вторинної обмотки, з'єднаної в трикутник, в якій і замикаються, не виходячи в мережу, гармоніки, кратні трьом. Практично це реалізується в конструкціях КШР, що виробляються на теперішній час, окремої додаткової компенсаційної обмотки (КЗ) для трьообмоткових реакторів, або спеціальними схемами з'єднань вторинної обмотки керування, наприклад, в

подвійний розімкнутий трикутник для двообмоткових реакторів напругою від 35 кВ до 110 кВ.



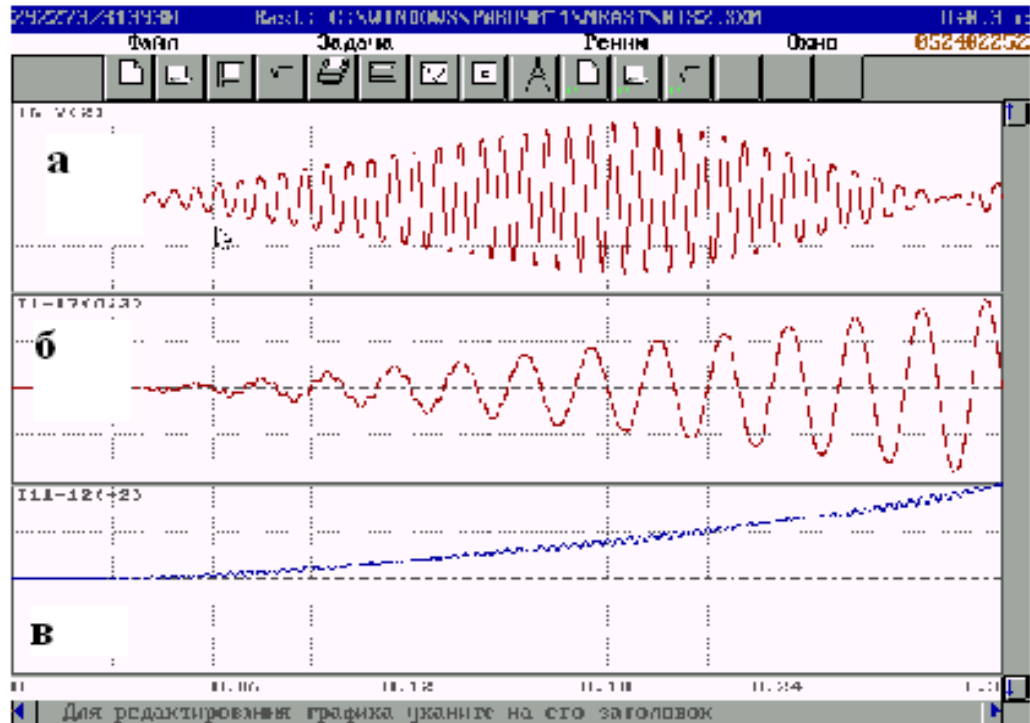
а — струм мережевої обмотки;

б — струм обмотки керування (підмагнічування)

Рисунок 1.2 — Осцилограма режиму набору потужності до номінального значення КШР 110 кВ [14]

На рисунку 1.3 наведено аналогічний рисунку 1.2 режим набору потужності до номінального значення КШР 110 кВ зі струмом в трикутнику КО на верхній осцилограмі. На відміну від силових трансформаторів, струм навантаження першої гармоніки у вторинній обмотці реактора відсутня. Переважна в трикутнику КО третя гармоніка має максимум (близько 1 кА діючого значення) в області 50% навантаження КШР, а в режимі номінального навантаження при синусоїдальній напрузі практично дорівнює нулю, як і інші вищі гармоніки в струмі МО. Це пояснюється тим, що реактори серії РТУ проектується з номінальною потужністю в так званому напівмежевому режимі насичення, коли постійний потік номінального підмагнічування по чер-

зі в кожному полустрижне магнітопроводу витісняє змінний потік рівно на час половини періода частоти мережі (рисунок 1.4).

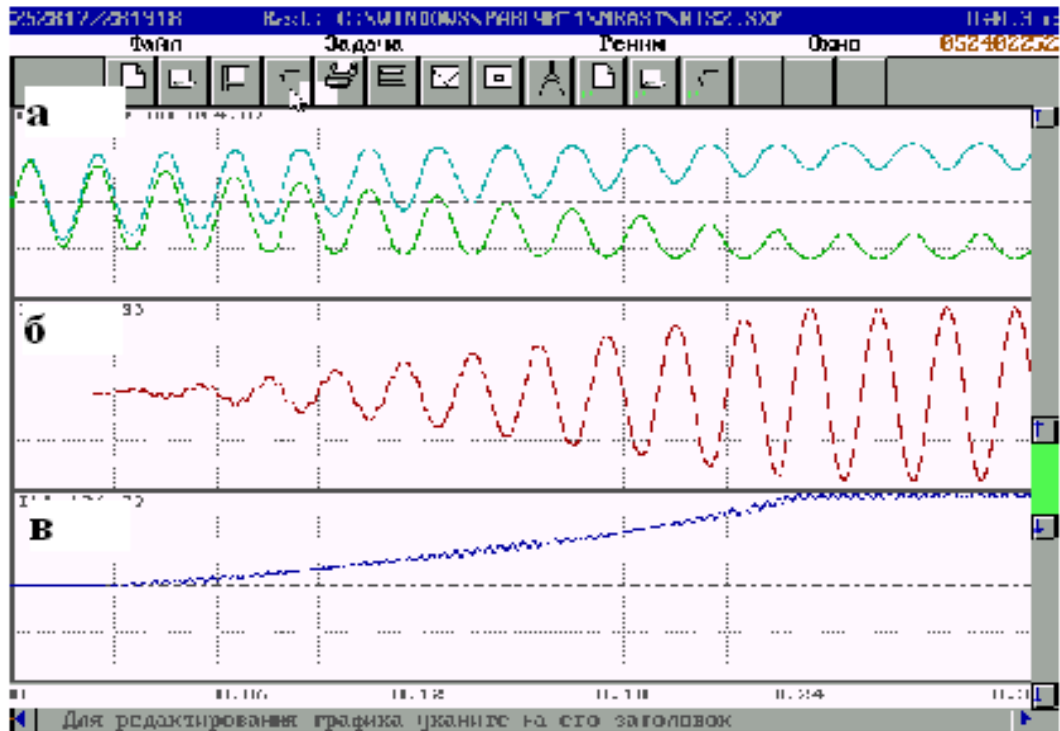


а — струм компенсаційної обмотки; б — струм мережевої обмотки;  
в — струм обмотки керування.

Рисунок 1.3 — Осцилограма режиму набору потужності КШР 110 кВ [14]

В результаті комбінації послідовності в часі полуперіодів синусоїдального струму, викликаних почерговим насиченням полустрижней, споживаний струм КШР в номінальному режимі також не містить вищих гармонік. При подальшому наборі потужності в області перевантаження (граничного насиченню магнітопроводу) в струмі КО знову з'являється третя, а в МО - інші вищі гармоніки. Осцилограми з сумарними індукціями в полустрижнях магнітопроводу наведені на рисунку 1.4, з якого видно, що в номінальному полумежевому режимі навантаження час знаходження індукції кожного по-

лустрижня за перегином характеристики насичення сталі (близько 2 Тл) становить рівно половину періоду промислової частоти мережі.



- а — індукція в полустрижнях магнітопроводу;
- б — струм мережевої обмотки; в - струм обмотки керування.

Рисунок 1.4 — Осцилограми при наборі потужності КШР 110 кВ [14]

На рисунку 1.5 наведено магнітну систему трифазного КШР з підмагнічуванням, а на рисунку 1.6 — електромагнітна схема трифазних триобмоткових КШР серії РТУ напругою 110 кВ і вище. Стрижні всіх фаз магнітопроводу розділені на два полустрижня, на кожному з яких розміщуються секції компенсаційної обмотки, з'єднаної в трикутник. Зверху секцій КО розташовуються секції обмотки керування, включені в кожній фазі послідовно-зустрічно до обмоток МО і КО (спочатку секцій обмоток відзначені зірочкою). Виводи усіх фаз ОК з'єднуються паралельно і підключаються до виводів перетворювачів ТМП. Кожна фаза мережевої обмотки виконується паралельними гілками з введенням в середину і намотується поверх вторинних

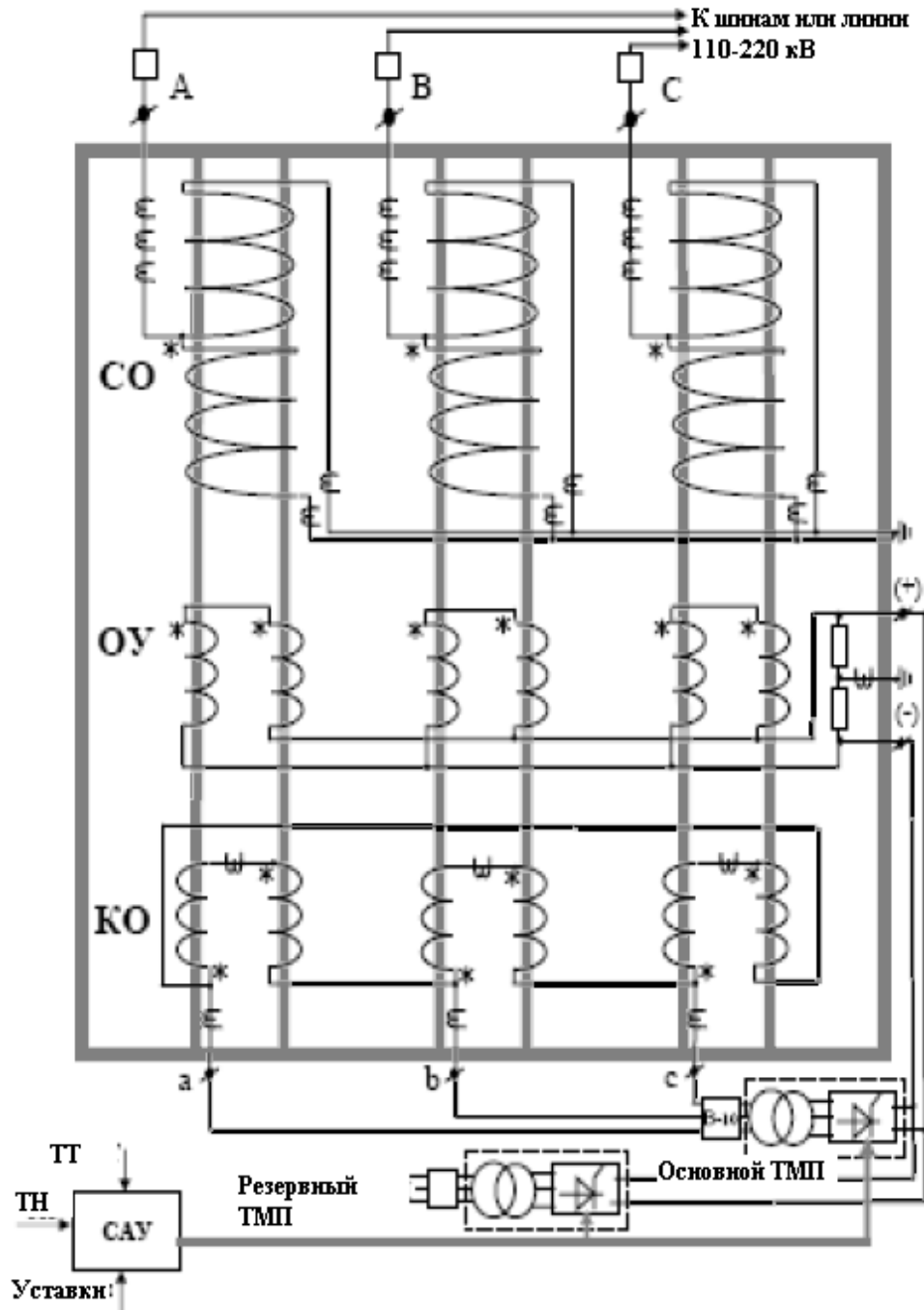
обмоток з охопленням обох полустрижней. МО з'єднується в схему «зірка з заземленою нейтраллю», підключається до шин підстанції або до лінії і забезпечує споживання реактивної потужності відповідно до заданого законом регулювання.



Рисунок 1.5 — Магнітна система трифазного КШР з підмагнічуванням [14]

Компенсаційна обмотка з номінальною напругою 10 кВ, поєднана в трикутник, виконує дві основні функції - виключення зі споживаного струму мережі гармонік, кратних трьом, і живлення основного трансформатора з перетворювачем, що забезпечує необхідний рівень підмагнічування магнітопроводу через ОК. Оскільки встановлена потужність ТМП становить 1 МВА (номінальний первинний струм менше 60 А), а споживана в сталому номінальному режимі не перевищує 300 кВА, компенсаційна обмотка розраховується на тривалий перебіг максимального струму третьої гармоніки і виконується зі зменшеним перетином (якщо на КО не передбачається інший додаткового навантаження, наприклад, при можливому підключенні конденсаторної батареї). Завдяки зустрічному включенню своїх секцій обмотка керуван-

ня має екіпотенціальні виводи (+) і (—), на яких в нормальних сталих і перехідних режимах відсутня змінна напруга від обмоток МО або КО.



САУ — система автоматичного керування;

ТМП — трансформатор з перетворювачем; МО — мережева обмотка;

КО — компенсаційна обмотка; ОК — обмотка керування.

Рисунок 1.6 — Електромагнітна схема трифазного триобмоткового КШР [14]

При закритих тиристорах основного або резервного ТМП випрямлена напруга на цих висновках ОК також відсутня, відповідно відсутній і струм підмагнічування в ОК, тому магнітна система знаходиться в ненасиченому стані, а КШР - в режимі холостого ходу, як звичайний трансформатор. У міру відкриття тиристорів і зростання випрямленої напруги наростає струм підмагнічування в секціях обмотки керування, в результаті чого відбувається насичення стрижнів магнітопроводу і зростання споживаного струму реактора. Тиристири основного ТМП (а при його профілактиці або несправності - резервного) керуються від цифрової системи автоматичного керування (САУ) за обраним алгоритмом стабілізації напруги або підтримки заданого значення споживаної реактивної потужності. Для реалізації цих алгоритмів в САУ подаються сигнали від трансформаторів напруги та струму, а також уставки регулювання, що задаються персоналом за вказівкою диспетчера енергосистеми. Після вибору режиму і завдання необхідних уставок втручання персоналу в автоматичну роботу реактора не потрібно.

1.3 Основні технічні характеристики керованого шунтуючого реактора, що досліджується

КШР характеризуються такими основними технічними характеристиками:

- діапазон плавного регулювання - понад 100% номінальної потужності;
- потужність керування - 0,5...2% номінальної потужності КШР;
- гарантована швидкість набору повної потужності - 0,15 ... 3 с. (ув залежності від виконання і вимог замовника);
- час набору повної потужності з попереднім підмагнічуванням - не більше 0,02 с .;
- питома повна маса від 1,5 до 3 кг / кВАр в залежності від виконання;
- питомі втрати:

а) холостого ходу 0,5 - 1,0 Вт / кВАр;

б) номінальні 4 - 6 Вт / кВАр;

— допустиме перевантаження по потужності - 130% (не більше 30 хв.);

— допустиме перевантаження по струму - 120% (не більше 30 хв.);

— повністю автоматичний режим експлуатації;

— рівень надійності, умови експлуатації та технічного обслугову-

вання відповідають звичайним шунтувальним реакторам.

#### 1.4 Переваги керованого шунтуючого реактора перед іншими альтернативними пристроями

Регульовальний діапазон становить понад 100% номінальної потужності КШР, при цьому забезпечується плавне регулювання з необмеженим ресурсом можливих змін. Відсутність пристроїв РПН і інших рухомих механічних частин. Можливість нормованої за часом перевантаження КШР до 130% і короткочасної перевантаження до 200%. Регулювання напруги і реактивної потужності безпосередньо в точці підключення реактора для будь-якого класу напруги мережі. Використання для регулювання малопотужних вентильних пристроїв з меншими втратами і відсутністю необхідності у водяному охолодженні. Традиційні вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу на підстанції. Більш низький рівень втрат в експлуатаційних режимах. Зовнішня установка основного силового обладнання для будь-якої кліматичної зони. Істотно нижча вартість.

#### 1.5 Технічне завдання на розробку та дослідження

##### 1.5.1 Мета розробки та дослідження

Метою розробки та дослідження є розрахунок пристрою компенсації реактивної потужності на базі керованого шунтуючого реактора, призначено-

го для включення в лінію електропередач 110 кВ з заземленою нейтраллю для регулювання і компенсації реактивної потужності лінії. До складу реактора входять електромагнітна частина, трансформатор з вбудованим напівпровідниковим перетворювачем, система керування, регулювання, захисту і автоматики. Дослідження електродинамічних параметрів щодо механічної стійкості металевої конструкції реактора.

### 1.5.2 Основні параметри пристрою компенсації реактивної потужності

Основними параметрами керованого шунтуючого реактора кліматичного виконання У категорії 1 по [34...36]. Середньорічна температура повітря не більше 20°C, середньодобова температура повітря не більше 30°C. Висота установки над рівнем моря - не більше 1000 м. Навколишнє середовище не вибухонебезпечне, що не містить струмопровідного пилу, агресивних газів і пари в концентраціях, що руйнують метали і ізоляцію. Нейтраль системи, яку встановлюється реактор, повинна бути глухо заземлена. Номінальні параметри даного реактора приведені в таблиці 1.2

### 1.5.3 Технічні вимоги

1) Перевищення температури елементів електромагнітної частини над температурою навколишнього середовища:

- обмотки (виміряні по опору) — не більше 65 °С;
- найбільш нагрітої точки обмотки — не більше 78 °С;
- масла у верхніх шарах (виміряний термометром) 60 °С;
- бака (виміряний ультрачервоні термометром) — не більше 70 °С;
- поверхня магнітної системи і металоконструкції — не більше 80 °С.

Таблиця 1.2 - Номінальні параметри керованого шунтуючого реактора

Параметр	Значення параметра
Напруга, кВ: — мережева обмотка; — компенсаційна обмотка; — обмотка керування;	110 11 23,3
Частота, Гц	50
Потужність, кВАр: — холостого ходу; — номінальна; — максимально допустима;	1000 63000 75000
Струм, А: — СО (МО) — КО — ОК — дроселя	300 380 450 380
Повна маса УКРМ, кг	150000
Тип системи охолодження	Д

2) Ізоляція реактора повинна витримувати в умовах експлуатації короткочасні підвищення напруги частотою 50 Гц і їх кількість відповідно до ГОСТ 1516.3-96.

3) Корегований рівень звукової потужності в сталому номінальному режимі при номінальній напрузі на відстані 2 м від реактора при включених вентиляторах, не більше 105 дБА.

4) Подвійна амплітуда вібропереміщення стінки бака в сталому номінальному режимі при номінальній напрузі і номінальній потужності мережевої обмотки, не більше, мкм:

— середнє значення 150;

— максимальне в окремих точках 180.

## 2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА

2.1 Розрахунок коефіцієнтів трансформації обмоток пристрою компенсації реактивної потужності (ПКРП)

Розрахунок параметрів реактора проводиться за методикою, що наведена в [27...33].

Коефіцієнтом трансформації (К) називається відношення напруги обмоток ПКРП на холостому ході. Електромагнітна частина даного ПКРП проектується на базі силового триобмоткового трансформатора і відповідно розрахунок коефіцієнта трансформації проводиться серед трьох обмоток МО, КО та ОК.

1) Номінальний коефіцієнт трансформації обмоток МО-КО

$$\hat{E} = \frac{U_{co}}{\sqrt{3} U_{ko}}, \quad (2.1)$$

де  $U_{mo}$  — напруга мережевої обмотки МО;

$U_{ko}$  — напруга компенсаційної обмотки КО.

$$\hat{E} = \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11,055},$$

$$\hat{E} = 6,319.$$

2) Номінальний коефіцієнт трансформації обмоток ОУ-КО

$$\hat{E} = \frac{U_{ou}}{U_{ko}}, \quad (2.2)$$

де  $U_{ou}$  — напруга обмотки керування ОУ.

$$K = \frac{23,285}{11,055} = 2,106,$$

$$K = 2,106.$$

3) Номінальний коефіцієнт трансформації обмоток МО-ОУ

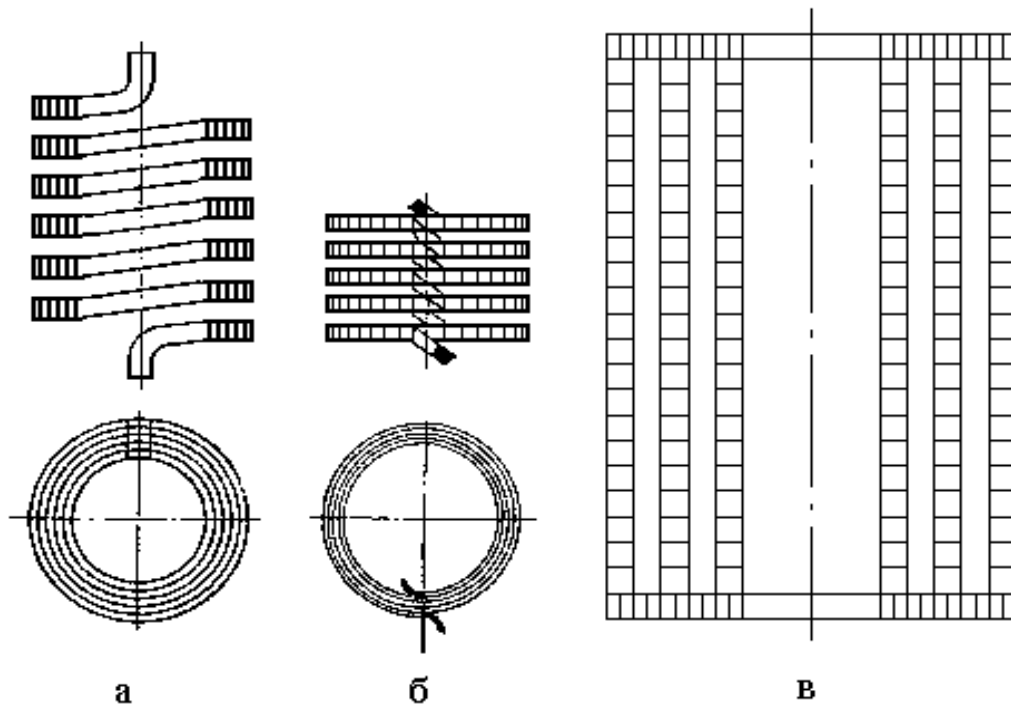
$$\hat{E} = \frac{U_{\hat{11}}}{U_{\hat{10}}}, \quad (2.3)$$

$$\hat{E} = \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 23,285},$$

$$K = 3,00019.$$

## 2.2 Розрахунок обмоток пристрою компенсації реактивної потужності

Одним з основних елементів конструкції електромагнітної частини ПКРП є обмотка. Всі обмотки масляних реакторів за характером намотування можна поділити на такі типи: циліндричні, гвинтові і котушкові. Циліндрична обмотка являє собою обмотку, перетин витка якої складається з одного або декількох паралельних проводів, а витки і всі їхні паралельні дроти розташовані в один ряд без інтервалів на циліндричній поверхні в осьовому напрямку. Застосування такої обмотки в реакторах обмежена, адже для забезпечення необхідної індуктивності реактора іноді потрібно обмотка неприпустимо великої висоти. У таких випадках обмотка намотується в кілька шарів, з'єднаних між собою послідовно та ізольованих один від одного масляним каналом, який забезпечується установкою між шарами рейок з електроізоляційного картону.



а — гвинтова обмотка; б — котушечна безперервна обмотка;  
в — циліндрична шарова обмотка.

Рисунок 2.1 — Ескізи обмоток електромагнітної частини ПКРП [27]

Гвинтова обмотка являє собою обмотку, витки якої йдуть один за іншим в осьовому напрямку по гвинтовій лінії, а перетин кожного витка утворено перетинами декількох паралельних проводів прямокутного перетину, розташованих в один ряд в радіальному напрямку обмотки.

Обмотка, що складається з ряду послідовно з'єднаних котушок, намотаних у вигляді плоских спіралей з одного або більше проводів прямокутного перетину і розташованих в осьовому напрямку обмотки, з радіальними каналами між всіма або частиною котушок називається котушковою. Якщо котушкова обмотка намотується безперервним або декількома безперервними проводами, вона називається безперервної котушковою обмоткою. Основні властивості різних типів обмоток приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Основні властивості різних типів обмоток [34, 35]

Тип обмотки	Переваги	Недоліки	Межі застосування		
			по струму I, А	по напрузі U, кВ	по перетину витка S, мм
Циліндрична багатопшарова	Проста технологія виготовлення, порівняно невелика вартість	Невелика охолоджувальна поверхня в порівнянні з обмотками, що мають радикальні канали	Від 15 до 1200	10 і 35	Від 5,04 до 400
Гвинтові	Висока механічна міцність, надійна ізоляція, гарне охолодження	Більш висока вартість у порівнянні з циліндричною обмоткою	Від 300 і вище	до 35	Від 75 і вище
Безперервна котушкова	Висока механічна і електрична міцність, гарне охолодження	Необхідність перекладки котушок під час намотування	Від 15 і вище	Від 3 до 220	Від 5,04 і вище

Принципова електрична схема з'єднання обмоток електромагнітної частини ПКРП приведена на рисунку 2.2.

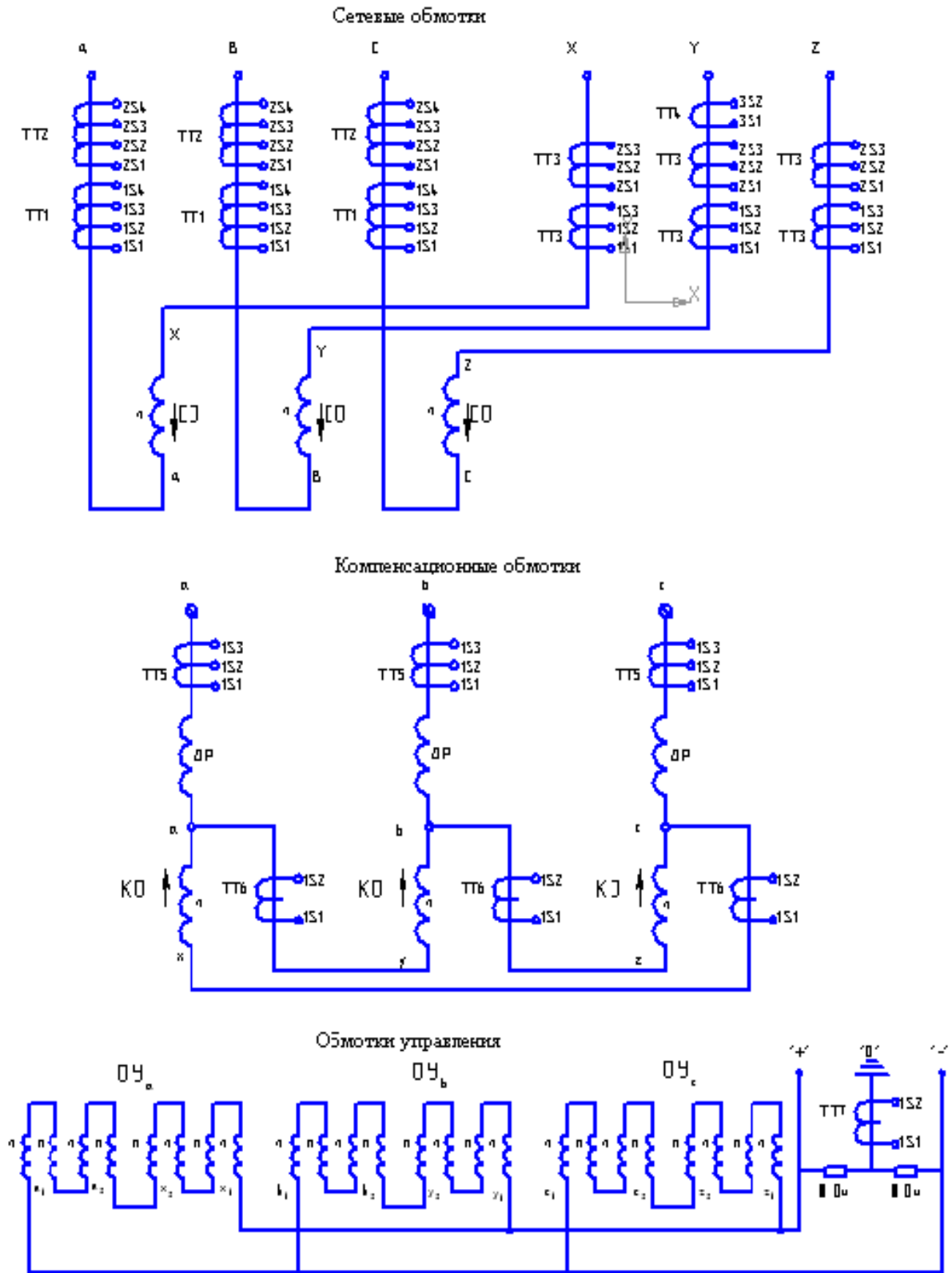


Рисунок 2.2 — Схема електрична принципова

### 2.2.1 Розрахунок мережевої обмотки

Розрахунок проводиться за методикою, рекомендованою в [27...29, 36...38]. Мережева обмотка котушкового типу, безперервна, виконана з мідного дроту прямокутного перетину з паперовою ізоляцією.

Струм мережевої обмотки розраховується за формулою

$$I_{\hat{H}} = \frac{S_1 \sqrt{3}}{3 U_1}, \quad (2.4)$$

де  $S_1$  — номінальна потужність 63000 кВАр;

$U_1$  — номінальна напруга 121 кВ.

$$I_{\hat{H}} = \frac{63000 \sqrt{3}}{3 \cdot 121},$$

$$I_{\hat{H}} = 300,6 \text{ А.}$$

Отже, визначається число витків мережевої обмотки

$$W_{\hat{H}} = \frac{U_1}{4,44 f B_s S_{\hat{H}\sigma}}, \quad (2.5)$$

де  $B_s$  — індукція в стержні 1,769 Тл;

$f$  — частота мережі 50 Гц;

$S_{\hat{H}\sigma}$  — активне перетин стрижня 0,361516 м<sup>2</sup>.

$$W_{\hat{H}} = \frac{121000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,361516 \sqrt{3}},$$

$$W_{MO} = 492,06..$$

Конструктивно приймається 492,1.

Перетин дроту обмотки орієнтовно визначається, виходячи з прийнятої щільності струму при номінальному режимі

$$S_{\text{д}} = \frac{I_{\text{до}}}{j}, \quad (2.6)$$

де  $j$  - прийнята щільність струму дроти мережевий обмотки 3,35 А / мм<sup>2</sup>.

$$S_{\text{д}} = \frac{300,6}{3,35},$$

$$S_{\text{д}} = 89,73 \text{ мм}^2.$$

Виходячи з отриманого перерізу, а також з огляду на рекомендації вибирається провід марки ПММ  $\frac{1,7 \times 9}{0,98} \times 2$ . Виходячи з прийнятої форми обмотки, попередньо задаються наступні параметри: внутрішній діаметр, зовнішній діаметр, кількість катушок, число витків в кожній катушці.

З огляду на рекомендації вибираються для вищевказаних параметрів числові значення, наведені в таблиці 2.2.

Також визначаються осьові розміри мережевої обмотки, виходячи з отриманих даних і попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.3.

Розраховується висота міді в обмотці за формулою

$$h_1 = b \cdot N_k, \quad (2.7)$$

де  $b$  — висота мідного дроту в обмотці 9 мм;

$N_k$  - кількість катушок в обмотці 66.

$$h_M = 9 \cdot 66,$$

$$h_M = 594 \text{ мм.}$$

Таблиця 2.2 — Числові значення попередніх параметрів

Параметр	Позначення	Значення
Внутрішній діаметр, мм	Двн	1604
Зовнішній діаметр, мм	Дн	1850
Число витків в котушці В	W <sub>кв</sub>	$7 \frac{34}{40}$
Число витків в котушці Г	W <sub>кг</sub>	$6 \frac{34}{40}$
Кількість котушок	N <sub>к</sub>	66

Визначається товщина ізоляції мідного дроту виходячи з формули

$$h_{3\zeta} = b_{3\zeta} \cdot N_k \cdot K_y, \quad (2.8)$$

де  $b_{3\zeta}$  — товщина ізоляції мідного дроту 0,98 мм;

$K_y$  — коефіцієнт укладання 0,7686.

$$h_{3\zeta} = 0,98 \cdot 66 \cdot 0,7686,$$

$$h_{3\zeta} = 49,71 \text{ мм.}$$

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осрової будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 6 \cdot n_i + 4 \cdot n_i, \quad (2.9)$$

де  $n_i$  - відповідно кількість охолоджуючих каналів по 6 і 4 мм.

$$h_k = 6 \cdot 33 + 4 \cdot 33,$$

$$h_k = 330 \text{ мм.}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону  $K_c = 0,93677$ .

$$\begin{aligned} h_k &= h_k \cdot K_c, & (2.10) \\ h_k &= 330 \cdot 0,93677, \\ h_k &= 309.13 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою

$$H_{\text{обм}} = h_M + h_{\text{із}} + h_k + h_{\text{е.к.}}, \quad (2.11)$$

де  $h_{\text{е.к.}}$  — висота ємнісного кільця 21,07 мм.

$$\hat{H} = 594 + 49,71 + 309,13 + 21,07,$$

$$H_{\text{обм}} = 948,37 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймається 948,4 мм.

Розраховується індуктивність мережевої обмотки перед насадкою на стрижень зі знайденими геометричними параметрами за формулою

$$L = W^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi d_{\text{ср.обм.}}^2}{4} \cdot \frac{1}{H_{\text{обм}}} \cdot K_1, \quad (2.12)$$

де  $\mu_0$  — електромагнітна проникність  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ ;

$d_{\text{ср.обм.}}$  — середній діаметр обмотки 1,727 м;

$K_1$  - коефіцієнт індуктивності і розраховується за формулою

$$K_1 = \frac{2H_{\text{обм}} - a \cdot \frac{H_{\text{обм}}}{d_{\text{ср.обм.}}}}{2H_{\text{обм}} + d_{\text{ср.обм.}} + a}, \quad (2.13)$$

де  $a$  — радіальний розмір обмотки 0,123 м.

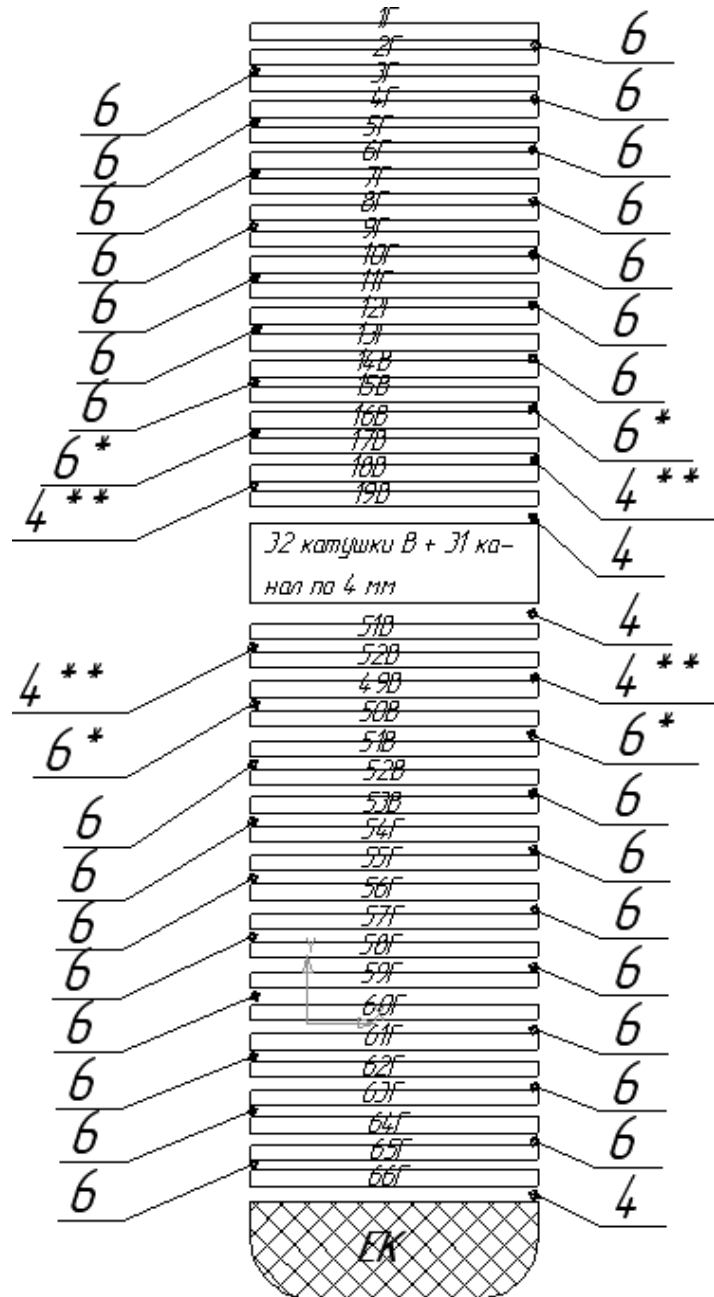


Рисунок 2.3 — Схема осьової будови мережевої обмотки

$$K_1 = \frac{2 \cdot 0,9484 - 0,123 \cdot \frac{0,9484}{1,727}}{2 \cdot 0,9484 + 1,727 + 0,123},$$

$$K_1 = 0,488.$$

$$L = 492,1^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot 1,727^2}{4} \cdot \frac{1}{0,9484} \cdot 0,488,$$

$$L = 0,384 \text{ Гн.}$$

Виходячи з розрахованої індуктивності, знаходиться реактивне опір мережевої обмотки перед насадкою на стрижень за формулою:

$$X = L \cdot 2\pi \cdot f, \quad (2.14)$$

$$X = 0,384 \cdot 2\pi \cdot 50,$$

$$X = 115,3 \text{ } \hat{h} \text{ } .$$

### 2.2.2 Розрахунок обмотки керування

Обмотка керування гвинтова чотиришарова, виконана з транспонованого мідного дроту прямокутного перетину з паперовою ізоляцією.

Визначається число витків обмотки керування

$$W_{oy} = \frac{U_{oy}}{4,44 \cdot f \cdot B_s \cdot S_{CT}}, \quad (2.15)$$

де  $B_s$  — індукція в стержні 1,769 Тл;

$U_{oy}$  — номінальна напруга обмотки керування 23285 В;

$f$  — частота мережі 50 Гц;

$S_{CT}$  — активне перетин стрижня 0,180854 м<sup>2</sup>.

$$W_{\hat{1}0} = \frac{23285}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,180854},$$

$$W_{0y} = 327,8.$$

Конструктивно приймається 328.

Отже струм обмотки керування розраховується за формулою:

$$I_{0y} = \frac{I_{co} \cdot W_{co}}{W_{0y}}, \quad (2.16)$$

$$I_{0y} = \frac{300,6 \cdot 492,1}{328} = 451 \text{ A}.$$

Виходячи з отриманих параметрів, а також з огляду на рекомендації вибирається провід марки  $\text{їÒÁ} \frac{1,18 \times 4,5}{0,72} \times 13$ . Визначаються осьові розміри обмотки керування, виходячи з отриманих даних і попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.4.

Розраховується висота міді в обмотці за формулою

$$h_M = b \cdot N_k, \quad (2.17)$$

де  $b$  — висота мідного дроту в обмотці 9,2 мм;

$N_k$  — кількість котушок в обмотці 83.

$$h_M = 9,2 \cdot 83,$$

$$h_M = 763,6 \text{ мм}.$$

Визначається товщина ізоляції мідного дроту, виходячи з формули

$$h_{из} = b_{из} \cdot N_k \cdot K_y, \quad (2.18)$$

де  $b_{из}$  — товщина ізоляції мідного дроту 0,96 мм;

$K_y$  — коефіцієнт укладання 0,82.

$$\begin{aligned} h_{из} &= 0,96 \cdot 83 \cdot 0,82, \\ h_{из} &= 65,26 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осьової будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 3,2 \cdot n_1 + 1,6 \cdot n_2 + 14,4 \cdot n_3, \quad (2.19)$$

де  $n_i$  — відповідно кількість охолоджуючих каналів по 3,2; 1,6; 14,4 мм.

$$\begin{aligned} h_k &= 3,2 \cdot 35 + 1,6 \cdot 46 + 14,4 \cdot 1, \\ h_k &= 200 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону  $K_c = 0,955$  обм

$$\begin{aligned} h_k &= h_k \cdot K_c, \\ h_k &= 330 \cdot 0,955, \\ h_k &= 191 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою:

$$\begin{aligned} H_{обм.} &= h_M + h_{из} + h_k, \\ H_{обм.} &= 763,6 + 65,26 + 191, \\ H_{обм.} &= 1006,23 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Конструктивно приймається 1006,2 мм.

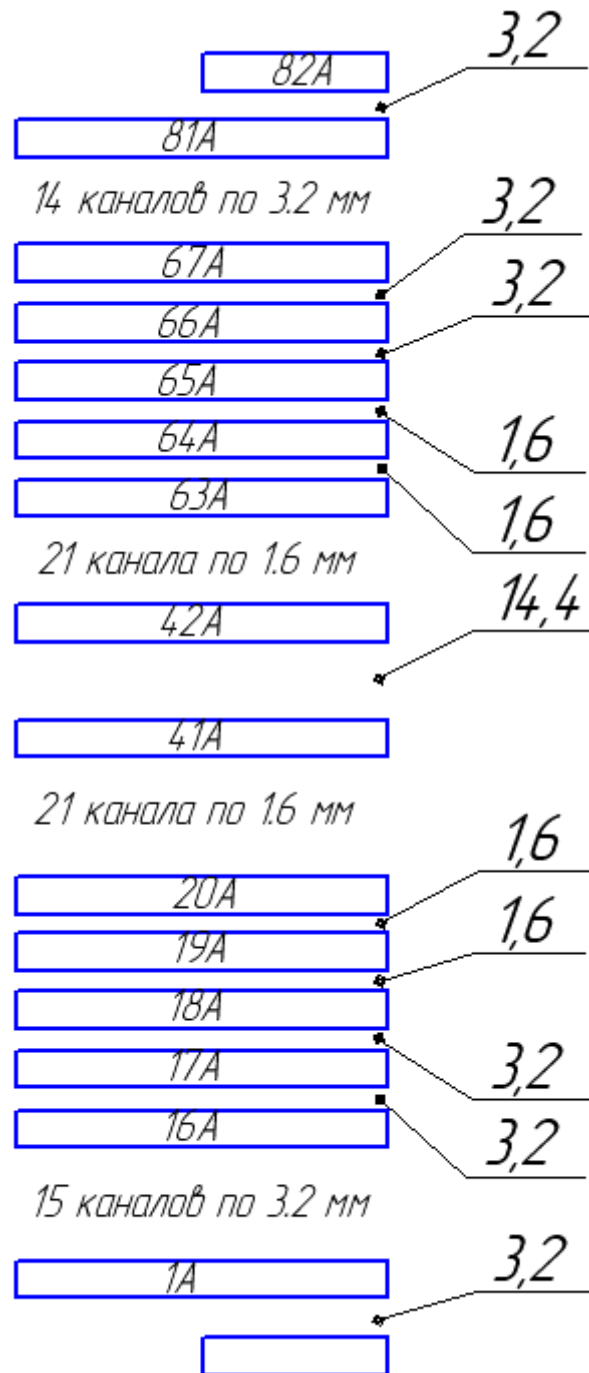


Рисунок 2.4 — Схема осьової будови обмотки керування

### 2.2.3 Розрахунок компенсаційної обмотки

Компенсаційна обмотка гвинтова, виконана з транспонованого мідного дроту прямокутного перетину з паперовою ізоляцією.

В наслідок того, що тип компенсаційної обмотки обраний ідентичний з обмоткою керування, розрахунок проводимо аналогічно до попередньої обмотки.

Розраховується струм компенсаційної обмотки

$$I_{\text{ко}} = I_{\text{мо}} \cdot K_{\text{Т}} \cdot K_{\text{Н}}, \quad (2.22)$$

де  $K_{\text{Н}}$  — коефіцієнт навантаження 0,2;

$K_{\text{Т}}$  — коефіцієнт трансформації мережевий і компенсаційної обмоток 6,319.

$$\begin{aligned} I_{\text{ко}} &= 300,6 \cdot 6,319 \cdot 0,2, \\ I_{\text{ко}} &= 380 \text{ А.} \end{aligned}$$

Число витків визначається за формулою:

$$W_{\text{ко}} = \frac{U_{\text{ко}} \cdot}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{с}} \cdot S_{\text{ст}}}, \quad (2.23)$$

де  $B_{\text{с}}$  — індукція в стержні 1,769 Тл;

$U_{\text{ко}}$  — номінальну напругу компенсаційної обмотки 11055 В;

$f$  — частота мережі 50 Гц;

$S_{\text{ст}}$  — активне перетин стрижня 0,361516 м<sup>2</sup>.

$$W_{\text{ко}} = \frac{11055}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,769 \cdot 0,361516},$$

$$W_{\text{KO}} = 77,87.$$

Конструктивно приймається 78.

Виходячи з отриманих параметрів, а також з огляду на рекомендації вибираємо провід марки  $\text{ЮА} \frac{1,25 \times 4,5}{0,72} \times 17$ . Визначаються осьові розміри обмотки керування попередньої осьової схеми будови обмотки, яка представлена на рисунку 2.5.

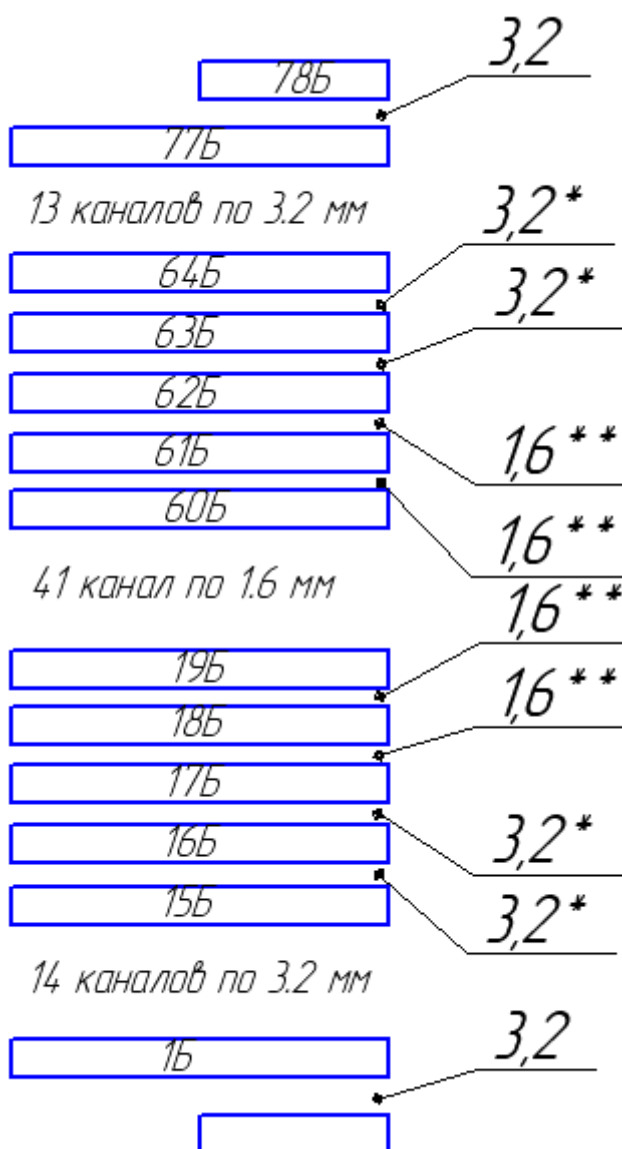


Рисунок 2.5 — Схема осьової будови компенсаційної обмотки

Розраховується висота міді в обмотці за формулою

$$h_M = b \cdot N_k, \quad (2.24)$$

де  $b$  - висота мідного дроту в обмотці 9,2 мм;

$N_k$  - кількість катушок в обмотці 79.

$$h_M = 9,2 \cdot 79,$$

$$h_M = 726,8 \text{ мм.}$$

Визначаємо товщину ізоляції мідного дроту виходячи з формули:

$$h_{iz} = b_{iz} \cdot N_k \cdot K_y, \quad (2.25)$$

де  $b_{iz}$  — товщина ізоляції мідного дроту 0,96 мм;

$K_y$  — коефіцієнт укладання 0,82.

$$h_{iz} = 0,96 \cdot 79 \cdot 0,82,$$

$$h_{iz} = 62,86 \text{ мм.}$$

Значення сумарної висоти всіх охолоджуючих каналів визначається з осьового будови обраної конструктивної форми обмотки

$$h_k = 3,2 \cdot n_i + 1,6 \cdot n_i, \quad (2.26)$$

де  $n_i$  — відповідно кількість охолоджуючих каналів по 3,2 і 1,6 мм.

$$h_k = 3,2 \cdot 33 + 1,6 \cdot 45,$$

$$h_k = 177,6 \text{ мм.}$$

Висота каналів з урахуванням коефіцієнта укладання картону  
 $K_c = 0,955$

$$h_k = h_k \cdot K_c, \quad (2.27)$$

$$h_k = 177,6 \cdot 0,955,$$

$$h_k = 169,9 \text{ мм.}$$

Геометрична висота обмотки визначається за формулою:

$$H_{\text{обм.}} = h_M + h_{\text{из}} + h_k, \quad (2.28)$$

$$H_{\text{обм.}} = 726,8 + 62,86 + 169,9,$$

$$H_{\text{обм.}} = 945,88 \text{ мм.}$$

Конструктивно приймається 946 мм.

### 2.3 Розрахунок магнітопроводу

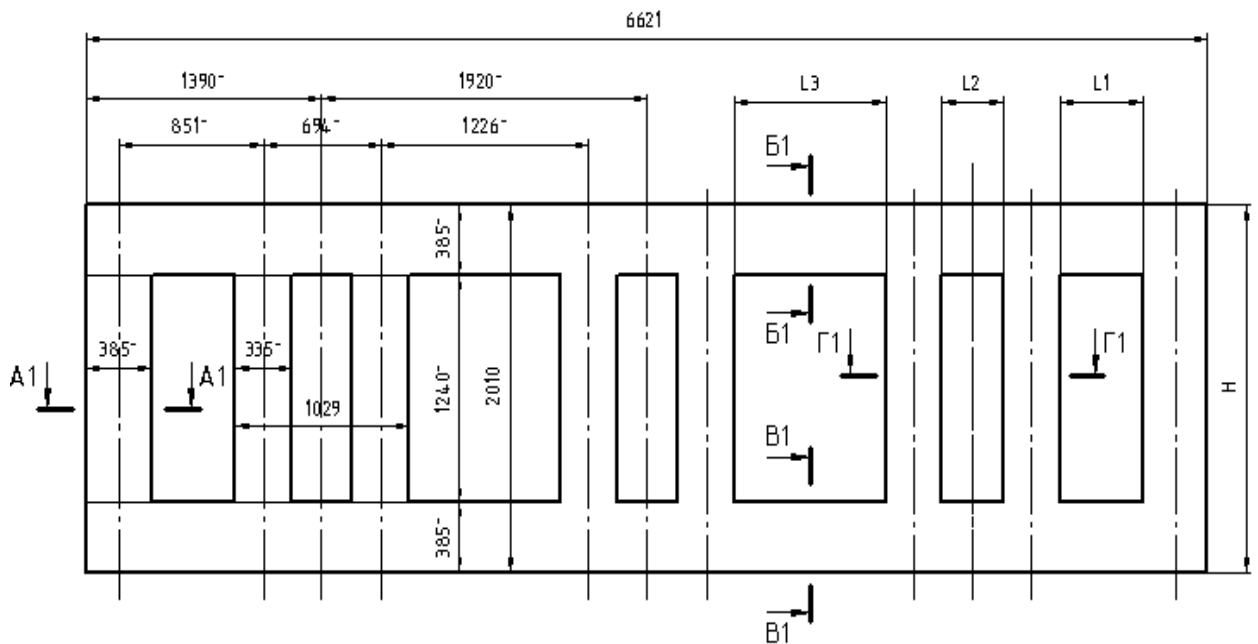


Рисунок 2.6 — Схема міжосьової відстані по центральному пакету магнітопроводу ПКРП

Магнітопровід бронестрижневого типу, зібраний з листів холоднокатаної електротехнічної сталі з жаростійким ізоляційним покриттям.

Розрахунок проводиться для магнітопроводів, конструкція якого дана на рисунку 2.7 і рисунку 2.8.

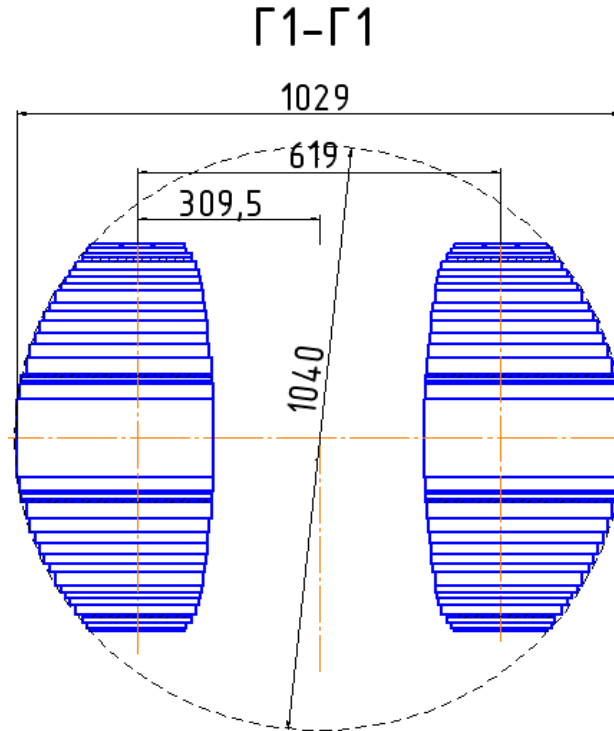


Рисунок 2.7 — Конструкція стрижня ПКРП

Перетин магнітопроводу визначається за формулою

$$S_M = \frac{E_{1\text{НОМ}} / W_{\text{СО}}}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{СТ}} \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.29)$$

де  $E_{1\text{НОМ}}$  — номінальна первинна напруга 121000 В;

$B_{\text{СТ}}$  — індукція сталі магнітопроводу 1,7 Тл.

$$S_M = \frac{121000/492,1}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,7 \cdot \sqrt{3}},$$

$$S_M = 0,3619 \text{ м}^2.$$

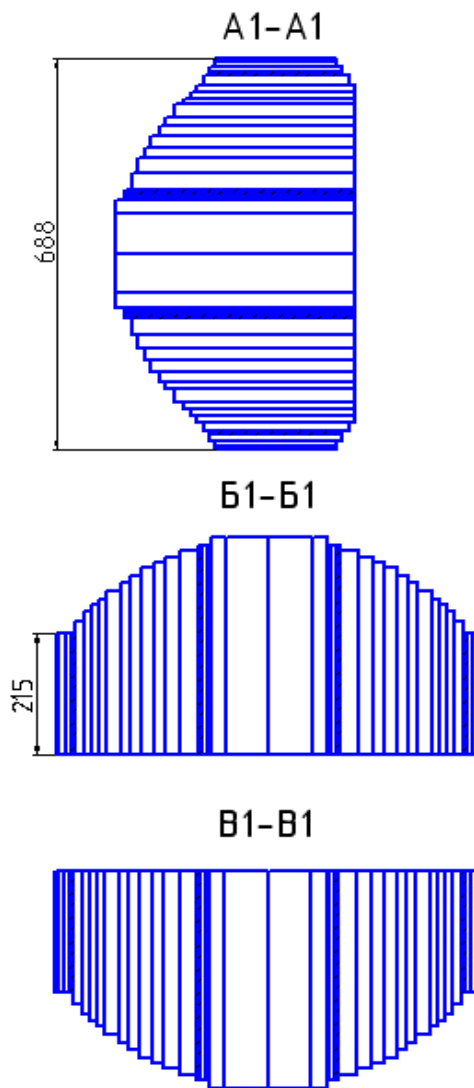


Рисунок 2.8 — Конструкція верхнього, нижнього і бокових ярів ПКРП

Перетин ярма з урахуванням коефіцієнта заповнення

$$S_{\text{яр}} = 1,05 \cdot K_z \cdot S_M, \quad (2.30)$$

$$S_{\text{яр}} = 1,05 \cdot 0,96 \cdot 0,3619,$$

$$S_{\text{яр}} = 0,3648 \text{ м}^2.$$

Матеріал магнітопроводу — сталь 3408, товщиною 0,3 мм ... 0,35 мм.

Розміри пакетів - ширина пластин «а» і товщина пакетів «в» для магнітної системи з пресування стрижнів обмотки вибираються по [42...45].

Площа перетину пакета стержня визначається за формулою

$$S_i = a_{ni} \cdot b_{ni}, \quad (2.31)$$

де  $a_{ni}$  — ширина  $i$ -го пакета, м;

$b_{ni}$  — товщина  $i$ -го пакета, м;

$i$  — номер пакета 1 ... 17.

Площа перетину стрижня магнітопроводу

$$S_{CT} = 2 \sum_{i=1}^{17} S_i \quad (2.32)$$

$$S_{CT} = 2 \cdot (335 \cdot 70 + 330 \cdot 25 + 325 \cdot 13 + 315 \cdot 29 + 305 \cdot 25 + 295 \cdot 19 + 285 \cdot 21 + 275 \cdot 17 + 265 \cdot 14 + 250 \cdot 24 + 240 \cdot 11 + 230 \cdot 12 + 205 \cdot 16 + 185 \cdot 9 + 170 \cdot 10 + 50 \cdot 3,5) \cdot 10^{-6},$$

$$S_{CT} = 0,3765 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт заповнення сталлю згідно [5] приймаємо рівним  $K_3 = 0,96$ .  
З урахуванням коефіцієнта заповнення площа активного перетину стрижня визначається за формулою

$$S_{CT.a} = S_{CT} \cdot K_3, \quad (2.33)$$

$$S_{CT.a} = 0,3765 \cdot 0,96,$$

$$S_{CT.a} = 0,3615 \text{ м}^2.$$

Розраховується індукція в стрижні за формулою

$$B_{CT} = \frac{E_{1HHO}}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot W_{CO} \cdot S_{CT} \cdot f}, \quad (2.34)$$

$$B_{CT} = \frac{121000}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 492,1 \cdot 0,361516 \cdot 50},$$

$$B_{CT} = 1,769 \text{ ТЛ.}$$

### **3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КЕРОВАНОВОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ШУНТУЮЧОГО РЕАКТОРА**

Для дослідження, моделювання та розробки імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтируючого реакторалект КШР 110 кВ в якості основного конструктивного виконання був обраний варіант з двома обмотками - мережевий і обмоткою управління. Конструктивні особливості КШР 110 кВ, які представлені на рисунку 3.1.

На схемі представлено наступне обладнання, що входить до складу КШР серії РТУ-63000/110-УХЛ1:

- РТДУ – електромагнітна частина реактора типу РТДУ-63000/110 з вбудованими трансформаторами струму (ТТ);
- ПП – напівпровідниковий трифазний перетворювач ППМ-200/750;
- САУ – система автоматичного керування (управління) реактора;
- ОМ - трансформатор перетворювача типу ОМ-200/22 / 0,22;
- ТМО – трансформатор початкового підмагнічування ТМО-2,5 / 0,4 / 0,012;
- запобіжник типу ПКТ 101-10-31,5-12,5;
- УЗП – пристрій захисту від перенапруг;
- ДПТ – датчик постійного струму;
- ДПН – датчик постійної напруги.

Конструкція електромагнітної частини КШР такого виконання досить складна, тому що вона трифазна, і, крім того, схема з'єднання, наприклад, мережевий обмотки, повинна враховувати можливість протікання по ній постійного струму в перехідних режимах і виключати його попадання в мережу, що створює деякі проблеми для релейного захисту КШР.



— забезпечує живлення трансформаторно-перетворювальних блоків безпосередніх від обмотки управління за рахунок їх підключення до виводів змінної напруги ОУ;

— забезпечує поєднання в одній вторинній обмотці функцій компенсаційної обмотки і обмотки управління, що дозволяє не тільки зменшити число обмоток, але й знизити витрату активних матеріалів.

Устаткування, яке входить до складу РТУ-63000/110-УХЛ1 перераховано нижче:

— електромагнітна частина, що складається з магнітопровода бронестрижневого типу з шістьма полустрижнями (по два на фазу). Конструкція фази такого реактора показана на рисунку 3.2. Тут показана крайня ліва з трьох фаз трифазного магнітопроводу, а окрема компенсаційна обмотка відсутня. Магнітна система фази складається з двох полустрижней (1), верхнього (2) і нижнього (3) горизонтальних ярем і двох бічних ярем (4). На кожному полустрижні розташовуються секції обмотки управління ОУ і мережеві обмотки СО. На відміну від КШР 220-500 кВ, мережева обмотка в КШР 110 кВ має дві секції, кожна з яких розміщена на своєму полустрижні;

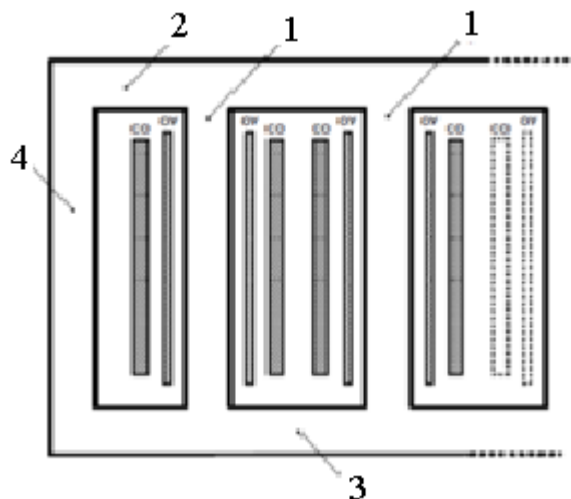


Рисунок 3.2 — Розріз магнітної системи фази КШР 63 МВА 110 кВ [49]

— два однофазних трансформаторно-перетворювальних блоки типу ОМ-200/22 / 0.22, які підключаються через запобіжники до виводів змінної

напруги обмотки управління і забезпечують регулювання споживаної реактором реактивної потужності в повному діапазоні;

— два трансформатора початкового (попереднього) підмагнічування типу ТМО-2,5 / 0.4 / 0.012, які підключаються до трифазної мережі 380 В. Дані трансформатори мають зв'язок по стороні низької напруги з однофазними перетворювачами типу ППМ-200/750 і необхідні для забезпечення початкового підмагнічування реактора перед його включенням;

— цифрова система автоматичного керування, в якій реалізовані алгоритми керування потужністю реактора. Між виводами «+» / «-» обмотки управління всередині бака реактора встановлюються два резистора, точка з'єднання яких заземлюється. Резистор необхідний на випадок обриву з'єднання між обмоткою управління і полюса перетворювача для забезпечення «гасіння» запасеної в обмотці керування енергії.

В роботі КШР використовується інформація, одержувана з датчиків постійного струму і напруги (ДПТ і ДПН відповідно). На основі цієї інформації відбувається настройка обмеження випрямленої струму перетворювачів в різних режимах роботи КШР, а так само необхідні обмеження в разі перевантаження перетворювача і трансформатора.

На сьогоднішній день в енергосистемах України експлуатуються понад 30 одиниць КШР 110 кВ описаної вище конструкції. Практика їх експлуатації, а також натурні випробування, проведені за участю автора дисертації, показали, що одним з найбільш істотних недоліків КШР 110 кВ є низький час набору і скидання повної потужності реактора, яке становить близько 4 сек (для КШР 500 кВ – 0,3 сек).

У роботах багатьох авторів показані режими роботи електричної мережі, надійне здійснення яких важко при застосуванні КШР з позначеним швидкодією. У зазначеній роботах проведено аналіз процесів в реакторі, що обмежує можливість збільшення швидкодії КШР 110 кВ, а також запропонований спосіб, що дозволяє значно знизити час набору і скидання потужності без конструктивних доработок реактора.

Істотним режимним обмеженням для підстанцій з одностороннім живленням є неможливість одночасного включення лінії, підстанції і керованого реактора 110 кВ в мережу без його попереднього підмагнічування, що пов'язано з можливістю появи на виводах перетворювача небезпечної перенапруги. У даному розділі магістерської роботи проведено дослідження роботи реактора в зазначеному режимі і доведена можливість його експлуатації без визначеного обмеження.

### 3.1 Розробка імітаційної моделі керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора

На даний час в Україні та за кордоном існує безліч різних програм для розрахунку електромагнітних перехідних процесів (ЕМПП) в схемах різної складності. До основних програм таких розрахунків можна віднести MathLab з можливістю моделювання в середовищі Simulink і програмний комплекс ЕМТР/АТР, які в ряді західних країн вважаються основними інструментами для розрахунку перехідних процесів. Розрахунки ЕМПП в обраному сучасному програмному комплексі ґрунтуються на імітаційному моделюванні магнітосвязанной ланцюга, який є-ється методом математичного моделювання, при якому запис і рішення системи рівнянь, що описують електромагнітну систему, здійснюється з використанням стандартних елементів (блоків). Застосування методу імітаційного моделювання дозволяє розраховувати перехідні процеси в магнітосвязанних електричних ланцюгах з урахуванням реальної конфігурації електричної і магнітної систем моделіруемого пристрою. Він видається більш простим і наочним порівняно з методами, заснованими на чисельному розв'язанні систем рівнянь, що описують перехідні процеси в електромагнітній системі. Застосування імітаційного моделювання виключає необхідність запису системи рівнянь великої розмірності для розрахункових перехідних процесів в розгалужених магнітосвязанних електричних ланцюгах. Як приклад розробленої моделі КШР, заснованої на чисельному рішен-

ні системи рівнянь, що описують перехідні процеси в електромагнітній системі можна привести роботу [45...48]. Крім відмінності методів і підходів до створення моделі КШР в даній роботі і в зазначеній роботі, варто відзначити суттєві відмінності конструкцій модельованих реакторів, а також відмінності вирішуваних завдань. Відзначимо, що реактор, модель якого запропонована в роботі [45...48], знятий з виробництва, а поставка його на електромережеві об'єкти обмежена двома одиницями.

Через те, що керований підмагнічуванням реактор є складним електротехнічним пристроєм, який характеризується нелінійними властивостями електротехнічної сталі, то облік всіх фізичних явищ, підходячих в магнітній системі реактора, неминуче призведе до погіршення чисельного розрахунку моделі, а це викличе неприпустимо велику тривалість обчислень. Дуже важливо на початковому етапі створення моделі визначити ряд основних допущень, які з одного боку приведуть до зниження часу розрахунку, а з іншого - не приведуть до спотворення результатів розрахунку.

### 3.1.1 Головні припущення

Основні припущення, прийняті при моделюванні керованого ректора такі:

- ярма магнітопровода, які служать для замикання магнітного потоку обмоток і як наслідок запобігання його виходу за межі муздраттеатру, що не насичуються, у всіх розглянутих режимах їх магнітна проникність нескінченна ( $\mu = 0$ ). Практика виготовлення КШР показує, що конструкцією реактора передбачено застосування приставних до бічних ярем шунтів, спроектованих таким чином, щоб навіть подвійний номінальний магнітний потік не приводив до насичення ярем;
- магнітна індукція у всіх точках стрижня до його насичення однакова, тобто весь стрижень насичується одночасно;

— пласкі поверхні широких ненасичених ярем прилягають до торців стрижнів і концентричних рівномірних рівновисоких обмоток. Це припущення, дозволяє звести польову задачу до розрахунку кола [59];

— обмотки є тонкими, таким чином при розрахунку обмоток і потокозчеплення враховується одна і та сама площа, охоплена еквівалентним середнім витком обмотки;

— не враховуються втрати в сталі від вихрових струмів і явище гістерезиса;

— не враховується модель перетворювального блоку, який в попередніх моделях замінюється регульованим джерелом постійної напруги. Дане припущення не позначається на результатах моделювання, проте значно знижує час розрахунку;

— довжина шляху потоків розсіювання обмоток приймається рівною висоті вікна магнітної системи автотрансформатора (довжині стрижня).

### 3.1.2 Конструкція фази КШР

Повне описання особливостей конструкції керованого підмагнічування реактора КШР 110 кВ було викладено раніше, але має сенс детальніше зупинитися на розгляді тих моментів, які грають принципову роль при створенні комп'ютерної моделі.

Магнітна система однієї фази керованого реактора (рисунок 3.3) являє собою бронестрижневу конструкцію з двома магнітними стрижнями, розташованими в центрі, на яких в свою чергу розташовані три обмотки - компенсаційна, управління і мережева обмотка.

Два центральних стрижня пов'язані між собою центральними ярмами, які виконані потовщеними і при роботі КШР не наситились, що призводить до поліпшення гармонійного складу струмів мережевої обмотки. Також є два бічних ярма, через які може замикатися магнітний потік, утворений змінним струмом мережевої обмотки.

Мережева обмотка (СО) має тільки одну частину, що охоплює обидва стрижня, що дозволяє обійтися без складних з'єднань, скорочує витрату матеріалів і спрощує конструкцію. В трифазного групі однофазних реакторів СО різних фаз з'єднуються в зірку з заземлюється нейтраллю.

Обмотка управління (ОУ) має дві частини, кожна з яких охоплює один зі стрижнів. Дві частини ОУ включені зустрічно, щоб магнитодвижущая сила (МРС), що утворена струмом, що протікає по ним, була спрямована в різні боки.

Компенсаційна обмотка (КО) має дві частини, кожна з котрих охоплюється одним зі стрижнів. Дві частини КО включені назустріч. В трифазній групі однофазних реакторів КО різних фаз з'єднуються в трикутник.

На підставі описаних вище особливостей конструкції КШР, а також зроблених припущень (п.3.1.1) створена схема заміщення магнітної системи однієї фази КШР 110 кВ (рисунок 3.5).

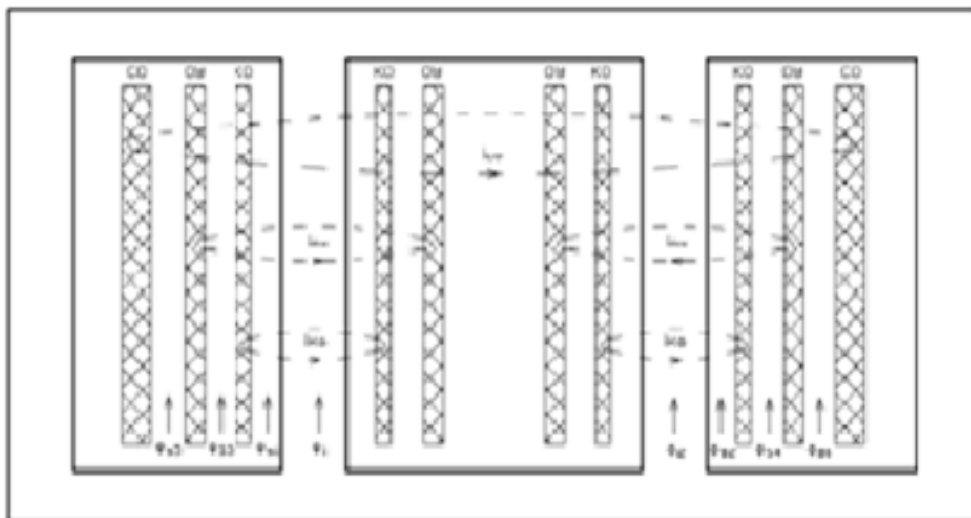


Рисунок 3.3 — Магнитная система одной фази КШР [40...43]

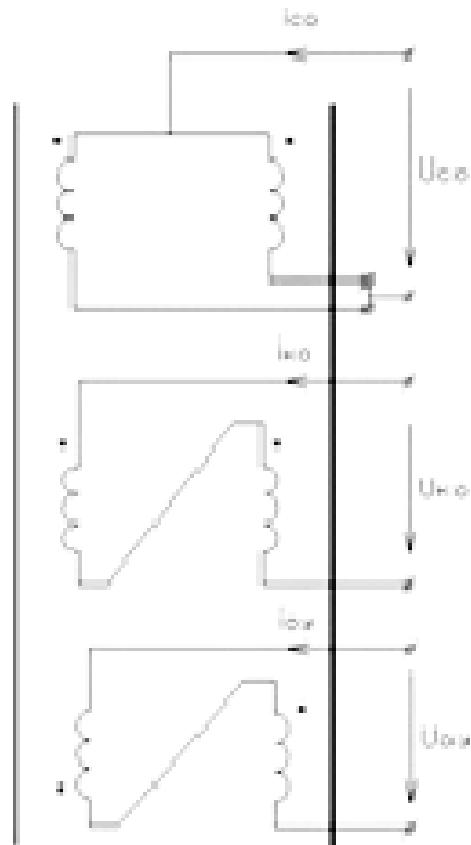


Рисунок 3.4 — Електрична схема з'єднань обмоток однієї фази реактора

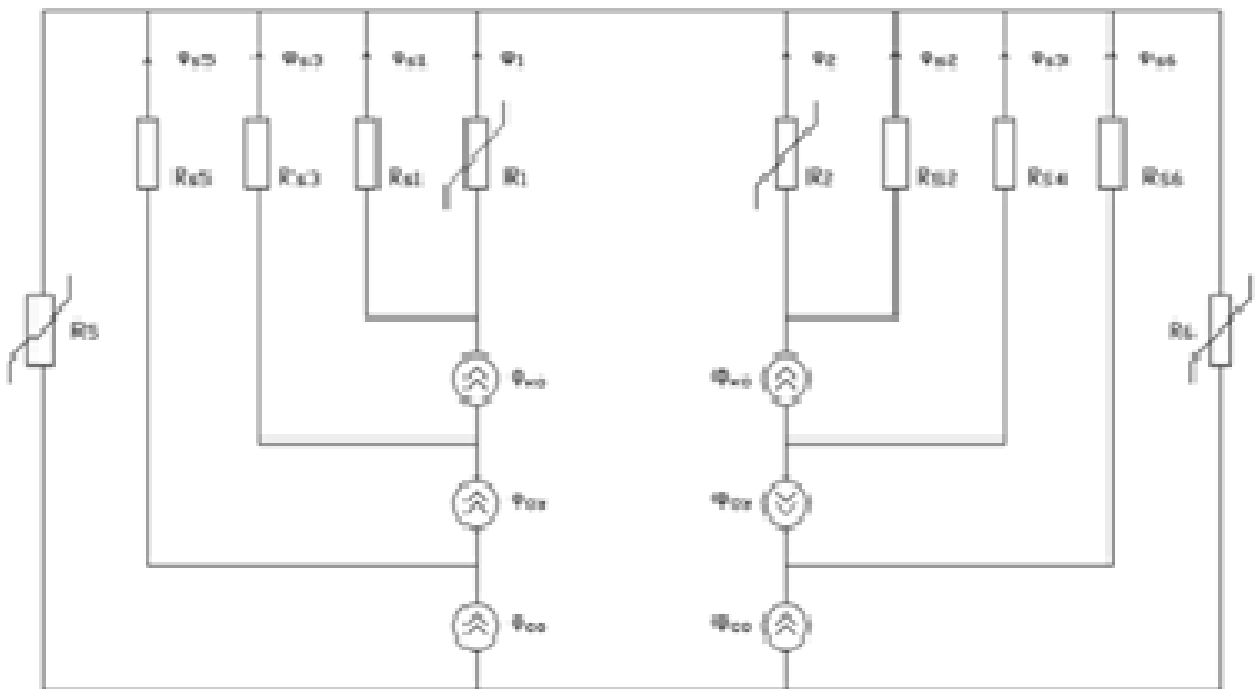


Рисунок 3.5 — Схема заміщення магнітного кола однієї фази КШР 110 кВ

### 3.2 Розробка моделі КШР в середовищі Simulink (Matlab)

Графічне середовище Simulink є однією з найбільш широко вико-мих імітаційних середовищ моделювання на сьогоднішній день, що дозволяють за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні, нелінійні і ін. системи. Як безперечну перевагу Simulink можна відзначити відсутність необхідності видозміни системи диференціальних рівнянь при будь-якій зміні електричної схеми або схеми заміщення магнітної системи КШР, що значно спрощує створення моделей та знижує ймовірність «механічної» помилки при моделюванні. Даний факт обумовлений особливістю математичного пакета Simulink, в основу якого, закладений принцип візуального програмування з використанням блок-діаграм у вигляді направлених графів [60-61].

Основний бібліотекою Simulink, яка використовується при створенні моделей електротехнічних пристроїв, є SimPowerSystem (SPS) [62]. Дана бібліотека має великий набір елементів, проте в ній відсутні елементи, що дозволяють наочно моделювати магнітосвязанние ланцюга [63].

Розглянемо найпростішу нерозгалужене замкнене магнітне коло, що повністю складається з феромагнітних матеріалів, на яке намотана обмотка з числом витків  $W$  (рисунок 3.6, а). Прикладене до обмотки змінне ЕРС ( $E$ ) викликає протікання струму  $I$  в обмотці с числом витків  $W$ , яке, в свою чергу, створює магнітний потік  $\Phi$ , яким циркулює в осерді. Таким чином, найпростішу нерозгалужене магнітне коло можна представити у вигляді двох схем заміщення - електричної (рисунок 3.6, б) і магнітної (рисунок 3.6, в).

Електрична схема заміщення даного кола містить послідовно з'єднані джерело ЕРС, індуктивність обмотки  $L$  і опір  $R$ , який враховує активні втрати в обмотці. Тоді для електричної схеми заміщення рисунка 3.6, б можна записати диференціальне рівняння [64] (3.1)

$$E = R \cdot I + L \frac{d\psi}{d} = R_t \cdot I + W \cdot \frac{d\Phi}{d}. \quad (3.1)$$

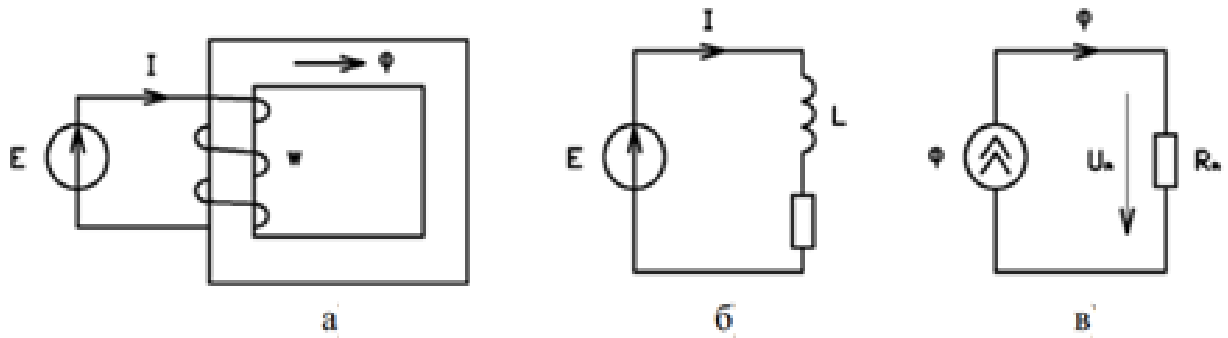


Рисунок 3.6 — Найпростіше магнітне коло та її схеми заміщення [38...42]

На підставі електричної схеми заміщення рисунку 3.6, б і рівняння (3.1) може бути визначено значення потоку  $\Phi$ , що протікає в магнітному колі:

$$\Phi = \frac{1}{W} \cdot \int (E - R \cdot I) d \quad , \quad (3.2)$$

Для схеми заміщення магнітного кола (рисунок 3.6, в), яка складається з однієї ділянки ферромагнітного матеріалу, де магнітний потік утворюється декількома обмотками з числами витків  $W$  і струмом  $I$  справедливо [65]:

$$U_m = I \cdot W = \Phi \cdot R_m \quad , \quad (3.3)$$

де  $U_m$  — магнітна напруга;

$\Phi$  — потік, що протікає магнітною системою;

$R_m$  — магнітний опір ферромагнітного матеріалу.

Основний сенс моделювання магнітопов'язаних кіл в середовищі Simulink зводиться до створення моделей електричного та магнітного кіл, які пов'язані один з одним за допомогою джерела потоку  $\Phi$ . На рисунку 3.7 представлена структурна схема розрахунку електричного та магнітного кола за допомогою джерела потоку.



На рисунку 3.8 представлена структура моделі електротехнічного блока зв'язку електричного та магнітного кіл шляхом використання джерела потоку в середовищі Simulink.

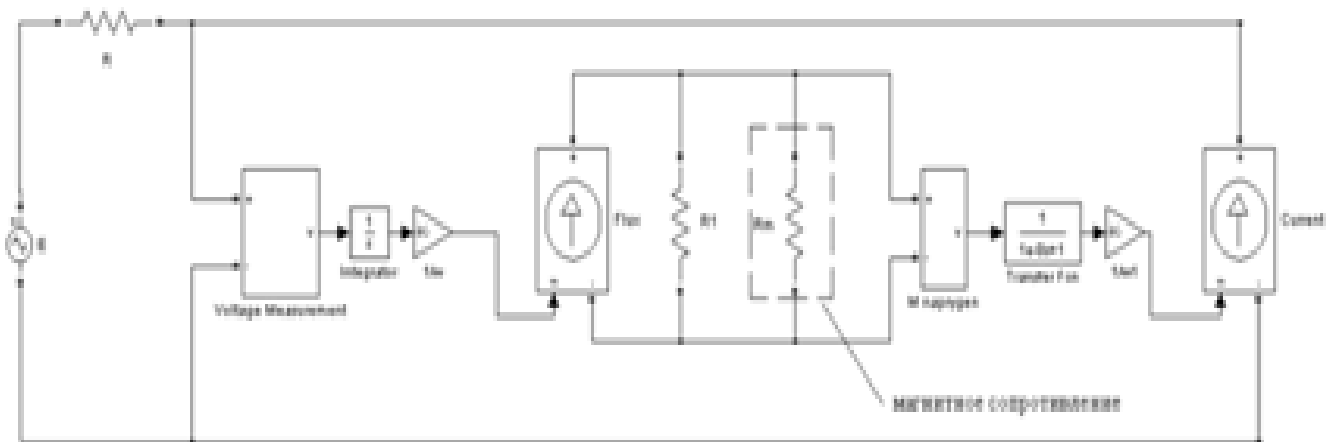


Рисунок 3.8 — Структура моделі расчета электрической и магнитной цепи посредством источника потока в среде Simulink [38...42 ]

Варто відзначити наявність в моделі додаткових елементів, таких як спів-спротиву  $R1$  і фільтра з малою сталою часу  $10^{-8}$ . Необхідність в схемі  $R1$  обумовлена тим, що при створенні моделей магнітносвязаних ланцюгів з декількома обмотками, джерела струму, які в даному випадку моделюють магнітний потік, виявляються включеними послідовно, що неприпустимо. Таким чином, ввівши в схему опір  $R1$ , значення якого в 1000 разів більше магнітного опору  $R_m$ , дозволить з'єднати послідовно необхідну кількість джерел струму (потіку).

До недоліків моделі можна віднести наявність замкненого алгебраїчного контуру, який створюється джерелом струму і блоком вимірювання магнітної напруги. Алгебраїчні контури розраховуються в Simulink за допомогою ітераційної процедури на кожному кроці розрахунку, що уповільнює загальний час розрахунку. Для виключення алгебраїчного контуру запропоновано в схему ввести фільтр з малою сталою часу. Її значення має бути таким, щоб наявність фільтра не приводило до зміни динамічних властивостей моделі.

Залежно від поставленого завдання, а також від схеми магнітної системи досліджуваного пристрою, опір  $R_m$  може представляти собою як еквівалентний валентний опір ділянки магнітного кола, так і ділянки повітряного зазору, які в більшості випадків задаються геометричними розмірами - площею поперечного перерізу  $S$  і довжиною ділянки  $L$ . Варто зазначити, що підхід до визначення еквівалентних опорів  $R_m$  для магнітного і немагнітного (повітряний зазор) ділянок відрізняються. Даний факт обумовлений тим, що характеристика феромагнітного матеріалу носить нелінійний характер і залежить від кривої намагнічування сталі  $B(H)$ , в той час як опір повітряного ділянки лінійно.

Відомо [65], що для визначення магнітного опору повітряного проміжку можна скористатися наступним виразом:

$$R_m = \frac{L_B}{\mu_0 \cdot S_B},$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнітна проникність повітря.

Тогда для схеми заміщення магнітного кола (рисунок 3.6, в) справедливе рівняння (3.4) відповідно до якого може бути знайдено падіння напруги  $U_m$  на магнітному опорі  $R_m$ .

$$U_m = \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot \frac{L_B}{\mu_0 \cdot S_B}. \quad (3.4)$$

На рисунку 3.9 наведена структурна схема лінійного магнітного участка (повітряного проміжка), котра реалізує закон Ома для магнітного кола. У представленій схемі реалізований механізм визначення падіння магнітної напруги на еквівалентному лінійному магнітному опорі, що характеризує повітряний зазор, для чого за допомогою вимірювального елемента ІЕ відбувається вимір значення магнітного потоку з послідовним перетворенням отри-

маного сигналу  $\Phi$  в блоках посилення БУ1, БУ2, БУ3 в магнітна напруга  $U_m$  відповідно с рывнянням (3.4).

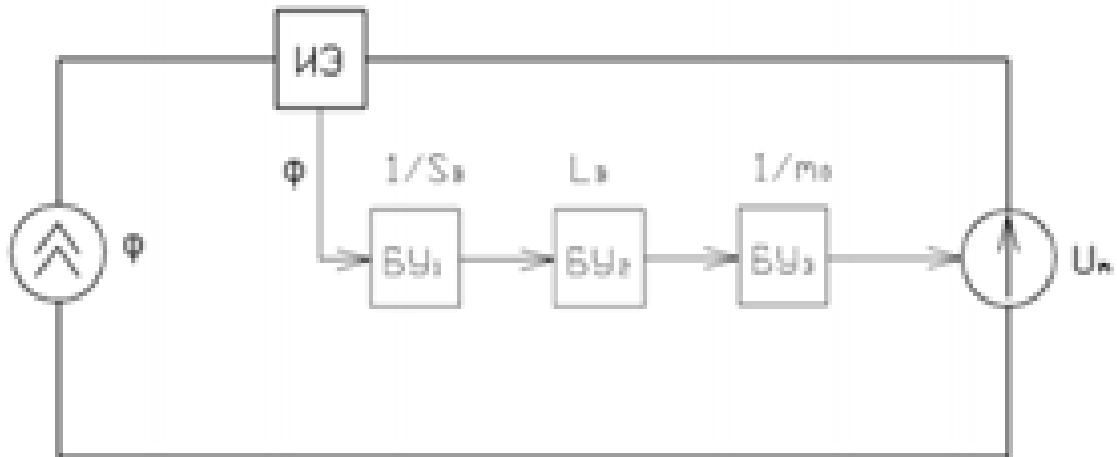


Рисунок 3.9 — Структурна схема лінійного магнітного участка

Аналогічно може бути створена модель нелінійної ділянки магнітного кола. Як було зазначено раніше, основною відмінністю моделей лінійного та нелінійного кола є необхідність урахування кривої намагнічування сталі, яка характеризується залежністю  $B(H)$ . З урахуванням цього фактора, залежність для визначення падіння магнітної напруги на нелінійному опорі  $R_m$  може бути записано таким чином:

$$U_m = \Phi R_m = H(B) \cdot L_C = H \left( \frac{\Phi}{S_c} \right) \cdot L_C, \quad (3.5)$$

Для визначення напруги  $U_m$ , наведеної на рисунку 3.10 криву намагнічування сталі 3408, представлену залежністю  $B(H)$ , необхідно переотворити в  $H(B)$  (рисунок 3.11).

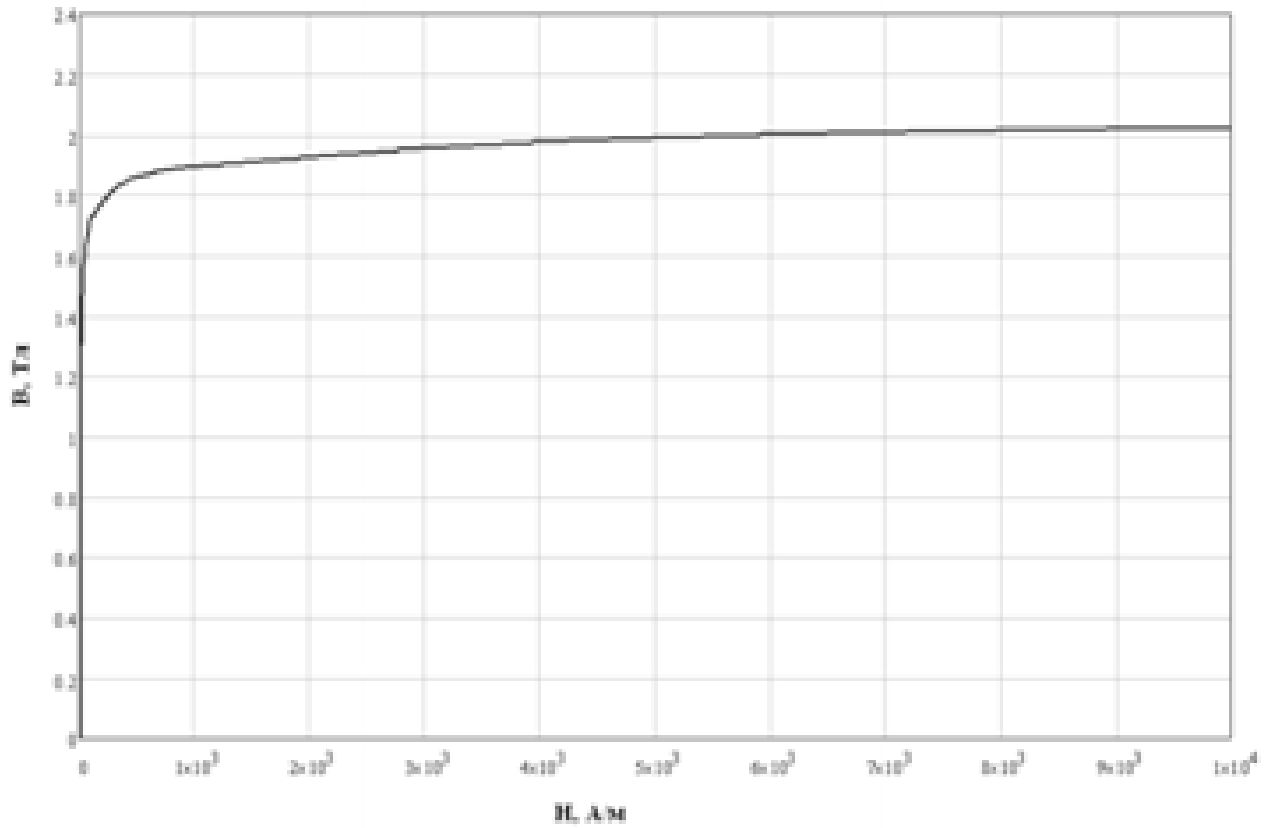


Рисунок 3.10 — Крива намагнічування сталі 3408

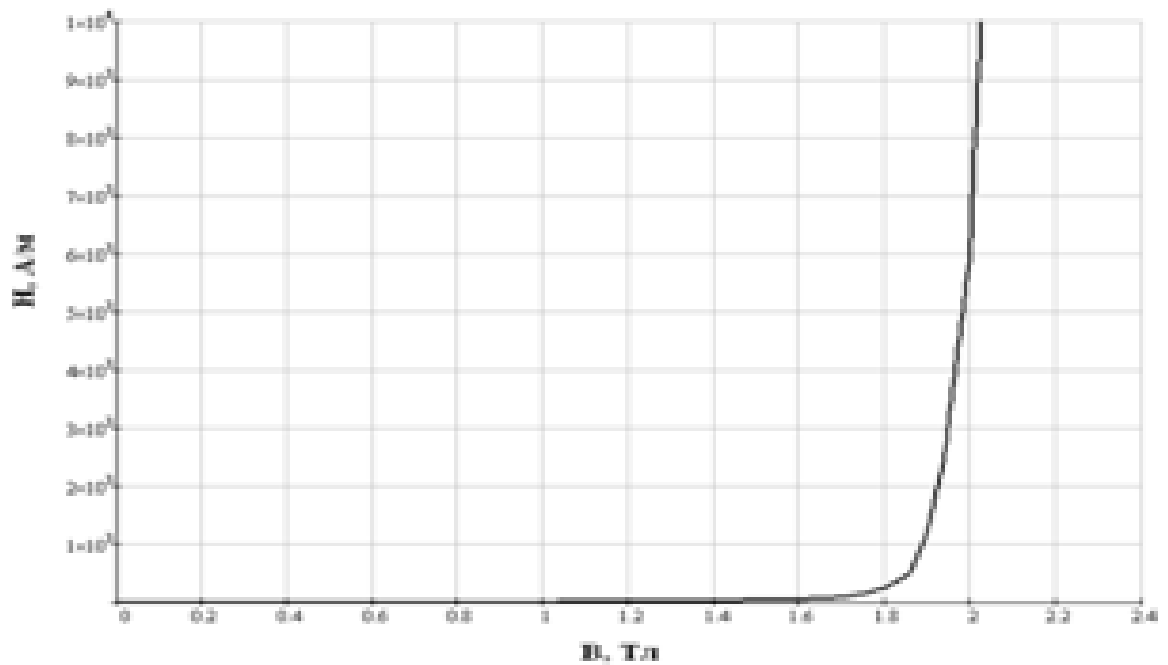


Рисунок 3.11 — Характеристика  $H(B)$  сталі 3408

З огляду на вищезазначене, структурна схема нелінійної магнітної ділянки (феромагнітного матеріалу) представлена відповідно на рисунку 3.12.

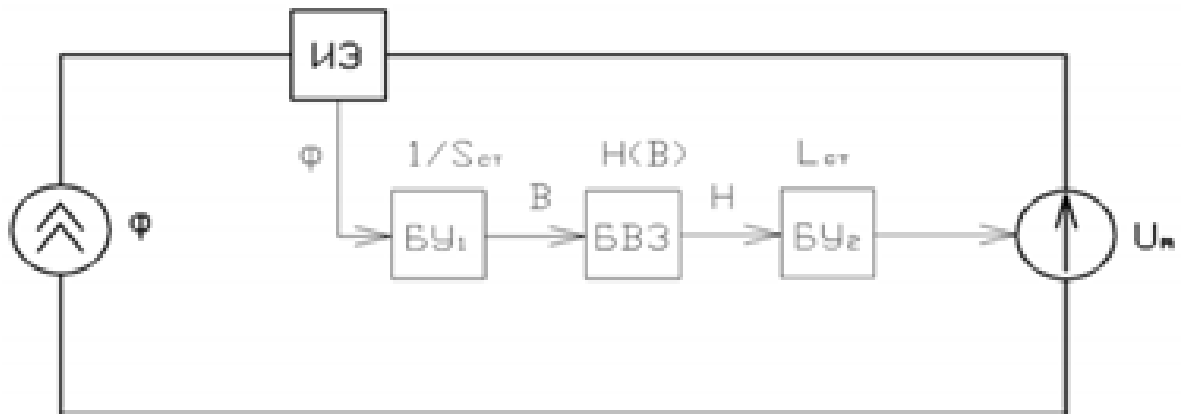


Рисунок 3.12 — Структурная схема нелинейного магнитного участка

За аналогією з описаним вище механізмом визначення магнітної напруги на еквівалентному лінійному магнітному опорі,  $U_m$  на нелінійному  $R_m$  може бути знайдено шляхом вимірювання значення магнітного потоку в вимірювальному елементі ИЭ з подальшим перетворенням отриманого сигналу  $\Phi$  в індукцію  $B$  у блоці посилення БУ1. Далі сигнал, який характеризує  $B$ , подається в блок вибору значення БВЗ, в якому відбувається вибір значення напруженості магнітного поля  $H$  відповідно до кривої  $H(B)$ , зображеної на рисунку 3.11, з подальшим її перетворенням в  $U_m$  в блоці посилення БУ2, де значення  $H$  множиться на довжину магнітного ділянки  $L_{eff}$ . Значення  $U_m$ , отримане на виході БУ2 подається на кероване джерело напруги, яке формує значення падіння напруги в магнітному колі на нелінійному опорі  $R_m$ . Блок БВЗ містить інформацію про криву  $H(B)$ , яка задається у вигляді вектора вхідних значень  $B$  і відповідного значенням вектора  $B$  вектора  $H$ .

Правила, за якими працює блок, описуються наступним чином:

— якщо вхідне значення  $B$  дорівнює одному з елементів вектора вихідних значень  $H$ , то вихідне значення блоку дорівнюватиме відповідно елементу вектора  $H$ ;

— якщо вхідне значення  $B$  не збігається з жодним з елементів вектора вхідних значень, то блок виконує лінійну інтерполяцію між двома найближчими до нього елементами;

— якщо вхідне значення  $B$  виходить за межі вектора вхідних значень, то блок виконує лінійну екстраполяцію по двох крайніх елементах.

На рисунках 3.13 та 3.14 наведені розрахункові моделі блоків лінійного та нелінійного блоків магнітних опорів відповідно.

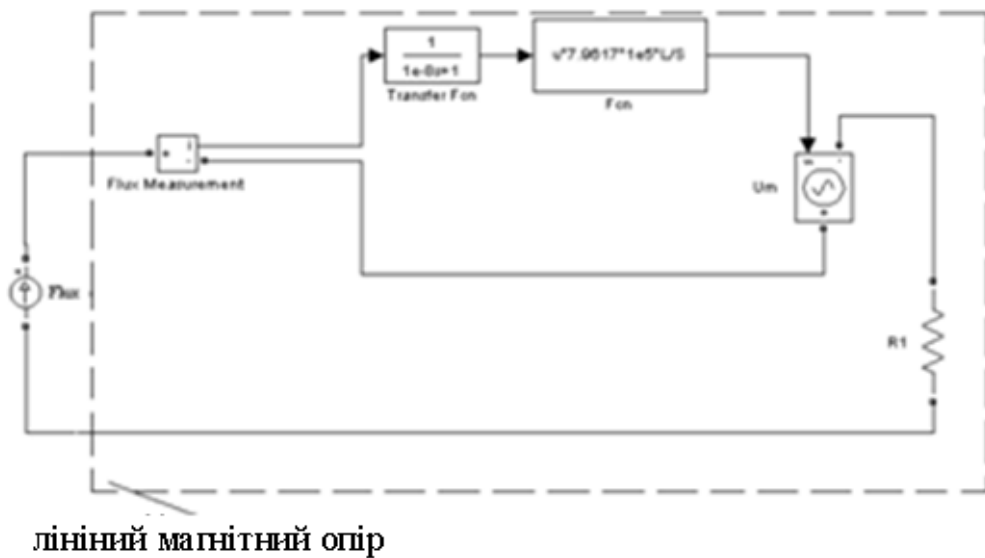


Рисунок 3.13 — Модель лінійного магнітного опору  $R_m$  в середовищі Simulink

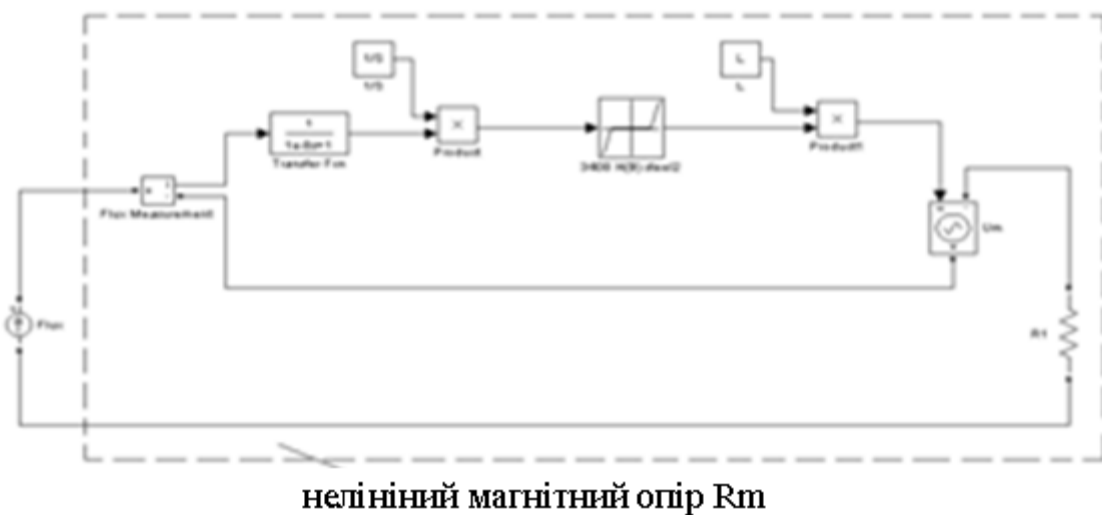


Рисунок 3.14 — Модель нелінійного магнітного опору  $R_m$  в середовищі Simulink

Використовуючи блоки лінійних і нелінійних магнітних опираючись-ний (рис.3.13 і рис.3.14), блок спільного розрахунку електричного та магнітного кола (рис.3.8), а також з огляду на схеми з'єднання обмоток і магнітної системи, можуть бути розроблені будь-які моделі електротехнічних пристроїв ( трансформа-тор, реактор, керований реактор і ін.). Розроблена імітаційна модель (ІМ) фази КШР 63000/110 показана на рис.3.15, де позначені нелінійні магнітні опори стрижнів і ярем (R1-R4), лінійні опори каналів розсіювання магнітного потоку:

- між секціями КО і стрижнем -  $R_{s1}$ - $R_{s2}$ ;
- між секціями обмоткою КО і ОУ -  $R_{s3}$ - $R_{s4}$ ;
- між обмоткою СО і ОУ -  $R_{s5}$ - $R_{s6}$ .

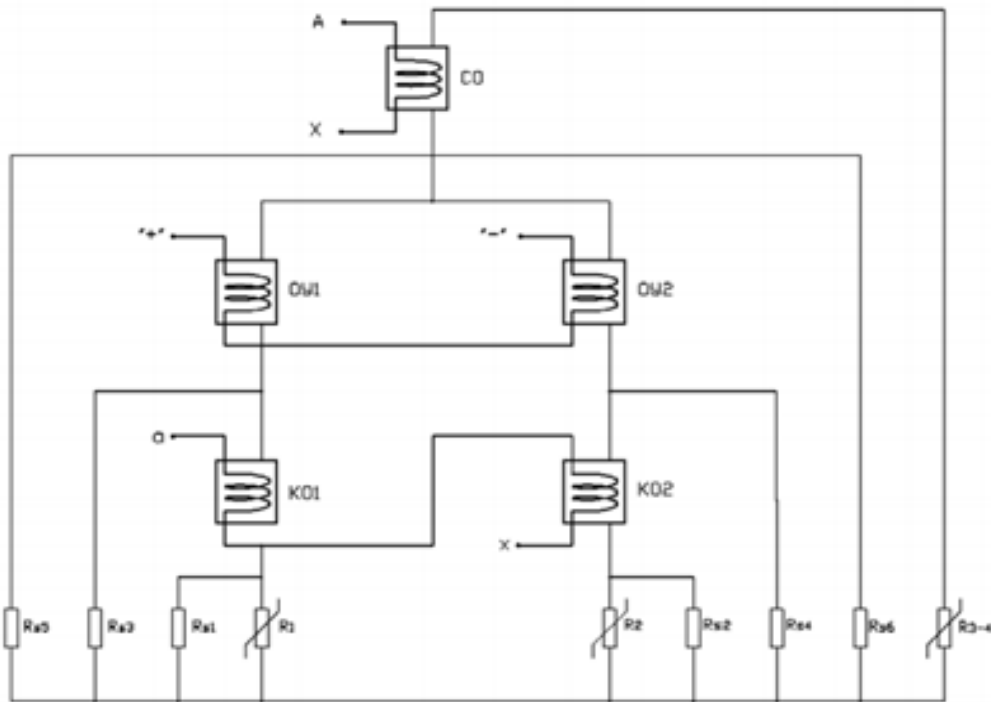


Рисунок 3.15 — Імітаційна модель фази КШР 63000/110

На рисунку 3.16 – програмна реалізація імітаційної моделів фази КШР в середовищі Simulink.

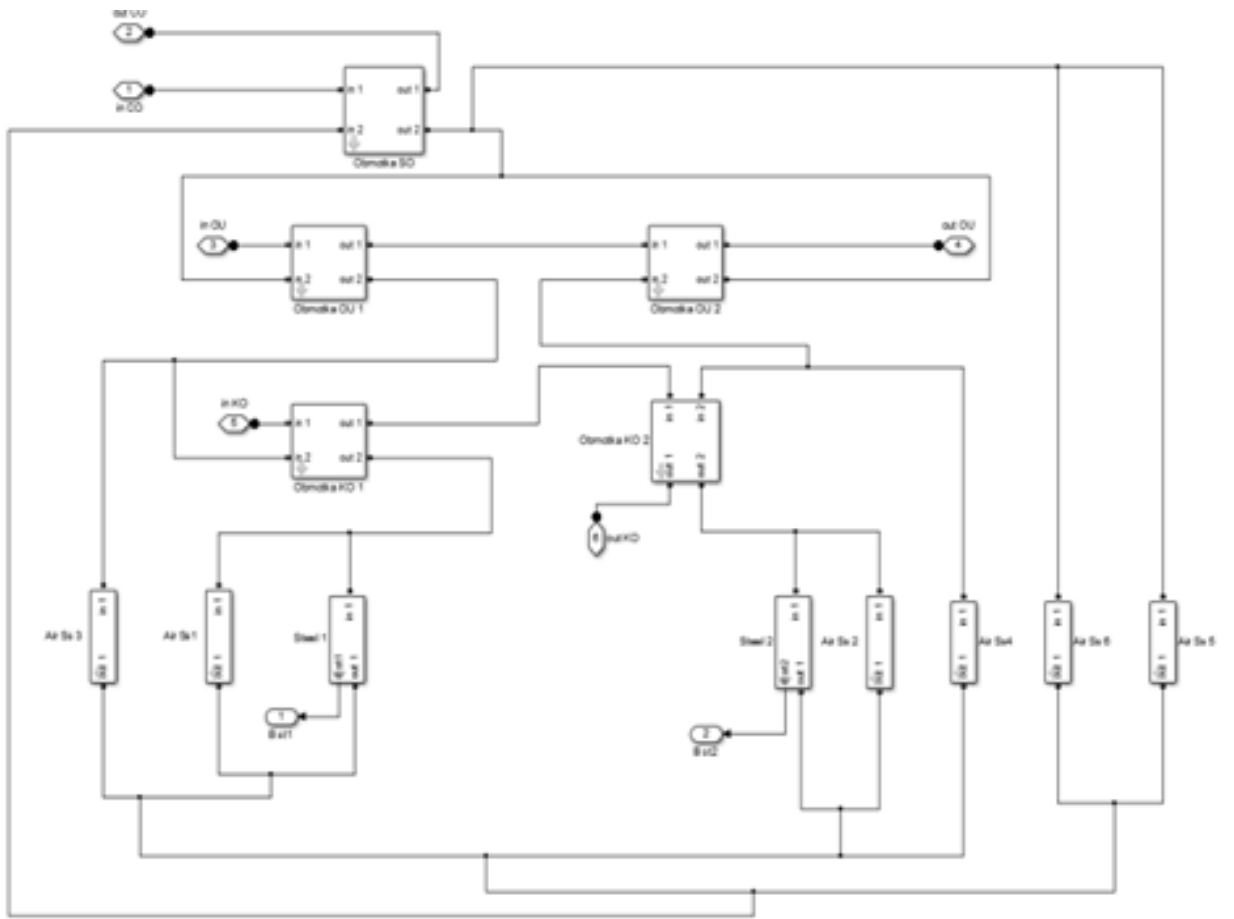


Рисунок 3.16 — Модель фази КШР 63000/110 в середовищі Simulink (Matlab)

## 4 РОЗРАХУНОК МАСИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЧАСТИНИ ПРИБОРУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 4.1 Розрахунок маси масла

Трансформаторні масла - мінеральні масла високої чистоти і низької в'язкості. Застосовуються для заливки силових і вимірювальних трансформаторів, реакторного обладнання, а також масляних вимикачів. Трансформаторні масла виконують функції дугогасильного середовища. Електроізоляційні властивості масел визначаються в основному тангенсом кута діелектричних втрат. Діелектрична міцність трансформаторних масел в основному визначається наявністю волокон і води, тому механічні домішки і вода в таких маслах повинні повністю бути відсутнім. Низька температура застигання масел (мінус 45 ° С і нижче) потрібна для збереження їх рухливості в умовах низьких температур. Для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторні мастила повинні мати найменшу в'язкість при температурі спалахнення не нижче 95, 125, 135 і 150 ° С для різних марок [28...30].

Найбільш важлива властивість трансформаторних масел - це їх стабільність проти окислення, тобто, здатність зберігати свої параметри при тривалій роботі.

Знаходиться обсяг масла в баку за формулою

$$V_{\text{м.б.}} = V_{\text{б.}} - V_{\text{а.ч.}} - V_{\text{ш.б.}}, \quad (4.1)$$

де  $V_{\text{б.}}$  — обсяг бака 45,5 м<sup>3</sup>;

$V_{\text{а.ч.}}$  — обсяг активної частини 12,53 м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ш.б.}}$  — обсяг шунтів на баку 0,36 м<sup>3</sup>.

$$V_{\text{м.б.}} = 45,5 - 12,53 - 0,36,$$

$$V_{\text{м.б.}} = 32,61 \text{ м}^3.$$

Визначається маса масла в баку

$$M_{\text{м.б.}} = V_{\text{м.б.}} \cdot \rho, \quad (4.2)$$

де  $\rho$  — питома маса масла 880,4 кг / м<sup>3</sup>.

$$M_{\text{м.б.}} = 32,61 \cdot 880,4,$$

$$M_{\text{м.б.}} = 28710 \text{ кг.}$$

Виходячи з вище порахованих формул знаходимо повну масу масла

$$M_{\text{м}} = M_{\text{мб}} + M_{\text{мрад}} + M_{\text{мрозш}} + M_{\text{мф}}, \quad (4.3)$$

де  $M_{\text{м.б.}}$  — маса масла в баку 28710 кг;

$M_{\text{м.рад}}$  — маса масла в системі охолодження 6864 кг;

$M_{\text{м.розш}}$  — маса масла в розширювачі, 1662 кг;

$M_{\text{м.ф}}$  — маса масла в фільтрах, 352;

$$M_{\text{м}} = 28710 + 6864 + 1662 + 352,$$

$$M_{\text{м}} = 37588 \text{ кг.}$$

Розрахунок резерву масла (технологічні потреби 5%)

$$M_{\text{м.р}} = (M_{\text{м}}/100) \cdot 5, \quad (4.4)$$

$$M_{\text{м.р}} = (37588/100) \cdot 5,$$

$$M_{M.p} = 1879,4 \text{ кг.}$$

#### 4.2 Розрахунок повної маси

Визначаємо масу електромагнітної частини ПКРП за формулою

$$M_p = M_{\text{б.}} + M_{\text{а.ч.}} + M_{\text{рад.}} + M_{\text{ВН}} + M_{\text{розш.}} + M_{\text{В}} + M_{\text{П}}, \quad (4.5)$$

де  $M_{\text{б}}$  — маса бака 15370 кг;

$M_{\text{а.ч.}}$  — маса активної частини 71048 кг;

$M_{\text{розш}}$  — маса розширювача 2200 кг;

$M_{\text{рад}}$  — маса радіаторів 12450 кг;

$M_{\text{Ввд}}$  — маса високовольтних ввідів 288 кг;

$M_{\text{ВН}}$  — маса ввідів нейтралі 3 кг;

$M_{\text{П}}$  — маса інших елементів електромагнітної частини ПКРП 6699 кг.

$$M_p = 15370 + 71048 + 12450 + 2200 + 288 + 3 + 6699,$$

$$M_p = 108058 \text{ кг.}$$

Виходячи з вище перерахованих формул визначаємо повну масу електромагнітної частини ПКРП за формулою

$$M_{\text{П.}} = M_p + M_{\text{М}}, \quad (4.6)$$

$$M_{\text{П.}} = 108058 + 37588,$$

$$M_{\text{П.}} = 145646 \text{ кг.}$$

## 5 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

### 5.1 Міцність жорсткість і стійкість обмотки при дії радіальних і дотичних сил

Цей розрахунок складається з визначення механічних напружень і переміщень від радіальних сил, критичних напружень радіальної стійкості, необхідної і найбільш ефективної товщини стінки жорсткого циліндра, необхідних сил осьового пресування. За результатами розрахунків виробляються перевірки міцності і жорсткості розтягваних і стискаємих обмоток, радіальної стійкості стискаємих обмоток [27...30].

#### 5.1.1 Визначення середніх напруг

Середні напруги розтягнення або стиснення від радіальних електромагнітних сил обчислюються за формулою

$$\sigma_{\tilde{n}\delta} = \frac{K_{\tilde{e}\zeta}^2 \cdot B_{\tilde{n}\delta} \cdot i_{\tilde{e}\zeta} \cdot D_j}{\sqrt{2} \cdot 10^3 b_j \cdot h_j}, \quad (5.1)$$

де  $K_{\text{кз}}$  — ударний коефіцієнт струму короткого замикання;

$B_{\text{ср}}$  — середнє (по висоті, радіальному розміру і кола) значення осьової складової індукції  $j$ -ої зони при сталому струмі КЗ, Тл;

$i_{\text{кз}}$  — струм елементарного провідника при сталому струмі КЗ обмотки, А;

$D_j$  — середній діаметр  $j$ -ої зони, мм;

$b_j$  — радіальний розмір (товщина) провідників  $j$ -ої зони, мм;

$h_j$  — осьовий розмір (висота) провідників  $j$ -ої зони, мм.

При наявності каналів тільки між обмоткою і жорстким циліндром, зовнішнім концентром вважається сама обмотка.

У цьому випадку середня напруга зовнішньої концентрації дорівнює середньому напрузі обмотки

$$\sigma_{\tilde{n}\delta} = \sigma_{\hat{a}\hat{a}} \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Перевірка міцності

Обмотка має достатню міцність, якщо для коефіцієнтів запасу міцності виконуються умови

$$K_{\zeta\hat{a}} = \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{\hat{a}\hat{a}}} \geq 1, \quad (5.3)$$

де  $\sigma_{02}$  — умовний межа плинності матеріалу провідників, МПа [27, 30].

### 5.1.3 Перевірка жорсткості

Радіальне переміщення розраховується за формулою

$$U_j = \frac{1}{2} D_j \varepsilon_{\hat{e}\hat{\delta}} \quad (5.4)$$

де  $\varepsilon_{окр}$  — кругова деформація провідників [27].

За значеннями радіальних переміщень встановлюють їх допустимість з точки зору забезпечення електричної міцності або інших конструктивних міркувань. Далі для провідників визначають максимальну гнучкість ( $\lambda_{1j}$ ), Мінімальну гнучкість ( $\lambda_{2j}$ ), Загальну гнучкість ( $\lambda_{3j}$ ) За формулами

$$\lambda_{1j} = \frac{4\sqrt{3}}{m_i k_j} \quad (5.5)$$

$$\lambda_{2j} = \frac{1}{2} \lambda_{1j} \quad (5.6)$$

$$\lambda_{3j} = \frac{\sqrt{3}}{i_{lj} k_j} \quad (5.7)$$

де  $m_i$  — число стовпців прокладок;

$i_{lj}$  — число елементарних провідників в радіальному напрямку витків або котушок  $j$ -ої зони [10];

$k_j$  — геометричний параметр гнучкості.

Наведена висота жорсткого циліндра

$$h_{\circ j} = \frac{H_{\circ}}{N_i}, \quad (5.8)$$

де  $H_{\circ}$  — висота жорсткого циліндра, мм;

$C_i$  — загальне число елементарних провідників в обмотці

$$C_i = \sum_{j=1}^N n_{j \circ j} I_{pj} I_{\circ j}, \quad (5.9)$$

де  $N$  — число зон в обмотці;

$n_j$  — число витків або катушок в  $j$ -ій зоні;

$I_{0j}$  — число проводів в осьовому напрямку витків або катушок  $j$ -ої зони.

Додаткові напруги, обумовлені наявністю жорсткого циліндра, при нижчій формі втрати стійкості і при спільній роботі провідників обчислюють за формулами

$$\sigma_{10j} = \frac{E_{\delta} h_{\delta j}}{\lambda_{1j}^2 h_j} \left( \frac{\delta_{\delta}}{k_j R_{\delta}} \right)^3, \quad (5.10)$$

$$\sigma_{30j} = \sigma_{10j} \left( \frac{\lambda_{1j}}{\lambda_{3j}} \right)^2 \frac{0.75}{i_{1j}^2}, \quad (5.11)$$

де  $E_{\delta}$  — модуль пружності жорсткого циліндра, ЄЦ = 1.0 104 МПа,

$\delta_{\delta}$  — товщина стінки жорсткого циліндра, мм;

$R_{\delta}$  — середній радіус жорсткого циліндра, мм.

Повні напруги при нижчій формі втрати стійкості і при спільній роботі провідників визначаються за формулами

$$\sigma_{1cj} = \sigma_{10j} + \sigma_{1\delta j}, \quad (5.12)$$

$$\sigma_{3cj} = \sigma_{30j} + \sigma_{3\delta j}. \quad (5.13)$$

Критичне напруження витків або катушок одно меншому, з трьох напруг: повної напруги при нижчій формі втрати стійкості; критичної напруги при вищій формі втрати стійкості; повної напруги при спільній роботі провідників [45]

$$\sigma_{\delta j} = \min \{ \sigma_{1cj}; \sigma_{20j}; \sigma_{3cj} \}. \quad (5.14)$$

Обмотка стійка, якщо для коефіцієнта запасу стійкості виконується умова

$$K_{yj} = \frac{\sigma_{\hat{e}\delta j}}{1.2\sigma_{\hat{n}\delta j}} \geq 1. \quad (5.15)$$

Необхідна товщина стінки дорівнює більшому із її значень

$$\sigma_{\delta i} = \max\{\sigma_{\delta 1j}; \sigma_{\delta 3j}\}. \quad (5.16)$$

Товщина стінки жорсткого циліндра не повинна перевищувати найбільшої ефективної товщини, яка дорівнює більшій з її значень

$$\delta_{\delta} = \max\{\delta_{\delta 1j}; \delta_{\delta 3j}\}. \quad (5.17)$$

Коефіцієнт обпирання, що залежить від жорсткості концентров, числа і жорсткості елементів, що утворюють канал між ними, для кожної зони повинен відповідати умові

$$K_{oj} = \frac{\sigma_{2oj}}{\sigma_{\hat{n}\delta j}} - \frac{4\pi \cdot 10^5 E_{prj} i_{2j} b_j}{D_j m_p B} \left( \frac{\Delta_j}{E_{uj}} + \frac{\Delta}{E_{\hat{n}\delta}} \right) \cdot \frac{i_{1j} - i_{2j}}{i_{1j}} \left( 1 + \frac{i_{1j} - i_{2j}}{i_{1j}} - \frac{\sigma_{20j}}{\sigma_{\hat{n}\delta j}} \right) \geq 1, \quad (5.18)$$

де  $E_{prj}$  — наведений модуль пружності провідників;

$i_{2j}$  — число елементарних провідників в радіальному напрямку зовнішнього концентрації  $j$ -ої зони;

$B$  — ширина прошивальних рейок, що утворюють осьовий канал, мм;

$\Delta$  — радіальний розмір прошивальних рейок, що утворюють осьовий канал, мм;

$E_{uj}$  — модуль пружності ізоляції проводів  $j$ -ої зони, МПа;

$E_{рс}$  — модуль пружності при стисканні прошивальних рейок, МПа.

#### 5.1.4 Визначення необхідної сили осьового пресування

Для стискаємих в радіальному напрямку котушкових обмоток сила осьового пресування, необхідна для забезпечення стійкості до дії радіальних сил, визначається наступним чином

$$P_{1ij} = \pi^2 \cdot 10^{-5} \frac{\sigma_{1oj} b_j h_j i_{kj} D_j I_{pj} I_{oj}}{0.3a_i}, \quad (5.19)$$

де  $a_i$  — ширина прокладок, мм.

Для розтягваних в радіальному напрямку котушкових обмоток сила осьового пресування, необхідна для забезпечення стійкості до дії радіальних сил, дорівнює нулю.

Сила осьового пресування, необхідна для забезпечення стійкості до дії дотичних сил дорівнює

$$P_{2i} = \left| \sum_{j=1}^N \frac{\sqrt{2} K_{\sigma a}^2 B_{xj} i_{\sigma i} H_j}{0.3 \cdot 10^6} \right|, \quad (5.20)$$

де  $B_{xj}$  — середнє по висоті, радіальному розміру і окружності значення радіальної складової індукції  $j$ -ої зони при сталому струмі КЗ;

$i_{кс}$  — сталий струм КЗ обмотки, А;

$H_j$  — висота зони, мм.

Необхідна сила осьового пресування ( $P_n$ ) дорівнює більшій з осьових сил, знайдених за умовами забезпечення стійкості до дії радіальних і дотич-

них сил ( $P_{1j}$ ,  $P_{2j}$ ) і граничних сил осьового пресування ( $P_{3j}$ ), які обчислюють за формулою

$$P_{3ij} = 2 \cdot 10^{-3} m_i \cdot b_{ij}, \quad (5.21)$$

де

$$b_{ij} = V_{j1j}. \quad (5.22)$$

Таким чином, необхідна сила осьового пресування обмотки дорівнює

$$P_i = \max\{P_{1ij}; P_{2i}; P_{3ij}\}. \quad (5.23)$$

Результати розрахунку наведені в додатку А «Розрахунок електродинамічної стійкості реактора», таблиця А.9

## 5.2 Міцність, жорсткість і стійкість обмоток при дії осьових сил

У розрахунку обмоток на міцність, жорсткість і стійкість при дії осьових сил визначаються осьові критичні сили вилягання провідників, найбільші напруги згибу в провідниках від осьових електромагнітних сил, осьові переміщення, зусилля напруги в обмотках, а також сили, що діють на пресуючу конструкцію. За знайденими результатами здійснюють перевірки міцності провідників при вигині, забезпечення стійкості обмоток до дії радіальних і дотичних сил, міцності при стисненні в осьовому напрямку, жорсткості і стійкості до вилягання провідників. При перевірці забезпечення сил визначають достатні сили осьового пресування [8].

### 5.2.1 Визначення осьових критичних сил полягання провідників

Розрахунок складових осьової критичної сили вилягання провідників виконується наступним чином.

Визначаються вихідні значення наведеної товщини провідника

$$b'_{1j} = b_j - 2r_j, \quad (5.24)$$

де  $r_j$  - радіус заокруглення кутів перетину провідників [10].

Розраховується осьова сила необхідна для подолання опору вилягання самих провідників

$$P_{1j} = \frac{\pi b_j h_j^2 E i_{1j}}{3D_j}, \quad (5.25)$$

де  $E$  — модуль пружності матеріалу провідників,  $E = 1.0 \cdot 10^5$  МПа.

Для котушкових обмоток зі звичайних проводів визначається осьова сила, необхідна для подолання опору вилягання внаслідок деформації головок прошивальних рейок за формулою

$$P_{2j} = \frac{2b_p \delta_p^3 E_{pu} m_i}{h_j (h_j + \Delta_j + \Delta_{oj})}, \quad (5.26)$$

де  $b_p$  — ширина головки прошивочної рейки, мм [10];

$\delta_p$  — товщина головки прошивочної рейки, мм;

$E_{pu}$  — модуль пружності прошивочної рейки при вигині, що дорівнює  $E_{pu} = 5.5 \cdot 10^3$  МПа;

$\Delta_{oj}$  — товщина загальної паперової ізоляції котушок  $j$ -ї зони, мм.

Розрахунок осьової критичної напруги прилягання провідників виконується методом послідовних наближень.

Початкове значення осьової критичної напруги вилягання провідників визначається по формулі

$$\sigma_{1j} = \frac{P_{1j} + P_{12j}}{a_i m_i b'_{1j} i_{1j}}. \quad (5.27)$$

Надалі на кожному кроці наближення ( $n$ ) розрахунок ведуть в такій послідовності, яка представлена по пунктам.

1) Визначаються модулі пружності картонних прокладок і паперової ізоляції провідів за формулами

$$E_{nj}^{\hat{e}} = E_{ok} + k_{\hat{e}} \sigma_{nj}, \quad (5.28)$$

$$E_{nj}^{\delta} = E_{od} + k_{\delta} \sigma_{nj},$$

де  $E_{ok}$  — вихідний модуль пружності картонних прокладок, МПа;

$k_k$  — кутовий коефіцієнт для механічної характеристики картонних прокладок [10].

2) Розраховується податливість стовпа прокладок в радіальному каналі і контактуючої з ним паперової ізоляції

$$D_{nj}^* = \frac{d_j}{E_{nj}^{\hat{e}}} + \frac{\Delta_j + \Delta_{oj}}{E_{nj}^{\delta}}, \quad (5.29)$$

де  $d_j$  — середня висота радіальних каналів  $j$ -ї зони, мм.

3) Розраховується деформація стиснення стовпа прокладок в радіальному каналі і контактуючої з ним паперової ізоляції по формулі

$$\delta_{nj} = \frac{1}{2} \sigma_{nj} D_{nj}^*. \quad (5.30)$$

4) Визначається ширина площі контакту паперової ізоляції з прокладками в області заокруглення перетину провідника

$$r_{nj} = \sqrt{\left(r_j + \frac{1}{2} \Delta_j + \frac{1}{2} \Delta_{oj}\right)^2 - \left(r_j + \frac{1}{2} \Delta_j + \frac{1}{2} \Delta_{oj} - \delta_{nj}\right)^2}. \quad (5.31)$$

5) Обчислюється наступне значення наведеної товщини провідника

$$b'_{n+1j} = b_j - 2r_j + 1.5r_{nj}, \quad \text{якщо } r_{nj} \leq r_j;$$

$$b'_{n+1j} = b_j - 0.5r_j, \quad \text{якщо } r_j < r_{nj}.$$

6) Розраховується геометричні параметри, що характеризують ступінь вдавнення провідників в паперову ізоляцію за формулами

$$A_{nj}^* = r_{nj} - \frac{1}{2}(b_j - 2r_j); \quad (5.32)$$

$$B_{nj}^* = \frac{1}{2} \Delta_j + 2r_j - \delta_{nj}; \quad (5.33)$$

$$C_{nj}^* = B_{nj}^* - \frac{1}{2}(b_j - 2r_j) \frac{r_{nj}}{r_j}. \quad (5.34)$$

7) Визначається кут, що характеризує ступінь вдавнення провідників в паперову ізоляцію в радіанах за формулою

$$\Theta_{nj}^* = \operatorname{arctg} \frac{A_{nj}^*}{B_{nj}^*} + \arccos \frac{C_{nj}^*}{\sqrt{A_{nj}^{*2} + B_{nj}^{*2}}}. \quad (5.35)$$

8) Обчислюється геометричний коефіцієнт жорсткості, що характеризує опір вилягання внаслідок пружних відсічей паперової ізоляції і стовпів прокладок

$$\alpha_{nj} = \frac{8}{b'_{n+1j} h_1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} b_j - r_i \right)^3 + \Theta_{nj}^* r_j \left[ 3r_j^2 + \frac{1}{2} b_j \left( \frac{1}{2} b_j - 2r_j \right) \right] + \\ + 2r_j^2 \left[ \left( \frac{1}{2} b_j - r_j \right) (1 - \cos \Theta_{nj}^*) - r_j \sin \Theta_{nj}^* \right] \end{array} \right\}. \quad (5.36)$$

9) Розраховується осьове напруження, необхідне для подолання опору вилягання внаслідок пружних відсічей паперової ізоляції і стовпів прокладок

$$\sigma'_{5nj} = \frac{\alpha_{nj}}{D_{nj}^*}. \quad (5.37)$$

10) Визначається осьовий критичне напруження вилягання за формулою

$$\sigma_{n+1j} = \frac{b'_{nj}}{b'_{n+1j}} \sigma_{nj} + \sigma'_{5nj}. \quad (5.38)$$

Розрахунок повторюється до виконання умови

$$\left| \frac{\sigma_{n+1j} - \sigma_{nj}}{\sigma_{nj\min}} \right| \leq 0.05, \quad (5.39)$$

де  $\sigma_{n_j m_i}$  — менше з двох значень осьового критичної напруги вилягання провідників на останньому і попередньому кроці наближення.

Далі розраховується осьова критична сила вилягання провідників

$$P_{\hat{\sigma}j} = 1.0 \cdot 10^{-3} \sigma_{n+1j} b'_{n+1j} a_n m_n i_{1j}. \quad (5.40)$$

Стискаючі осьові сили, що діють на обмотки при короткому замиканні і в процесі виготовлення, не повинні перевищувати осьових критичних сил полягання провідників.

### 5.2.3 Розрахунок провідників на вигин

Найбільші напруги згибу в провідниках обчислюються за формулою

$$\sigma_{uj\max} = \left| \frac{\pi^2 K_{\sigma\alpha}^2 B_{xyk} i_k D_j^2}{\sqrt{2} \cdot 10^3 m_n^2 b_j h_j^2} \right|. \quad (5.41)$$

Провідники мають достатню міцність при вигині, якщо для коефіцієнтів запасу міцності при вигині виконуються умови

$$K_{uj} = \frac{\sigma_{02}}{\sigma_{uj\max}} \geq 1, \quad (5.42)$$

де  $\sigma_{02}$  — умовний межа плинності матеріалу провідників [45].

### 5.2.4 Визначення осьових переміщень, зусиль і напружень

Розміри стрижнів в окружному напрямку обмотки визначаються наступним чином

$$a_{i_3} = a_{ni_3}, \quad (5.43)$$

де  $i_3$  — номер обмотки під даним пресуючим кільцем в порядку проходження від внутрішньої циліндричної поверхні пресуючого кільця в радіальному напрямку [10].

Середні відстані між осями стрижнів в радіальному напрямку обчислюються за формулою

$$e_{i_3j} = b_{i_3j} + \frac{1}{i_{y_{i_3j}}} \left[ \Delta_{i_3j} + 0.48(i_{y_{i_3j}} - 1) \right]. \quad (5.44)$$

Радіальні розміри стрижнів, еквівалентних паперової ізоляції, розраховуються за формулою

$$\bar{b}_{i_3j} = b_{i_3j} - 0.5r_{i_3j}. \quad (5.45)$$

Радіальні розміри стрижнів, еквівалентних до стовпів прокладок в радіальних каналах обчислюються за формулою

$$S_{i_3j} = \frac{e_{i_3j}}{1 + 4\psi_{i_3j}}, \quad (5.46)$$

де  $\psi_{i_3j}$  — коефіцієнт привендення [41, 45].

Наведені електромагнітні сили визначаються в такій послідовності.

1) Обчислюються осьові електромагнітні сили, що діють на витки або котушки зон, за формулою

$$F_{i3j} = \pi\sqrt{2} \cdot 10^{-6} i_{i3j} n_{i3j} B_{xi3j} i_{ki3} D_{i3j}, \quad (5.47)$$

де  $i_{i3j}$  — загальне число елементарних провідників в витку або котушці  $j$ -ої зони;

$D_{i3j}$  - податливості ізоляційних матеріалів під пресуючим кільцем.

2) Розраховуються наведені електромагнітні сили для кожної власної осьової частоти коливання обмотки

$$\bar{H}_k = \sum_{i3=1}^2 \sum_{j=1}^{N_{i3}} \frac{F_{i3j}}{\sin \chi_{i3} v_k} \sin \left[ \chi_{i3} v_k \left( 1 - \frac{x_{i3j}}{\bar{H}_0} \right) \right], \quad (5.48)$$

де  $x_{i3j}$  — осьова координата середини  $j$ -ої зони, відраховується від нижнього торця пресує кільця, мм;

$\bar{H}_0$  — висота обмоток з урахуванням кінцевої ізоляції, мм;

$v_k$  — власні кругові частоти осьових коливань обмотки, Гц.

Осьові переміщення пресуючого кільця і середин зон обмоток визначаються за формулами [45]

$$U(t) = \sum_{k=1}^{\bar{N}} \frac{\bar{H}_k \cdot 10^6 \cdot \phi_k(t)}{v_k \mu_k}; \quad (5.49)$$

$$U_{i3j}(t) = \sum_{k=1}^{\bar{N}} \frac{\bar{H}_k \cdot 10^6 \cdot \phi_k(t)}{v_k \mu_k \sin \chi_{i3} v_k} \sin \left[ \chi_{i3} v_k \left( 1 - \frac{x_{i3j}}{\bar{H}_0} \right) \right]. \quad (5.50)$$

Силу, що діє на пресуючу конструкцію, і осьові зусилля в зонах обмоток розраховується за формулами

$$P_{\hat{a}}(t) = \sum_{i3=1}^2 P_{0i3} - C \cdot 10^{-6} U(t); \quad (5.51)$$

$$N_{0i3j} = P_{0i3} + \sum_{k=1}^{\bar{N}} \frac{\bar{H}_k \chi_{i3} \cdot 10^3 \phi_k(t)}{\gamma_{i3} \mu_k \sin \chi_{i3} v_k} \cos \left[ \chi_{i3} v_k \left( 1 - \frac{x_{i3j}}{\bar{H}_0} \right) \right], \quad (5.52)$$

де на першому етапі значення сил осьового пресування ( $P_{0i3}$ ) приймається рівними за необхідне силам осьового пресування.

### 5.2.5 Перевірка міцності, жорсткості і стійкості

Стійкість до дії радіальних і дотичних сил забезпечується, якщо для збільшень сили осьового пресування і сили, що діє на пресуючу конструкцію, виконуються умови

$$P_{ni3} = \frac{1}{4} P_{Hi3} (1 + e^{-\alpha t})^2 - N_{0i3j}(t) \leq 0, \quad (5.53)$$

$$P_{\hat{a}}(t) \geq 0, \quad (5.54)$$

де значення необхідної сили осьового пресування ( $P_{Hi3}$ ) визначають відповідно до підрозділу 5.1.4.

Якщо виконуються не всі умови (5.1) і (5.2), то визначається сумарне збільшення сил осьового пресування наступним чином

$$P_n = \max \left\{ \sum_{i3=1}^2 \max \{ P_{ni3} \}; \left| \min P_{\hat{a}}(t) \right| \right\}, \quad (5.55)$$

де  $\max \{ P_{ni} \}$  — найбільше з збільшень сили осьової пресування обмотки, кН;

$\min P_{\dot{a}}(t)$  — найменше (негативне) значення сили, що діє на пресуючу конструкцію, кН.

Якщо для обмотки умова (5.53) виконується, то для неї найбільше збільшення сили осьової пресування в вираженні (5.55) приймають рівним нулю

$$\max \{P_{ni3}\} = 0. \quad (5.56)$$

При виконанні умови (5.54) найменше значення сили, що діє на пресуючу конструкцію, в вираженні (5.55) вважають рівним нулю

$$\min P_{\dot{a}}(t) = 0. \quad (5.57)$$

Далі обчислюються достатні сили осьового пресування

$$P_{ai3} = P_{Hi3} + \max \{P_{ni3}\} + P_{Hi3} \frac{P_n - \sum_{i3=1}^2 \max \{P_{ni3}\}}{\sum_{i3=1}^2 P_{Hi3}}. \quad (5.58)$$

При виконанні умови (5.54) достатню силу осьового пресування обмотки, для якої виконуються умови (5.53), приймають рівною її необхідної сили осьового пресування

$$P_{ai3} = P_{Hi3}. \quad (5.59)$$

### 5.2.6 Перевірка міцності, жорсткості і стійкості до вигинання провідників

Перевірку міцності обмоток при дії осьових сил проводиться в такій послідовності:

- 1) Обчислюються найбільші напруги стискання зон

$$\sigma_{i3j}^{\max} = \frac{\max \{N_{0i3j}(t)\} \cdot 10^3}{m_{ni3} a_{i3} \bar{b}_{i3j} i_{li3j}}, \quad (5.60)$$

де  $\max \{N_{0i3j}(t)\}$  — найбільше значення осьового зусилля в  $j$ -ій зоні, кН.

2) Обмотка має достатню міцність, якщо для коефіцієнта запасу міцності при дії осьових сил виконується умова

$$K_{n0i3} = \frac{\sigma_{02i3}}{\max \{\sigma_{i3j}^{\max}\}} \geq 1, \quad (5.61)$$

де  $\max \{\sigma_{i3j}^{\max}\}$  — найбільше з усіх найбільших напружень стиску, МПа.

За значеннями осьових переміщень центрів зон обмоток встановлюють їх допустимість з точки зору забезпечення цілісності відводів або інших конструктивних міркувань.

Обмотка стійка до вилягання провідників, якщо для коефіцієнтів запасу на полягання провідників виконуються умови

$$K_{nni3j} = \frac{P_{\delta i3j}}{1.2 \max \{N_{0i3j}(t)\}} \geq 1, \quad (5.62)$$

де значення осьової критичної сили вилягання провідників ( $P_{\text{кри}i3j}$ ) визначають відповідно до підрозділу 5.2.2.

Результати розрахунку зроблені в додатку А «Розрахунок електродинамічної стійкості реактора», таблиця А.9.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оскільки тема магістерської роботи – «Дослідження електромагнітних характеристик пристрою компенсації реактивної потужності 110 кВ, 63000 кВАр», передбачає проведення досліджень та розрахунків у приміщенні дослідного центру обладнаному персональними комп'ютерами (далі – ПК) з візуальними дисплейними терміналами (далі – ВДТ), тому нижче розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії і гігієни праці для робочих місць приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ, а також заходи з пожежної безпеки та цивільного захисту, у відповідності з методичними вказівками [50, 51].

### 6.1 Аналіз потенційних небезпек

Ідентифікацію небезпек здійснюють згідно принципу, що «усе впливає на усе», тобто все може бути як джерелом небезпеки, так і зазнати небезпеки.

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і технологічних процесів у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ, згідно ГОСТ 12.0.003-74\* «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [52], виявлені наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, здатні привести до травм або ушкодження здоров'я працівників:

– оскільки приміщення обладнане електротехнічними приладами та пристроями, тому, у разі порушення ізоляції, умов безпечної експлуатації або необережного поведіння осіб, що працюють з комп'ютерами існує можливість ураження електричним струмом, тобто отримання електротравм різного ступеню важкості;

– порушення основних вимог до ергономічних характеристик моніторів, такі як: блимання зображення, відсутність можливості регулювання яскравості та контрастності або наявності на екрани відблисків і відбиття приводить до підвищеної стомлюваності тобто може негативно позначитися на здоров'ї осіб, що працюють з комп'ютерами;

– незадовільні технічні характеристики моніторів, такі як: розмір екрана, роздільна здатність, зернистість зображення, тощо, або неправильне його встановлення, можуть негативно вплинути на зір та на здоров'я загалом;

– підвищена або знижена температура, вологість і рухливість повітря в приміщенні, у випадку не якісної або нераціональної системи вентиляції та кондиціонування повітря, приводить до підвищеної стомлюваності, а як наслідок до помилок, зниженню працездатності, а також може бути причиною простудних захворювань;

– нераціональне освітлення або недотримання вимог до специфіки світлотехнічного обладнання робочих місць з ПК та режиму праці може призвести до порушення зору осіб, що працюють з комп'ютерами;

– підвищений рівень шуму на робочому місці при неправильному або нераціональному розміщенні робочих місць і обладнання, при використанні неякісного обладнання або нераціональних режимів його роботи може бути причиною зниження працездатності, а також порушення слуху осіб, що працюють з комп'ютерами;

– підвищений рівень вібрації при неправильному або нераціональному розміщенні робочих місць і обладнання, негативно впливає на нервову, опорно-рухову та серцево-судинну системи й особливо – мікроциркуляторне русло серцево-судинної системи (дрібні судини, у яких іде безпосередня віддача кров'ю кисню й утилізація із тканин вуглекислого газу), що при тривалому

впливі, може бути причиною виникнення або загострення професійної хвороби пов'язаної з впливом вібрації – «вібраційної хвороби»;

– неправильне положення при роботі за комп'ютером, робота користувача вимагає тривалого статичного напруження м'язів спини, шиї, рук і ніг, що може привести до кістково-м'язових порушень;

– порушення вимог до режимів праці та відпочинку користувачів ПК, а саме неякісне або нераціональне розроблення внутрішньо-змінного режиму праці та відпочинку, відсутність або недотримання регламентованих перерв для відпочинку є причиною підвищення нервово-емоційного напруження, втоми зорового аналізатора, погіршення мозкового кровообігу, проявів несприятливих наслідків гіподинамії, підвищення втоми;

– коротке замикання у електричному колі, при невідповідності ступеня захисту оболонок (ізоляції) обладнання що експлуатується в приміщенні класу пожежанебезпечної зони приміщення або механічних ушкодженнях ізоляції провідників може привести до виникнення пожежі, а це може бути причиною термічних опіків осіб, що працюють в приміщенні;

– відсутність або неправильний вибір типу та необхідної кількості первинних засобів гасіння пожеж (вогнегасників) у результаті помилок у розрахунках, може стати причиною поширення пожежі, а як наслідок причиною термічних опіків різного ступеню важкості.

Також необхідно враховувати, що різні по природі своєї дії небезпечні і шкідливі виробничі фактори можуть проявлятися одночасно.

## 6.2 Заходи з охорони праці

### 6.2.1 Заходи по забезпеченню безпеки

Приміщення, у якому здійснюються дослідження та розрахунки електромагнітних характеристик пристрою компенсації реактивної потужності 110 кВ, 63000 кВАр, є спеціалізованим приміщенням дослідного центру яке обладнане ПК з ВДТ.

Приміщення дослідного центру, що обладнане ПК з ВДТ, відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61], «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ») [53], ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом» [54], НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [55], НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [71].

Обладнання та пристрої, що розташовані в приміщенні будуть експлуатуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ») [56], НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») [57] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60].

У приміщенні обладнане десять комп'ютеризованих робочих місць з ВДТ, до складу яких входить десять рідкокристалічних моніторів Dell P2419H Black (210-APWU), офісні меблі та стенди. Розміри приміщення: 14×4,5×3,4 м, тобто його площа – 63 м<sup>2</sup>, а об'єм – 214,2 м<sup>3</sup>, покриття підлоги – паркет. Живлення електроустаткування приміщення дослідного центру здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц.

Згідно «ПУЕ» [53], за ступенем небезпеки ураження електрострумом, приміщення дослідного центру з ПК належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно пунктів 1.7.43 та 1.7.45 «ПУЕ» [53], обладнання приміщення дослідного центру з ПК має основну ізоляцію струмовідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до п. 6.7.1 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [57] ПК з ВДТ, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК по способу захисту людини від ураження електричним струмом, належать до I класу, оскільки мають основну і подвійну ізоляцію, елемент для заземлення та провід для приєднання до джерела живлення, що має заземлюючу жилу і вилку з заземлюючим контактом.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [57] усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні дослідного центру з ПК, яке може опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Згідно з «ПУЕ» [53] електрообладнання приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ характеризується як електроустановки до 1 кВ, тому для забезпечення безпеки персоналу відповідно до вимог глави 1.7 «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ» [53] все електрообладнання заземлене. Величина опору контуру захисного заземлення, у будь-яку пору року, не перевищує – 4 Ом.

Оскільки приміщення дослідного центру з ПК за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому згідно вимог п. 6.7.6

НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [57] та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» [56] користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають I групу з електробезпеки.

До оперативного обслуговування електромереж та електрообладнання у приміщенні дослідного центру, згідно пунктів 5.1.1, 5.1.2 и 6.1.7 НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» [56] та пунктів 2.2.3 і 3.2.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» [57], допускаються працівники зі складу оперативних або оперативно-виробничих працівників, які знають його схему, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи і пройшли навчання та перевірку знань. Працівники що одноосібно обслуговують електромережі та електрообладнання у приміщенні дослідного центру мають III групу з електробезпеки.

Відповідно до вимог глави 1.3 «Вибір провідників за нагрівом» – «ПУЕ» [53], усі електричні мережі та електроустаткування приміщення дослідного центру з ПК захищено від струмів короткого замикання та струмів перевантаження, а також перенапруги на ділянках цепі. В якості апаратів захисту застосовано автоматичні вимикачі. Які мають у своєму складі електромагнітний (для захисту від струмів короткого замикання) та тепловий (для захисту від перевантаження за струмом) роз'єднувачі, струми уставок яких (так як і запобіжників) обрані найменшими за розрахованими струмами для забезпечення вимог швидкодії, чутливості та селективності захисту.

Відповідно до вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЄС 90/270/ЄЕС [59] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60] виконано такі п'ять основних вимог до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;

- зображення позбавлене блимання;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів.

Також врахований такий важливий чинник загальної ергономіки монітора, як можливість його регулювання. Також можливе інколи необхідне ручне регулювання геометричних розмірів і положення зображення на екрані, а також корекція спотворень.

#### 6.2.2 Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці

Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці для приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [58], ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60].

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура повітря, відносна вологість повітря та швидкість його переміщення цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [62] і ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зо-

ны» [63]. Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легкі фізичні роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21-23°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

- у теплий період року: температура 22-24°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [64], з метою забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ передбачена система централізованого водяного опалення з радіаторами, а на теплий період, зважаючи на те, що площа приміщення становить 63 м<sup>2</sup> передбачений побутовий кондиціонер типу Zanussi ZACS-24 HPF/A17/N1. Виходячи з того, що один кондиціонер розрахований на приміщення площею – 65 м<sup>2</sup>.

З метою забезпечення необхідного повітрообміну у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ, зважаючи на те, що об'єм приміщення становить 214,2 м<sup>3</sup>, передбачена система механічної припливно-витяжної вентиляції – методом рекуперації, за допомогою рекуператора типу Prana-250. Який забезпечує 3-кратний обмін повітря за годину, виходячи з того, що він забезпечує наступний повітрообмін: приплив – 650 м<sup>3</sup>/год, витяг – 610 м<sup>3</sup>/год.

Оптимальні рівні позитивних ( $n+$ ) і негативних ( $n-$ ) іонів у повітрі приміщення дослідного центру з ВДТ відповідають вимогам додатку 3 ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] і ста-

новить:  $n+ = 1500-30000$  (шт. на  $1 \text{ см}^3$ );  $n- = 3000-5000$  (шт. на  $1 \text{ см}^3$ ). Підтримку оптимального рівня легких позитивних і негативних аероіонів у повітрі на робочих місцях забезпечують за допомогою біполярних коронних аероіонізаторів.

У приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ, згідно ДСанПІН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [65], передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Штучне освітлення приміщення, здійснено системою загального рівномірного освітлення. Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів становить 300-500 лк. Як джерела штучного освітлення приміщення застосовано люмінесцентні лампи типу ЛБ. Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від  $50^\circ$  до  $90^\circ$  з вертикаллю в поздовжній та поперечній площинах становить не більше ніж  $200 \text{ кд/м}^2$ , захисний кут світильників – не менше ніж  $40^\circ$ . Показник осліпленості для джерел загального штучного освітлення приміщення дослідного центру з ВДТ не перевищує 20, а показник дискомфорту, відповідно 40.

Також передбачено обмеження прямих відблисків від джерел природного та штучного освітлення та обмеження відбитих відблисків на робочих поверхнях (екран, стіл, клавіатура). Яскравість світлових поверхонь (вікна, джерела штучного освітлення тощо), що розташовані в полі зору, не переви-

щує  $200 \text{ кд/м}^2$ . Яскравість відблисків на екрані ПК не перевищує  $40 \text{ кд/м}^2$ , а яскравість стелі при застосуванні системи відбитого освітлення не перевищує  $200 \text{ кд/м}^2$ . Захистом від прямих відблисків є зниження яскравості видимої частини джерел світла шляхом застосування спеціальних розсіювачів, відбивачів та інших світлозахисних пристроїв, а також правильне розміщення робочих місць відносно джерел світла; від відбитих відблисків – правильне розміщення предметів, використання матових поверхонь предметів у приміщенні.

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приміщення дослідного центру з ПК відповідають вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] та ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [62]. Зниження рівня шуму в приміщенні здійснено за допомогою:

- використання блоків живлення ПК з вентиляторами на гумових підвісках;
- використання ПК, в яких термодавачі вмонтовані в блоці живлення та в критичних точках материнської плати (процесор, мікросхеми чипсету), які дозволяють програмним шляхом регулювати як моменти ввімкнення вентиляторів, так і їх швидкість обертання;
- переведення жорсткого диска в режим сну (Standby), якщо комп'ютер не працює протягом визначеного часу;
- використання ПК, в яких вентилятор на процесорі встановлено виробником (ВОХ-процесор);

– використання 24-38х швидкісних CD-ROM для пристроїв, які створюють менше шуму, ніж 48-50х швидкісні CD-ROM, або ж застосування приводу з одночасним зчитуванням декількох доріжок CD.

– розташування принтерів колективного користування на значній відстані від більшості робочих місць користувачів ПК.

Під час виконання робіт з ПК, значення характеристик вібрації на робочих місцях не перевищують допустимого рівню, які відповідають вимогам ДСН 3.3.6-039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [67]. Персонал не має потреби в додатковому захисті від вібрації, яку виробляють ПК. Оскільки ПК установлені на спеціальний комп'ютерних столах, які поглинають залишкову вібрацію.

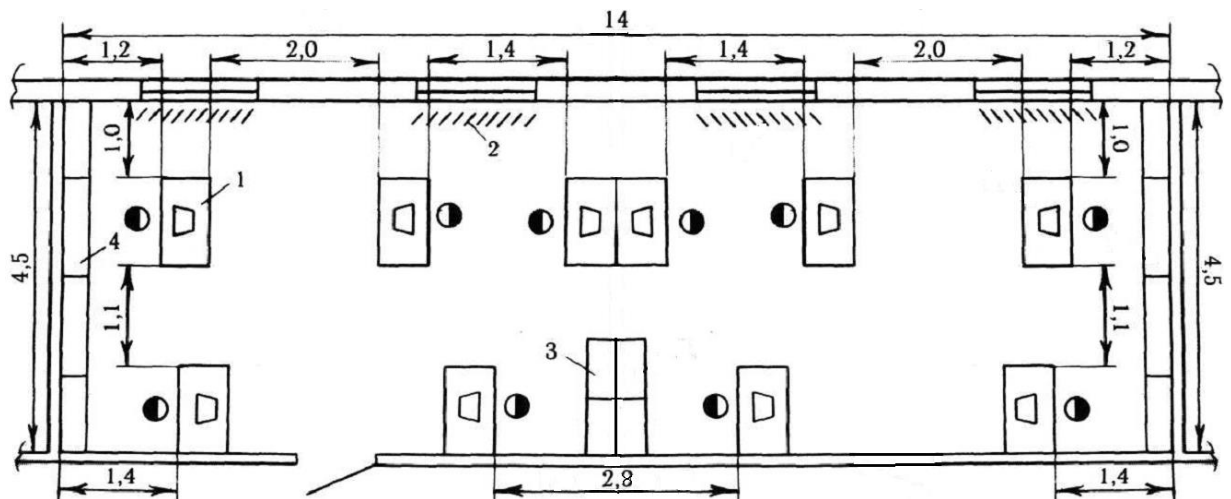
Оскільки джерелами електростатичного поля, м'якого рентгенівського, ультрафіолетового, інфрачервоного, видимого, низькочастотного, над низькочастотного і високочастотного електромагнітного випромінювання є монітори, сконструйовані на основі електронно-променевої трубки. Тому, з метою виключення цих небезпек, у приміщенні дослідного центру встановлені сучасні рідкокристалічні монітори з підсвічуванням типу – WLED. Які цілком відповідають вимогам MPR II, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60], щодо забезпечення безпеки користувачів ПК.

З метою забезпечення досліджень та розрахунків електромагнітних характеристик пристрою компенсації реактивної потужності 110 кВ, 63000 кВАр, у приміщенні дослідного центру, що знаходиться на другому поверсі вироб-

ничого корпусу, заплановано обладнати 10 (десять) комп'ютеризованих робочих місць.

Визначимо, скільки комп'ютеризованих робочих місць оснащених ВДТ, можна встановити в даному приміщенні і як їх розташувати відповідно встановленим нормам і правилам з охорони праці. Якщо приміщення має наступні розміри: довжина  $a = 14$  м, ширина  $b = 4,5$  м, висота  $h = 3,4$  м.

План виробничого приміщення з комп'ютеризованими робочими місцями, відповідний умовам прикладу, приведений на рисунку 6.1.



1 – комп'ютеризовані робочі місця; 2 – сонцезахисні жалюзі;

3 – шафи для зберігання дисків і програмного забезпечення;

4 – шафи для зберігання документації і спеціалізованої літератури.

Рисунок 6.1 – План виробничого приміщення з комп'ютеризованими робочими місцями

Перш за все проаналізуємо чи придатне дане приміщення для того, щоб розміщувати в ньому комп'ютеризовані робочі місця.

Відповідно до вимог НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60] є неприпустимим розташування приміщень, призначених для роботи з ВДТ у підвалах та цокольних поверхах. Також, згідно ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [73], забороняється розташування в вибухонебезпечних приміщеннях категорії «А» і «Б» та виробництвах з мокрими технологічними процесами поряд з приміщенням, де розташовуються ПК з ВДТ, а також над такими приміщеннями, або під ними. Окрім того, виробничі приміщення призначені для роботи з ВДТ не повинні межувати з приміщеннями, у яких рівень шуму і вібрації перевищує допустимі значення.

Приміщення відповідає вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [60] та ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [73], тому переходимо до наступного етапу, а саме, до визначення кількості комп'ютеризованих робочих місць, яку можна розмістити в даному приміщенні.

Проаналізуємо, чи придатне дане приміщення для розміщення в ньому 10 (десяти) комп'ютеризованих робочих місць.

Оскільки площа приміщення складає  $S_{пр} = 63 \text{ м}^2$ , а площа, на якій розташовується одне робоче місце з ВДТ, згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61], повинна складати не менше  $6,0 \text{ м}^2$ , то в даному приміщенні можна розмістити не більше десяти

комп'ютеризованих робочих місць. Нас це влаштовує, оскільки ми плануємо обладнати в приміщенні десять комп'ютеризованих робочих місць.

Далі перевіримо, чи відповідає необхідна кількість робочих місць нормі мінімального об'єму приміщення на одне робоче місце обладнане ПК з ВДТ, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] – ( $V_{p.g.Min} = 20 \text{ м}^3$ ). Об'єм приміщення складає  $214,2 \text{ м}^3$ , а об'єм, що доводиться на одне комп'ютеризоване робоче місце складає  $V_{p.g.} = 21,42 \text{ м}^3$ . Таким чином норматив щодо об'єму приміщення на одне комп'ютеризоване робоче місце виконується.

Розташування робочих місць з ПК у приміщенні дослідного центру виконано згідно вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61]. Покриття підлоги є матовим з коефіцієнтом відбиття 0,3-0,5. Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями. Для внутрішнього оздоблення приміщення дослідного центру з ПК використані дифузно-відбивні матеріали з коефіцієнтами відбиття для стелі 0,7-0,8; для стін 0,5-0,6.

Планування розміщення комп'ютеризованих робочих місць в приміщенні проводилось з урахуванням наступних вимог:

- робочі місця з ВДТ розміщені на відстані 1 м від стін зі світловими прорізами;
- відстань між бічними поверхнями ВДТ складає 1,2-1,4 м;
- відстань між тильною поверхнею одного ВДТ і екраном іншого складає 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць складає 1,4 м.

Конструкція робочого місця користувача ПК забезпечує підтримання оптимальної робочої пози. Робочі місця з ПК розташовані відносно вікон, щоб природне світло падало збоку переважно зліва. Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на рівні простягнутої ноги – 650 мм. Поверхня сидіння і спинки стільця напівм'яка з нековзним повітронепроникним покриттям, що легко чиститься і не електризується.

Обладнання та організація робочих місць користувачів ПК, у приміщенні дослідного центру, забезпечують відповідність конструкцій всіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61].

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК були враховані:

- робоча поза користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість ведення записів, розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

Комп'ютеризовані робочі місця розміщені рядами уздовж стіни з вікнами. Це виключає дзеркальне віддзеркалення на екрані ВДТ джерел природи.

дною світла і попадання останніх у полі зору операторів, що погіршує умови їх зорової роботи.

Вимоги до режимів праці та відпочинку користувачів ПК визначаються роботою, яку виконує користувач відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» [61] та ДК 003:2010 «Класифікатор професій» [70].

Розробники програм – виконують роботу переважно з ПК та документацією. При цьому відбувається інтенсивний обмін інформацією з ПК і висока частота прийняття рішень. Робота виконується у вільному темпі і пов'язана з періодичним пошуком помилок в умовах дефіциту часу, характеризується інтенсивною розумовою творчою працею з підвищеним напруженням зору, концентрацією уваги, нервово-емоційним напруженням, статичною робочою позою, періодичним навантаженням на кисті верхніх кінцівок. Для них встановлено внутрішньо-змінні режими праці та відпочинку при роботі з ПК при 8-годинній денній робочій зміні, для розробників програм із застосуванням ПК призначені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години. З метою зменшення негативного впливу монотонності на працюючого деякі операції чергуються, наприклад, введення тексту за допомогою клавіатури та редагування тексту тощо. Для зниження нервово-емоційного напруження, втоми зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі деякі перерви використовуються для виконання комплексу вправ.

Передбачений для приміщення дослідного центру обладнаного персональними комп'ютерами з візуальними дисплейними терміналами комплекс заходів по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії і гігієни праці забезпечують безпечні та комфортні умови праці персоналу.

### 6.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

#### 6.3.1 Заходи з пожежної безпеки

Комплекс заходів з пожежної безпеки для приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ розроблений відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [71].

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ:

– згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» [72] у приміщенні дослідного центру з ПК можлива пожежа класів – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

– відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [73], приміщення дослідного центру з ПК належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення дослідного центру обладнане ПК з ВДТ належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [74], воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [74], передбачені виходи по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (таблиця 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания» [74], відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Обладнання, силові та освітленні мережі приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [55], та мають ступінь захисту оболонок (ізоляції) обладнання IP44 яка відповідає класу пожежанебезпечної зони П-ІІа до якої належить приміщення.

З технічних та організаційних заходів запобігання пожеж в приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ передбачені наступні протипожежні заходи. На силовому обладнанні, силових та освітлювальних колах, згідно вимог пункту 3.1.8 та глави 1.3 «Вибір провідників за нагрівом» – «ПУЕ» [53], встановлені захисні пристрої, що вимикають джерело живлення від ділянки електричного кола, у якій виникло коротке замикання.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [75], в приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВКб». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення дослідного центру що обладнане ПК з ВДТ має площу 63 м<sup>2</sup>, тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належно-

сті вогнегасників» [75], для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 4 штук (з розрахунку один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м<sup>2</sup> площі приміщення). Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

6.3.2 Організація навчання працюючого та непрацюючого населення діям у надзвичайних ситуаціях

Згідно вимог глави 10 «Кодексу цивільного захисту (далі – ЦЗ) України» [77] навчання працюючого та непрацюючого населення діям у надзвичайних ситуаціях (далі – НС) здійснюється:

- працюючого населення – за місцем роботи;
- дітей дошкільного віку, учнів та студентів – за місцем навчання;
- непрацюючого населення – за місцем проживання.

Організація навчання населення діям у НС покладається:

– працюючого та непрацюючого населення – на Державну службу України з НС (далі – ДСНС України), Раду міністрів Автономної Республіки Крим, місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування, які розробляють і затверджують відповідні організаційно-методичні вказівки та програми з підготовки населення до таких дій;

– дітей дошкільного віку, учнів та студентів – на центральний орган виконавчої влади, що забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері освіти і науки, який розробляє та затверджує навчальні програми з вивчення заходів безпеки, способів захисту від впливу небезпечних факторів,

викликаних НС, з надання домедичної допомоги за погодженням з ДСНС України.

Стандартами професійно-технічної та вищої освіти передбачається набуття знань у сфері ЦЗ.

Порядок здійснення навчання населення діям у НС встановлюється Кабінетом Міністрів України.

Громадські організації та позашкільні навчальні заклади здійснюють навчання діям у НС відповідно до своїх статутів.

Навчання працюючого населення діям у НС є обов'язковим і здійснюється в робочий час за рахунок коштів роботодавця за програмами підготовки населення діям у НС, а також під час проведення спеціальних об'єктових навчань і тренувань з питань ЦЗ.

Порядок організації та проведення спеціальних об'єктових навчань і тренувань з питань ЦЗ визначається ДСНС України.

Для отримання працівниками відомостей про конкретні дії у НС з урахуванням особливостей виробничої діяльності суб'єкта господарювання у кожному суб'єкті господарювання обладнується інформаційно-довідковий куточок з питань ЦЗ.

Особи під час прийняття на роботу та працівники щороку за місцем роботи проходять інструктаж з питань ЦЗ, пожежної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях.

Особи, яких приймають на роботу, пов'язану з підвищеною пожежною небезпекою, мають попередньо пройти спеціальне навчання (пожежно-технічний мінімум). Працівники, зайняті на роботах з підвищеною пожежною небезпекою, один раз на рік проходять перевірку знань відповідних норма-

тивних актів з пожежної безпеки, а посадові особи до початку виконання своїх обов'язків і періодично (один раз на три роки) проходять навчання та перевірку знань з питань пожежної безпеки.

Допуск до роботи осіб, які не пройшли навчання, інструктаж і перевірку знань з питань ЦЗ, зокрема з пожежної безпеки, забороняється.

Програми навчання з питань пожежної безпеки погоджуються з ДСНС України.

Навчання учнів, студентів та дітей дошкільного віку діям у НС та правилам пожежної безпеки є обов'язковим і здійснюється під час навчально-виховного процесу за рахунок коштів, передбачених на фінансування навчальних закладів.

Навчання дітей дошкільного віку діям у НС та запобігання пожежам від дитячих пустощів з вогнем проводиться шляхом формування у них поведінки, відповідної віку дитини, щодо власного захисту та рятування.

Непрацююче населення самостійно вивчає пам'ятки та інший інформаційно-довідковий матеріал з питань ЦЗ, правила пожежної безпеки у побуті та громадських місцях та має право отримувати від органів державної влади, органів місцевого самоврядування, через засоби масової інформації іншу наочну продукцію, відомості про НС, у зоні яких або у зоні можливого ураження від яких може опинитися місце проживання непрацюючих громадян, а також про способи захисту від впливу небезпечних факторів, викликаних такими НС.

Передбачений комплекс заходів з пожежної безпеки і цивільного захисту, щодо навчання працюючого та непрацюючого населення основним нормам поведінки та діям у надзвичайних ситуаціях, підвищує стійкість роботи

об'єкта та забезпечує безпеку персоналу в умовах пожеж та інших надзвичайних ситуацій.

## 7 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 7.1 Техніко-економічні показники пристрою компенсації реактивної потужності

В даному ПКРП для забезпечення надійності, зручності в експлуатації і зниження матеріаломісткості використовується ряд нових технічних рішень:

- зменшення перетину бічних ярем магнітної системи згідно МЕК, за рахунок чого відбувається економія електротехнічної сталі 3408;
- впровадження струмоводов іншої фірми-виробника ETA 123/800/550, що впливає на економію проектованого пристрою.

Дані зміни дозволяють зменшити експлуатаційні витрати і витрати на технічне обслуговування апарату. А саме зменшити час, що витрачається на шихтовку електротехнічної сталі і відповідно зменшити кількість робітників, що здійснюють шихтовку.

### 7.2 Оцінка ринку збуту

Оцінка ринку збуту пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП) для ЛЕП проводиться з урахуванням розташування провідних фірм-розробників і фірм-виробників, їх сфер впливу в цій області. Українські розробники і виробники ПКРП, мають досить високі техніко-економічні показники, за рахунок яких мають можливості випередити зарубіжних конкурентів (зокрема, Німеччину). Можлива часткова реалізація ПКРП в Індію, де розвиваються лінії електропередач. Найбільш доступним для українського виробника ринком збуту є Росія, що має ЛЕП високої і надвисокої роздільної класу

напруги, якої з економічної точки зору вигідніше працювати з українськими постачальниками.

Таблиця 7.1 – Техніко-економічні показники керованого шунтируючого реактора

Параметр	Значення параметра
Напруга, кВ:	
– мережевий обмотки;	110
– компенсаційної обмотки;	11
– обмотки керування (управління)	23,3
Частота, Гц	50
Потужність, кВАр:	
– холостого ходу;	1000
– номінальна;	63000
– максимально допустима;	75000
Струм, А:	
– СО (МО)	300
– КО	380
– ОУ	450
– дроселя	380
Повна маса трансформатора, кг	71048

Намічений обсяг виробництва нового виробу, шт	4
Термін служби, років	25
Термін служби до першого капітального ремонту, років	10
Додаткові капітальні витрати, пов'язані зі створенням і організацією виробництва, грн	440000

### 7.3 Розрахунок калькуляції собівартості і цін ПКРП

Собівартість спроектованого виробу знаходиться у взаємозв'язку з показниками ефективності виробництва. Вона свідчить про велику частину вартості виробу і залежить від зміни умов виробництва і реалізації виробу. Істотний вплив на рівень витрат роблять техніко-економічні фактори виробництва.

В цілому собівартість продукції складається з матеріальних витрат, витрат на виплату заробітної плати робітникам і комплексних статей витрат. Збільшення або зменшення витрат по кожному елементу викликає або подорожчання, або зниження собівартості цієї продукції. Розраховується відрядна розцінка для кожного виду робіт за формулою

$$P_{\text{сдел}} = C_{\text{час}} \cdot t_{\text{шт}}, \quad (7.1)$$

де  $C_{\text{час}}$  - годинна тарифна ставка робітника, грн / год;

$t_{\text{шт}}$  - трудомісткість виробу, год.

Для заготівельно-зварювальних робіт розцінка складає

$$P_{\text{сум}} = 18,5 \cdot 350,6,$$

$$P_{\text{сум}} = 6486,1 \text{ грн.}$$

Так визначається для кожного виду робіт і в кінцевому рахунку основна заробітна плата виробничих робітників склала 23623,29грн.



Таблиця 7.2 - Види робіт з виготовлення ПКРП

Види робіт	Трудомісткість, ч	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн	Розцінка, грн
1 Заготівельно-зварювальні	350,6	5	18,5	6486,1
2 Механічна обробка	116,81	5	18	2102,58
3 Намотка	297,1	4	17	5050,7
4 Збірка	391,85	5	19	7429
5 Оздоблення	30,23	3	14	423,22
6 Гальваніка	16,84	4	17	286,28
7 Випробування	70,00	6	20	1400
8 Упаковка	17,45	3	14	244,3
9 Інші	13,87	3	14,5	201,11
Разом	1304,75			23623,29

Додаткова заробітна плата виробничих робітників з урахуванням премії з фонду матеріального заохочення визначається за формулою

$$Z_{\text{доп}} = P_{\text{сум.}} \cdot (N_{\text{прем}} + N_{\text{допл}} + N_{\text{фмп}}) / 100, \quad (7.2)$$

де Рсум - сумарна розцінка (пряма заробітна плата виробничих робітників),  
грн;

Нпрем -% премії виробничим робочим (40%);

Ндопл -% доплат за роботу в нічний і вечірній час, бригадирство (10%);

Нфмп -% премії з фонду матеріального заохочення (4%).

$$З_{\text{доп}} = 23623,29 \cdot (40 + 10 + 4) / 100,$$

$$З_{\text{доп}} = 12756,57 \text{ грн.}$$

Відрахування в єдиний соціальний внесок вважаються за формулою

$$O_{\text{соц.}} = H_{\text{осн.}} \cdot (P_{\text{сум}} + З_{\text{доп}}) / 100, \quad (7.3)$$

де  $H_{\text{осн}}$  – норма відрахувань в єдиний соціальний внесок, % (37,5%).

$$O_{\text{соц.}} = 37,5 \cdot (23623,29 + 12756,57) / 100,$$

$$O_{\text{соц.}} = 13642,44 \text{ грн.}$$

Сума витрат на сировину, основні матеріали і покупні вироби зведена в таблицю 7.3.

Витрати на утримання і експлуатацію устаткування займають значну питому вагу в загальній сумі комплексних витрат. До їх складу включаються витрати, пов'язані з роботою устаткування, тобто витрати на утримання, амортизацію, поточний ремонт виробничого і підйомно-транспортного устаткування, цехового транспорту, обслуговування робочих місць, а також на амортизацію і відшкодування зносу інструментів і пристосувань і ін.

Загальнопромислові витрати включають в себе:

– витрати на утримання та експлуатацію обладнання складають 300% від основної заробітної плати виробничих робітників і рівні

$$PCЭO = (300 \cdot Z_{OCN}) / 100, \quad (7.4)$$

де  $Z_{OCN}$  - основна заробітна плата виробничих робітників, грн.

$$PCЭO = (300 \cdot 23623,29)/100,$$

$$PCЭO = 70869,87 \text{ грн.}$$

Таблиця 7.3 – Вартість покупних комплектуючих пристроїв

Найменування покупних пристроїв	Норма витрати, одиниць	Ціна, тис. грн.	Вартість, тис.грн.
Вводи ГКТ III-60-220 / 2000	3	676,8	400
Ізолятори	7	0,96	6,72
Радіатори	8	25,52	204,14
ТМП 500/10	1	416	416
Датчик реле температури	1	0,77	0,77
Реле Боугольца	2	1,5	3
Пристрій скидання тиску	1	1	1
Прокладки керамич.	1710	0,048	82,08
Індикатор температури масла	1	2458	2458
Согласовующее пристрій	1	1,5	1,5
Клапани DN25	6	0,28	1,68
Крани кульові	2	0,65	1,3
Показчик положення	1	1,120	1,120
Реле контрольне	1	1,4	1,4

Ємність	1	17,68	17,68
Всього			1884,32

Цехові витрати включають витрати по утриманню цехового персоналу, амортизація і витрати на утримання будівель, споруд та інвентарю, на поточний ремонт будівель і споруд, витрати з випробувань, дослідів і досліджень, з раціоналізації і винахідництва цехового характеру, на заходи з охорони праці та т. і.

Цехові витрати складають 200% від основної заробітної плати виробничих робітників і рівні

$$\text{ЦР} = (200 \cdot 23623,29) / 100, \quad (7.5)$$

$$\text{ЦР} = 47246,58 \text{ грн.}$$

Адміністративні витрати, які пов'язані з обслуговуванням і управлінням виробництва всього підприємства, поділяються на п'ять груп: витрати на утримання апарату управління; загальногосподарські витрати; податки, збори та інші обов'язкові відрахування, і витрати; непродуктивні витрати; виключаються доходи (не плановані невиробничі доходи підприємства, отримані ним в звітний період).

Адміністративні витрати становлять 300% від основної заробітної плати виробничих робітників і рівні

$$\text{ОЗР} = (300 \cdot 23623,29) / 100, \quad (7.6)$$

$$\text{ОЗР} = 70869,87 \text{ грн.}$$

Виробнича собівартість показує всі витрати підприємства на виробництво продукції і визначається за формулою

$$C_{\text{пр}} = M_{\text{осн}} + I_{\text{пок}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + O_{\text{соц}} + \text{РСЭО} + \text{ЦР} + \text{ОЗР}, \quad (7.7)$$

$$C_{\text{пр}} = 2222,63 + 1884,32 + 23,623 + 12,756 + 13,642 + 70,869 + 47,246 + 70,869,$$

$$C_{\text{пр}} = 4345,955 \text{ тис.грн}$$

Витрати, пов'язані з реалізацією продукції, відносяться до витрат на збут продукції. До їх складу входять витрати на тару, упаковку продукції, доставку її на станцію призначення, а також навантаження в залізничні вагони та інші транспортні засоби.

Витрати на збут складають 1% від виробничої собівартості і рівні

$$\text{ВПР} = (1 \cdot 4345,955) / 100, \quad (7.8)$$

$$\text{ВПР} = 43,459 \text{ тис. грн}$$

Повна собівартість характеризує витрати підприємства не тільки на виробництво, але і на реалізацію продукції і визначається за формулою

$$C_{\text{полн}} = C_{\text{пр}} + \text{ВПР}, \quad (7.9)$$

$$C_{\text{полн}} = 4345,955 + 43,459,$$

$$C_{\text{полн}} = 4389,41 \text{ тис. грн}$$

Прибуток від виробленої продукції складе 25% від повної собівартості

$$\text{Пр} = (25 \cdot 4389,41) / 100, \quad (7.10)$$

$$\text{Пр} = 1097,35 \text{ тис. грн}$$

Оптова ціна ПКРП становитиме повну собівартість плюс прибуток

$$Ц_{\text{опт}} = 4389,41 + 1097,35, \quad (7.11)$$

$$Ц_{\text{опт}} = 5486,76 \text{ тис. грн}$$

Податок на додану вартість (ПДВ) складає 20% від оптової ціни без матеріальних витрат і покупних виробів і дорівнює

$$\text{НДС} = (5486,76 - 4106,95) \cdot 20/100, \quad (7.12)$$

$$\text{НДС} = 275,96 \text{ тис. грн}$$

В кінцевому рахунку, відпускна ціна ПКРП становитиме сума оптової ціни і ПДВ

$$\text{Ц}_{\text{ОП}} = 5486,76 + 275,96, \quad (7.13)$$

$$\text{Ц}_{\text{ОП}} = 5762,72 \text{ тыс. грн.}$$

Всі перераховані вище показники калькуляції собівартості і цін ПКРП заносяться в таблицю 7.4.

#### 7.4 Розрахунок економії виробничих ресурсів

Вирішальною умовою зниження собівартості служить безперервний технічний прогрес. Впровадження нової техніки, вдосконалення технології, впровадження прогресивних видів матеріалів дозволяють значно знизити собівартість продукції. В розробленої конструкції представлені нові технічні рішення, які описані в розділі 7.1. Ці рішення призвели до економії матеріалів. Матеріальні витрати, як відомо, в більшості галузей промисловості займають велику питому вагу в структурі собівартості продукції, тому навіть незначне заощадження сировини, матеріалів, палива і енергії в цілому по підприємству дає великий ефект.

Основною умовою зниження витрат сировини і матеріалів на виробництво одиниці продукції є поліпшення конструкцій виробів і вдосконалення технології виробництва, використання прогресивних видів матеріалів, впровадження технічно обгрунтованих норм витрат матеріальних цінностей.

У даній розробленій та досліджуваній конструкції були заощаджені матеріали кількість і сума їх наведені в таблиці 7.5.

Таблиця 7.4 – Калькуляція собівартості і ціни ПКРП

Стаття	Сума, тис.грн
Сировина і основні матеріали	2222,63
Куплені вироби	1884,32
Основна заробітна плата виробничих робітників	23,623
Додаткова заробітна плата виробничих робітників	12,756
Єдиний соціальний внесок	13,642
Загальновиробничі витрати:	
– витрати на утримання та експлуатацію обладнання	70,869
– цехові витрати	47,246
Адміністративні витрати	70,869
Виробнича собівартість	4345,955
Витрати на збут	43,459
Повна собівартість	4389,41
Прибуток	1097,35
Оптова ціна	5486,76
ПДВ	275,96
Відпускна ціна	5762,72

## 7.5 Аналіз беззбитковості виробництва

Аналіз беззбитковості є ключовим у прийнятті багатьох рішень, включаючи вибір продукції, що випускається, маркетингової стратегії, використуваних виробничих потужностей, встановлення ціни на вироблену продукцію.

Аналіз беззбитковості включає в себе вивчення взаємозамінності наступних факторів:

- обсягу реалізації;
- ціни продукції;
- змінних витрат на одиницю продукції;
- постійних витрат на весь обсяг продукції;
- комбінації товарів, що продаються.

Таблиця 7.5 - Економія на матеріалах

Найменування матеріалу	Норма витрати, т		Ціна за одиницю, тис.грн	Економія	
	базова	нова		в натуральних одиницях, т, (шт.)	в грошовому вираженні, тис.грн
Сталь	33,3	30,2	23,2	3,1	71,92
Мідь	10,63	7,3	68	3,33	226,44
Ввод	ГКТ III-60-110 / 2000	ETA 123/800 /550			372,8
Разом					671,16

Метод досягнення точки беззбитковості полягає у визначенні для конкретної ситуації обсягу продажів, що забезпечує бездоганну діяльність.

Критичний обсяг виробництва ПКРП визначається за формулою

$$N_{кр} = Z_{пост} \cdot 4 / (Ц - Z_{пер}), \quad (7.14)$$

де  $Z_{пост}$  - постійні витрати, тис.грн;  
 $Z_{пер}$  - змінні витрати на одиницю, тис.грн;  
 $Ц$  - ціна одиниці виробу, тис.грн.

$$N_{кр} = 4130,25 \cdot 4 / (5486,76 - 258,841),,$$

$$N_{кр} = 3 \text{ шт.}$$

Обсяг реалізації в грошовому вираженні в критичній точці відповідно дорівнює  $3 \times 5486,76 = 16460,28$  тис. грн. Графічно розглянутий метод представлений на рисунку 7.1. З графіка видно, що точка беззбитковості знаходиться на перетині ліній загальних витрат і виручки, тобто має місце нульовий фінансовий результат при реалізації чотирьох ПКРП, при цьому забезпечується в повній мірі відшкодування загальних витрат. Після реалізації понад чотири ПКРП підприємство буде отримувати прибуток.

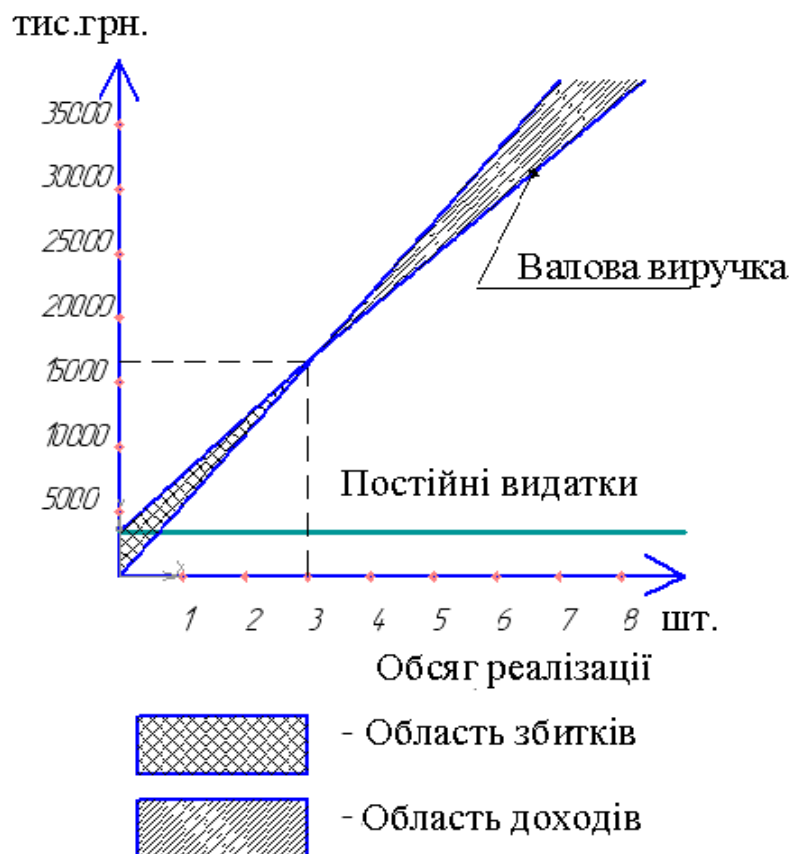


Рисунок 7.1 – Графік беззбитковості

Даний графік дозволяє проаналізувати і відповісти на ряд питань:  
 – при якому рівні виробництва (реалізації) підприємство буде працювати беззбитково;

- скільки одиниць продукції необхідно продати для отримання заданого обсягу прибутку;
- яку слід встановити ціну при певному обсязі реалізації для отримання заданого рівня прибутку.

### 7.6 Розрахунок річного економічного ефекту

Річний економічний ефект від виробництва одиниці спроектованого виробу визначається за формулою

$$\mathcal{E} = \text{Ц}_{\text{б.с.}} \cdot a - (\text{Ц}_{\text{н}} + E_{\text{н}} \cdot \Delta K) \quad (7.15)$$

де  $\text{Ц}_{\text{б.с.}}$  – ціна базового виробу, скоригована з урахуванням фактичних витрат, відповідних розрахункового року впровадження нового виробу, і встановленого нормативу рентабельності по даному виду продукції, тис. грн;

$a$  – коефіцієнт еквівалентності одиниці нового виробу з урахуванням продуктивності, довговічності;

$\text{Ц}_{\text{н}}$  – нижня межа ціни нового виробу, тис. Грн;

$E_{\text{н}}$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$\Delta K$  – додаткові витрати, тис. Грн.

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= 7210,6 \cdot 1 - (5367,52 + 0,15 \cdot 110), \\ \mathcal{E} &= 1826,6 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

Було встановлено, що зменшення перетину ярем магнітної системи та впровадження струмоводів іншої фірми виробника дозволяє не тільки зменшити витрати на електротехнічну сталь та впровадити економію проектного пристрою, але й зменшити експлуатаційні витрати та кількість робітників, необхідних при зборці апарату. Річний економічний ефект від одиниці спроектованого та дослідженого виробу – 1826,6 тис грн.

## ВИСНОВКИ

На підставі аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду в області сучасних засобів регулювання в енергосистемах доказана технічна і економічна ефективність застосування керованих шунтуючих реакторів (КШР). Доведено, що застосування КШР в комплексі з використанням високовольтних ліній електропередач підвищеної пропускної здатності, а також інших пристроїв типу FACTS, дозволяє створювати електропередачі змінного струму із заданою пропускною спроможністю і без обмеження дальності передачі електроенергії при дотриманні всіх необхідних технічних і екологічних вимог.

Дан аналіз результатів розробок нових КШР напругою 110 кВ та вище та експериментальних досліджень, наведені технічні характеристики даних пристроїв, схеми їх включення і способи керування режимами. Розроблений та досліджений пристрій компенсації реактивної потужності має параметри, що задовольняють заданим технічним умовам.

Визначено геометричні розміри всіх обмоток ПКРП, а також геометричні розміри магнітопроводу, що відповідають технічним завданням.

При проведенні економічної ефективності (економії вироблених ресурсів) від виробництва та використання одиниці досліджуваного ПКРП було встановлено, що зменшення перетину ярем магнітної системи та впровадження струмовводів іншої фірми виробника дозволяє не тільки зменшити витрати на електротехнічну сталь, а також зменшити експлуатаційні витрати та кількість робітників, необхідних при зборці апарату. Річний економічний ефект від одиниці спроектованого та дослідженого виробу – 1826,6 тис грн.

В магістерській роботі були проведені дослідження та розрахунки у приміщенні дослідного центру, який обладнаний персональними комп'ютерами з візуальними дисплейними терміналами, та розглянуті заходи

по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії і гігієни праці для робочих місць приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ВДТ, а також заходи з пожежної безпеки та цивільного захисту. Передбачений комплекс заходів з пожежної безпеки і цивільного захисту, щодо навчання працюючого та непрацюючого населення основним нормам поведінки та діям у надзвичайних ситуаціях, підвищує стійкість роботи об'єкта та забезпечує безпеку персоналу в умовах пожеж та інших надзвичайних ситуацій.

У магістерській роботі показано, що швидкодія, яку має КШР, досить для забезпечення безпечної роботи електротехнічного обладнання в умовах існування квазістаціонарних перенапруг. Крім того, були розроблені аналітичні вирази, що враховують особливості реакторів, керованих підмагнічуванням, і їх вплив на струм підживлення і відновлювальну напругу.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Энергетика світу та України. Цифри та факти. – Київ: Українські Енциклопедичні знання, 2005. - 404 с.
2. Кузнецов, В.Г. Тенденції розвитку систем електропостачання / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай // Електротехніка та електроенергетика, – 2000. № 2. – С. 73–76.
3. Кузнецов, В.Г. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж / В.Г. Кузнецов, Ю.І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки НАН України. –2009. Вип 23. – С. 110–117.
4. Кучанський, В.В. Застосування концепції SMART GRID з метою збільшення пропускної здатності лінії електропередачі надвисокої напруги / В.В. Кучанський // Праці ІЕД НАН України. 2020. Вип. 55. – С.40 – 45. <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.040>
5. Бики, М. А. Проектирование электрических реакторов для высоковольтных линий электропередач на постоянном и переменном токе: монография / М.А. Бики // Днепропетровск: Изд-во «Монолит», 2014. – 164 с.
6. Кондратенко, Д.В. Повышение эффективности применения УШР на ЛЭП 500 кВ и ПС 110 КВ электроэнергетической системы: автореф. дис. канд. технич. наук / Д. В. Кондратенко. – Москва, 2015. – 20 с. [http://ied.org.ua/2020\\_55/8.pdf](http://ied.org.ua/2020_55/8.pdf)
7. Долгополов, А.Г. Этапы развития управляемых шунтирующих реакторов для электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения/ А. Г. Долгополов // Энергетик, 2013. №6. – С.55 – 60.
8. Авдишин, А.Г. Трехфазный управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор РТУ-25000/110 / А.Г. Авдишин, А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов и др. // Электротехника 2010 // V симпозиум «Перспективные направления в раз-

витии энергетики и электротехнического оборудования в 2000 – 2010 годах». Сборник докладов, том 1 – М., 1999 г. – с.102-103.

9. Автоматически регулируемые дугогасящие реакторы серии РУОМ / Базыдев Б.И., Брянцев А.М., Долгополов А.Г. и др. // Электротехника 2010 // V симпозиум «Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000 – 2010 годах». Сборник докладов, том 1 – М.: – 1999 г. – с.104–105.

10. Трехфазный управляемый подмагничиванием шунтирующий реактор РТУ– 180000/500 / Брянцев А.М, Долгополов А.Г. и др.// Электротехника 2010 // V симпозиум «Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000 – 2010 годах». Сборник докладов, том 1 – М.: 1999 г. – с. 106–107.

11. Долгополов, А.Г. Система автоматической настройки компенсации дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием // Электротехника 2010 // V симпозиум «Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000 – 2010 годах». Сборник докладов, том 1 – М.: 1999 г. – с. 120–124.

12. Долгополов, А.Г. Релейная защита управляемого шунтирующего реактора 110 кВ, 25 МВА // Электротехника 2010 // V симпозиум «Перспективные направления в развитии энергетики и электротехнического оборудования в 2000 – 2010 годах». Сборник докладов, том 2 – М.: 1999 г. – с.379 – 384.

13. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы – новое электротехническое оборудование / Брянцев А.М., Бики М.А., Долгополов А.Г. и др. // Электротехника, 1999 г., № 7, с.1–8.

14. Долгополов, А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей / А. Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко, С. В. Уколов, В.М. Постолатий // ОАО «Запорожтрансформатор», Украина – 2014.

15. Долгополов, А. Г. Системы автоматической настройки компенсации для управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов // Электротехника – 1999 -№11.
16. Долгополов А. Г. Релейная защита управляемого шунтирующего реактора 110 кВ, 25 МВА // Электротехника –1999 – № 12.
17. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю / Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А. и др. // Монография. С-Пб.: Изд-во С-Пб ИПК, 1999 г.
18. Bryantsev A. et al., Power compensators based on magnetically controlled shunt reactors in electric networks with a voltage between 110 kV and 500 kV. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010. Pp. 239–244.
19. Belyaev A.N., Smolovik S.V. An improvement of AC electrical energy transmission system with series compensation by implementation of Controllable Shunt Reactors. Proceedings of IEEE PES PowerTech 2003, Bologna, Italy.
20. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I. and Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine, 2019. Pp. 261–266.
21. Belyaev A.N. and Smolovik S.V. Steady-state and transient stability of 500 kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors. 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, 2005. Pp. 1–6.
22. Kuchanskyy V.V. The application of controlled switching device for prevention resonance overvoltages in nonsinusoidal modes. Proc. 37th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2017), Ukraine, Kiev, 17-19 April 2017. Pp. 394–399.
23. Eremia M., Liu C.C., Edris A.A. Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence, Wiley: IEEE Press, 2016. Pp. 1063.

24. Кузнецов, В.Г. Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський // Технічна електродинаміка, 2013. № 6. – С. 51–56.
25. Kuchansky V.V. Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes. – 2019. IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). Pp. 122–125.
26. Управляемые реакторы.//Электротехника (спец. выпуск), – 1991. – № 2.
27. Чуніхін, А. А. Апарати високої напруги / А. А. Чуніхін, М. А. Жаворонков // Вища школа, М.: – 1985. – 432с.
28. Стернин, В. Г. Сухі струмообмежуючі реактори / В. Г.Стернин, А. К. Карпенській // Енергія, М.: 1965. – 256 с.
29. Тихомиров, П. М. Розрахунок трансформаторів/ П. М. Тихомиров // Вища школа, М.: 1986. – 529с.
30. Керівництво по експлуатації РТУ-63 / 110. Запоріжтрансформатор, 2010. – 30 с. 3.:
31. Бабіков, М. А. Електричні апарати електроенергетичних систем високої напруги. Частина 3/ Бабіков, М. А.// Госенергоіздат, М.: – 1963. – 736с.
32. Панченко, В. В. Розрахунок і конструювання електричних апаратів високої напруги/ В. В.Панченко // Вища школа, М.: –1991. – 247с.
33. Лейтес, Л. В. Електромагнітний розрахунок трансформаторів і реакторів/ Л. В. Лейтес.// Енергія, М.: – 1981. – 392с.
34. РД 16.431-88. Трансформатори силові. Розрахунок електродинамічної стійкості обмоток при короткому замиканні.
35. РД 16.452-88. Трансформатори силові масляні з системами охолодження. Тепловий розрахунок обмоток.
36. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах / М.А. Бики, Е.Н. Бродовой, А.М. Брянцев и др.// Электричество, 1994. – № 4.

37. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей высокого напряжения / М.А. Бики, Е.Н. Бродовой, А.М. Брянцев и др. // Электротехника, 1994. – № 9. – С. 40– 42.

38. Шескин, Е.Б. Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различного типа и сравнение их технических характеристик / М.В.Дмитриев, Г.А. Евдокун, А.С.Карпов, Р.Н.Николаев, Е.Б. Шескин // Энергетик. – 2011. – №3. – С. 27– 30.

39. Шескин, Е.Б. Однофазное автоматическое повторное включение на линиях с управляемым шунтирующим реактором / М.В. Дмитриев, А.Г. Долгополов, Г.А.Евдокунин, Д.В. Кондратенко, Е.Б. Шескин // Энергетик. – 2012. – № 4. – С. 19 – 24.

40. Шескин, Е.Б. Вопросы быстродействия управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора / М.В.Дмитриев, Е.Б. Шескин // Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика глазами молодежи»: сборник трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – Т .2. – С. 161– 166.

41. Шескин, Е.Б. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / Е.Б. Шескин и др.; под ред. Г.А. Евдокунина. – СПб: Родная Ладога, 2013. – 280 с.

42. Тихонов, О.І. Використання бібліотеки моделювання магнітного поля при розрахунку реактора з алюмінієвої стрічки / О.І. Тихонов, А.В. Іванов // Вісник ІГЕУ. – 2009. – Вип. 3. – С. 25–28.

43. Тихонов, О.І. Програмування чисельного експерименту з використанням кінцево-елементної моделі магнітного поля в об'єктах електромеханіки / О.І. Тихонов, Ю.Б. Казаков // ГОУВПО «Іванівський державний енергетичний університет імені В.І. Леніна ». – Іваново, 2008.

44. Карпов, В.Н. Разработка численно-аналитических моделей управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов для анализа электромагнит-

ных процессов в нормальных и аварийных режимах электрических сетей : Автореф. дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / В. Н. Карпов– М., 2013 – 18 с.

45. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сб. статей/ Под ред. А.М. Брянцева// Знак, М.: – 2004. –264 с. Ил.

46. . Matlab. The Language of Technical Computing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mathworks.com/products/matlab>

47. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. — Москва: ДМК Пресс, 2008. — 768 с.: ил. — ISBN-13: 978-5-94074-424-5.

48. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — Москва: ДМК Пресс. — 288 с.: ил.

49. Лучко А.Р., Ебадиан М. Принципы математического моделирования динамических процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах в SimPowerSystems (Matlab)// Электричество, 2008. — N 3. — С. 70–75. — ISSN 0013-5380.

50. Журавель, М. О. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) : зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами (спеціалізаціями) – «Електротехнічні системи електроспоживання», «Електричні машини і апарати», «Електромеханічні (електротехнічні) системи та комплекси», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні та електронні апарати», «Електромеханічне обладнання електроємних виробництв» : Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. 35 с.

51. Жидецький, В. Ц. Основы охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-617-07-0134-3

52. ГОСТ 12.0.003-74\* Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Введ. 1976-01-01]. М. : Госстандарт СССР, 1974. 4 с. (Межгосударственный стандарт)

53. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

54. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Державний Стандарт України)

55. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устроюства електроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. – К. : Мінпраці України, 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>.

56. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. К. : Держнагляд охорони праці, 1997. 97 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

57. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. К. : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

58. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [На заміну ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 ; чинний від 2014-05-30]. К. : МОЗ України, 2014. 37 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14>. (Державні санітарні норми та правила)

59. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. Режим доступу: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>. (Директива)

60. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-

1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. К. : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. (Нормативно-правовий акт охорони праці)

61. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. К. : МОЗ України, 1998. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. (Державні санітарні правила та норми)

62. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. (Державні санітарні норми)

63. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартів безпеки труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [На заміну ГОСТ 12.1.005-76 ; чинний з 1989-01-01]. М. : МОЗ СРСР, 1988. 50 с. (Міждержавний стандарт)

64. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Державні будівельні норми України)

65. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Державні будівельні норми України)

66. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99>. (Державні санітарні норми)

67. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с.

Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>. (Державні санітарні норми)

68. Катренко Л. А., Кіт Ю. В., Пістун І. П. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум. [Текст] : Навч. посіб. – Суми: Університетська книга, 2009. – 540 с.

69. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. [На заміну СНиП 2.09.04-87 ; чинний з 2011-10-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 31 с. (Державні будівельні норми України)

70. ДК 003:2010. Класифікатор професій. [На заміну ДК 003:2005 ; чинний від 2010-01-11 ; станом на 15.02.2019]. К. : Держспоживстандарт України, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va327609-10>.

71. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. К. : МВС України, 2014. 91 с. (Нормативний акт пожежної безпеки)

72. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87 ; чинний з 01.01.2016]. К. : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Державний Стандарт України)

73. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Державний Стандарт України)

74. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми)

75. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. К. : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Державні будівельні норми)

76. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. К. : МВС України, 2018. 23 с. (Правила)

77. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Редакція від: 03.07.2020. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>. (Закон України)

78. Покропивний, С. Ф. Економіка підприємства. Підручник в 2-х томах / За редакцією С. Ф. Покропивного //Хвиля – Прес, К.: 1995 – 680 с.

## Додаток А

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ  
УПРАВЛЯЕМОГО ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА  
ПРОГРАММА 589.0216758.00015-01, ВИТ, 1989

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

УДАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТОКА К.З. 1.80

ТАБЛИЦА А.1 - ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

```

-----
! НОМЕР ! ЧИСЛО КОНЦЕНТРОВ ! ЧИСЛО ПРЕССУЮЩИХ !
! СТЕРЖНЯ ! НА СТЕРЖНЕ ! КОЛЕЦ НА СТЕРЖНЕ !
!-----+-----+-----!
! 1. ! 1. ! 1. !
!-----+-----+-----!
-----

```

ТАБЛИЦА А.2 - ПАРАМЕТРЫ КОНЦЕНТРОВ (РАЗМЕРЫ В ММ)

```

-----
!НО- ! СРЕД- ! РАДИ- ! ЧИСЛО ! ШИРИ- ! ЧИСЛО ! ЧИСЛО ! ВИД ОПОРЫ : !
!МЕР ! ИМЯ ! НИЙ ! АЛЬ- ! ! НА ! ! ! 0-НЕТ ОПОРЫ !
! ! ! ! НЫЙ ! СТОЛ- ! ! ГРУПП ! ГРУПП ! 1-ОПОРА НА !
! КОН- ! КОН- ! ДИА- ! ! БОВ ! ПРО- ! ! ! СТЕРЖЕНЬ !
! ЦЕН- ! ЦЕН- ! МЕТР ! РАЗ- ! ! КЛА- ! КАТУ- ! КАНА- ! 2-ОПОРА НА !
! ТРА ! ТРА ! ! МЕР ! ПРО- ! ДОК ! ШЕК ! ЛОВ ! ЖЕСТКИЙ !
! ! ! ! ! КЛА- ! ! ! ! ЦИЛИНДР !
! ! ! ! ! ДОК ! ! И ЕК ! ! 3-НА КОНЦ. !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----!
! 6. ! ОБМ1 ! 1727. ! 123. ! 40. ! 40. ! 2. ! 2. ! 0. !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----!

```

```

-----
!НО- ! СУММАР- ! ЧИСЛО ! ! ЧИСЛО ! РАДИАЛЬНЫЕ ! РАДИАЛЬНЫЕ !
!МЕР ! НАЯ ! ! ! ! ! ! !
! ! ! ОПОРНЫХ ! ШИРИНА ! ОСЕВЫХ ! РАЗМЕРЫ ! РАЗМЕРЫ !
! КОН- ! ТОЛЩИНА ! ! ! ! ! ! !
! ЦЕН- ! ! РЕЕК ПО ! РЕЕК ! КАНАЛОВ ! ОСЕВЫХ ! СЛОЕВ !
! ТРА ! ОПОРНЫХ ! ! ! ! ! ! !
! ! ! ОКРУЖ- ! ! ВНУТРИ ! КАНАЛОВ ! КОНЦЕНТРА !
! ! РЕЕК И ! НОСТИ ! ! !-----+-----!
! ! ЦИЛИНД- ! ! ! КОНЦЕН- ! 1 ! 2 ! 2 ! 3 !
! ! РОВ ! ! ! ТРА ! ! ! ! !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----!
! 6. ! 0. ! 32. ! 25. ! 0. ! 0. ! 0. ! 0. !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----!

```

```

-----
!НО- ! ВЫСОТА ! ВЫСОТА ! КОЭФ- ! МИНИМАЛЬ ! ПРИЗНАК ! ПРИЗНАК ! ТЕМПЕ !
!МЕР ! ! ! ФИЦИ- ! НОЕ ! ! ! РАТУ- !
! ! ВЕРХ- ! НИЖНЕЙ ! ЕНТ ! ! МАТЕРИАЛА ! МАРКИ ! РА !
! КОН- ! НЕЙ ! ! ! ДАВЛЕНИЕ ! ! ! !
! ЦЕН- ! ! КОНЦЕ- ! ПРЕС- ! ! ПРОВОДА ! КАРТОНА ! ПРОВО !
! ТРА ! КОНЦЕ- ! ВОЙ ! СОВ- ! ПРЕССОВ- ! ! ! ДА !
! ! ВОЙ ! ! КИ ! КИ, ! 1-МЕДЬ ! 1-Б ! !
! ! ! ИЗОЛЯ- ! ! ! ! ! 2-В (УП- ! ПЕРЕД !
! ! ИЗОЛЯ- ! ЦИИ ! ! МПА ! ! ЛОТ- ! !
! ! ЦИИ ! ! ! ! ! ! НЕН- ! К.З. !
! ! ! ! ! ! ! ! НЫЙ ! !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----!
! 6. ! 163. ! 163. ! .50 ! 2.0 ! 1. ! 1. ! 105 !
!-----+-----+-----+-----+-----+-----!

```

ТАБЛИЦА А.3 - ПАРАМЕТРЫ ПРЕССУЮЩИХ КОЛЕЦ

НОМЕР КОЛЬЦА	НОМЕР КОНЦЕНТРА ПОД ПРЕССУЮЩИМ КОЛЬЦОМ	
	ПЕРВОГО	ПОСЛЕДНЕГО
1.	6.	6.

ТАБЛИЦА А.4 - ПАРАМЕТРЫ ТИПОВ КАТУШЕК И ЕМКОСТНЫХ КОЛЕЦ (РАЗМЕРЫ В ММ)

НОМЕР ТИПА	ПРИЗНАК СХЕМЫ	ЧИСЛО ВИТКОВ	ЧИСЛО ЛЕВЫХ ПРОВОДОВ	ЧИСЛО ПРАВЫХ ПРОВОДОВ	ВЫСОТА	ТОЛЩИНА	ТОЛЩИНА
1	0-КАТУШКА	7.850	3.00	9.00	0.010	0.98	
2	0-КАТУШКА	6.850	3.00	9.00	0.960	0.98	

НОМЕР ТИПА	ШИРИНА	ВЫСОТА	ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ	ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ	ТОЛЩИНА	ТИП БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИИ
1	67.00	10.00	1.	1.0	0.01	1.
2	5.60	16.00	1.	1.0	0.96	1.

ТАБЛИЦА А.5 - ПАРАМЕТРЫ ГРУПП КАТУШЕК И ЕК

НОМЕР ТИПА	1.	2.							
КОЛИЧЕСТВО КАТУШЕК (ЕК) В ГРУППЕ	25.	41.							

ТАБЛИЦА А.6 - ПАРАМЕТРЫ ГРУПП КАНАЛОВ

ВЫСОТА КАНАЛА, ММ	6.0	6.0	4.0				
КОЛИЧЕСТВО КАНАЛОВ В ГРУППЕ	25.	35.	6.				

ТАБЛИЦА А.7 - ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕТВЕЙ ПО УЧАСТКАМ

НОМЕР КОНЦЕН- ТРА	НОМЕР НАЧАЛЬНОЙ КАТУШКИ УЧАСТКА	ШАГ ПО НОМЕРАМ КАТУШЕК	ЧИСЛО КАТУШЕК В УЧАСТКЕ	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ
1.	1.	1.	1.	1.
1.	2.	1.	1.	2.
2.	1.	1.	1.	3.
2.	2.	1.	1.	4.
3.	1.	1.	1.	5.
3.	2.	1.	1.	6.
4.	1.	1.	1.	7.
4.	2.	1.	1.	8.
5.	1.	1.	1.	9.
5.	2.	1.	1.	10.
6.	1.	1.	1.	11.
6.	2.	1.	36.	12.
6.	38.	1.	1.	13.
7.	1.	1.	1.	14.
7.	2.	1.	1.	15.
8.	1.	1.	1.	16.
8.	2.	1.	1.	17.
8.	3.	1.	1.	18.
8.	4.	1.	1.	19.
8.	5.	1.	1.	20.
8.	6.	1.	1.	21.
8.	7.	1.	1.	22.
8.	8.	1.	1.	23.
8.	9.	1.	1.	24.
8.	10.	1.	1.	25.

ТАБЛИЦА А.8 - ТОКИ ВЕТВЕЙ ПО РЕЖИМАМ, А

НОМЕР РЕЖИМА	ОБОЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ				
		1	2	3	4	5
3.	КЗ	4333.	4524.	10849.	11404.	18418.

НОМЕР РЕЖИМА	ОБОЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ				
		6	7	8	9	10
3.	КЗ	19449.	25578.	28124.	29369.	35347.

НОМЕР РЕЖИМА	ОБОЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ				
		11	12	13	14	15
3.	КЗ	32516.	4000.	26764.	22702.	27964.

НОМЕР РЕЖИМА	ОБОЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМА	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ				
		16	17	18	19	20
3.	КЗ	9880.	46631.	72320.	84640.	89124.

!НОМЕР! !РЕЖИМА!	!ОБОЗНАЧЕНИЕ! РЕЖИМА	НОМЕР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕТВИ				
		! 21 !	! 22 !	! 23 !	! 24 !	! 25 !
! 3. !	! КЗ !	! 89315. !	! 85355. !	! 74169. !	! 50004. !	! 11156. !

ТАБЛИЦА А.9 - ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

!ИМЯ! !РЕЖИМ!	!ЗАКЛЮЧЕ- НИЕ!	!НЕОБХО- ДИМАЯ!	!НЕОБ- ХОДИ- МОЕ!	!СИЛА НА	!СИЛА НА	!НАИ- ШАЯ	!НАИ- ШЕЕ	!ЗАКЛЮ- ЧЕНИЕ!		
!КОН- ЦЕН- ТРА !	!О РАДИ- АЛЬНОЙ !	!СИЛА !	!ДАВЛЕ- НИЕ !	!ВЕРХ- НЮЮ !	!НИЖ- НЮЮ !	!СИЛА В !	!ДАВЛЕ- НИЕ !	!ОБ !		
!ПРО- ЧНО- СТИ !	!ТОЙ- ЧИ- ВОС !	!ПРЕС- СОВКИ !	!ПРЕС- СОВКИ !	!ОПОРУ !	!ОПОРУ !	!ТРЕ !	!В КОН- ЦЕНТРЕ !	!УС- ТОЙЧИ !		
!ТИ !	!(КН) !	!(МПА) !	!(КН) !	!(КН) !	!(КН) !	!(КН) !	!(МПА) !	!ВОСТИ !		
!ОБМ1! !ОБМ1!	!КЗ !ИТОГ	!ДА ! !ДА !	!ДА ! !ДА !	!548.5! !548.5!	!6.40! !6.40!	!46.2! !46.2!	!488.4! !488.4!	!3677.1! !3677.1!	!42.88! !42.88!	!ДА ! !ДА !

ТАБЛИЦА А 10 - НАИБОЛЬШИЕ СИЛЫ(КН) НА ПРЕССУЮЩИЕ КОЛЬЦА И  
ЯРМОВЫЕ БАЛКИ

!ЯРМОВАЯ! !БАЛКА !	!ВЕРХНЯЯ!	!НИЖНЯЯ !	ПРЕССУЮЩИЕ КОЛЬЦА				
	!БАЛКА !	!БАЛКА !	! 1 !	! 2 !	! 3 !	! 4 !	! 5 !
!ПРИ К.З. !	! 46.2 !	! 488.4 !	! 46.2 !				
!ПРЕССОВКА!	! 548.5 !	! 548.5 !	! 548.5 !				