

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. ПОТЕБНІ Ю.М.

Електротехніки та енергоефективності

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Заходи зі зменшення втрат електричної енергії в точках підключення ЛЕП енергетичних систем

Виконав: студент 5 курсу, групи ЕТ-17-1бз  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

Бут О.А.

Керівник викл. Лапікова О.І.

Консультант проф. Артемчук В.В.

Рецензент доц. Коваленко В.Л.

Запоріжжя

2022 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М. \_\_\_\_\_  
Кафедра електротехніки та енергоефективності  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.



В.Л. Коваленко

“ 23 ” травня 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу студенту

Буту Олександрю Анатолійовичу

**1. Тема роботи:** Заходи зі зменшення втрат електричної енергії в точках підключення ЛЕП енергетичних систем

**Керівник роботи:** викл. Лапікова О.І., консультант проф. Артемчук В.В.  
затверджені наказом ЗНУ від « 17 » січня 2021 року № 91 - с \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом роботи:** 15 травня 2022 року








**3. Вихідні дані до роботи:** Поточний тариф за споживання електроенергії; мережі до 500 кВ; існуюча нормативна документація з обслуговування електроустановок; шунтуючий реактор одно- та трифазний

**4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано розробити):**

Вступ. 1) Використання керованих шунтуючих реакторів для електричних мереж; 2) Розробка заходів щодо підвищення ефективності застосування КШР; 3) Розробка заходів щодо обмеження комутаційних впливів на напівпровідникові перетворювачі при включенні КШР до мережі

**5. Перелік графічного матеріалу (рекомендовано):** 1) Електромагнітна схема фази КШР; 2) Магнітна система трифазного КШР із підмагнічуванням; 3) Електромагнітна схема трифазного триобмотувального КШР; 4) Схема з'єднань КШР 500 кВ однофазного виконання; 5) Схема з'єднань КШР 110 кВ

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Башлій В.С., доцент		

7. Дата видачі завдання

01.02.2022 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Використання керованих шунтуючих реакторів для електричних мереж	01.03.22	
2	Розробка заходів щодо підвищення ефективності застосування КШР	05.04.22	
3	Розробка заходів щодо обмеження комутаційних впливів на напівпровідникові перетворювачі при включенні КШР до мережі	15.05.22	

Студент



(підпис)

Бут О.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник/консультант роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Башлій В.С.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка Бута О.А. Заходи зі зменшення втрат електричної енергії в точках підключення ЛЕП енергетичних систем містить 68 сторінок, 26 рисунки, 1 таблиця, 28 джерел, 1 додаток.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Лапікова О.І. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2022 р.

У представленій роботі розглянута можливість зменшення втрат електричної енергії в точках підключення ліній електропередач енергетичних систем шляхом використання керованих шунтуючих реакторів, зокрема КШР 110 кВ та 500 кВ в електричній мережі. Оцінено вплив керованого реактора 500 кВ на процеси, що протікають у циклі ОАПВ лінії з КШР. Врахування впливу КШР ґрунтується на аналізі представлених аналітичних виразів, що дозволяють оцінити струм підживлення дуги від КШР та напругу 50 Гц, що відновлюється, на відключеній фазі після згасання дуги КЗ.

Ключові слова: ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, КЕРОВАНІЙ ШУНТУЮЧИЙ РЕАКТОР; НАПРУГА; ПЕРЕНАПРУГА; СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ .....	8
2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНОГО ШУНТУЮЧОГО РЕАКТОРА .....	28
2.1 Аналіз напруг, що виникають, на виводах обмотки управління при включенні КШР в однофазному виконанні .....	32
2.2 Аналіз напруг, що виникають, на виводах обмотки управління при включенні КШР у трифазному виконанні .....	36
3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ОБМЕЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ НА НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ КШР ДО МЕРЕЖІ .....	41
3.1 Рекомендації щодо збільшення швидкості набору попереднього підмагнічування .....	47
Висновки.....	53
Перелік посилань .....	55
Додатки .....	58

## ВСТУП

На даний час досвід випуску керованих підмагнічувачаючих шунтуючих реакторів (КШР) налічує понад 80 одиниць на різні класи напруги (35-500 кВ). У силу значної протяжності ліній електропередач і специфіки побудови електричних мереж в Україні, керовані шунтуючі реактори знаходять широке застосування на нашій території.

Створення та будівництво ліній електропередач (ЛЕП) високої напруги супроводжувалось розробкою і керованих реакторів [1 - 6]. В даний час існують методики та стандарти організацій з проектування ліній електропередачі 500 кВ із класичним набором лінійного обладнання [7 - 9], проте застосування КШР на лінії додає свою специфіку таким розрахункам [10]. Проведення відповідних розрахунків спеціалістами проектних організацій ускладнено без детального знання особливостей конструкції УШР, алгоритмів його роботи та наявності моделі реактора. Крім того, слід зазначити, що не тільки неправильна оцінка співвідношення параметрів лінії та параметрів керованого реактора, а й неправильна розробка алгоритмів керування КШР може призвести до небажаних наслідків, до яких можна віднести не лише неуспішне автоматичне повторне включення (АПВ) лінії 500 кВ з КШР, а також пошкодження обладнання, що входить до складу реактора.

Практика експлуатації КШР на лінії свідчить про те, що застосування універсальних алгоритмів управління, які традиційно закладаються в автоматизу реактора, можуть призводити до неуспішного трифазного АПВ (ТАПВ) лінії. Пов'язано це з тим, що необхідний рівень попереднього підмагнічування для включення КШР до мережі досягається набагато більше часу, ніж час безструмової паузи ТАПВ. Збільшення часу ТАПВ лінії може призводити до порушення динамічної стійкості електричної системи. Таким чином, розробка алгоритму управління КШР, що дозволяє знизити час забезпечення готовності реактора до включення, або розробка заходів, що дозволяють відмовитися від заборони заводу-виробника на включення

реактора без попереднього підмагнічування, є важливими завданнями.

Досвід застосування керованих реакторів 110 кВ дозволяє стверджувати, що на початкових етапах застосування КШР вони встановлювалися виключно з метою стабілізації напруги в точці підключення [11 - 14]. Сьогодні шляхом застосування КШР фахівці мережевих компаній намагаються вирішувати питання, пов'язані зі стійкістю рухомого навантаження [15, 16]. Таким чином, можливість збільшення швидкодії реактора є важливим завданням.

Метою роботи є розробка способів та алгоритмів більш ефективного використання КШР в електричній мережі на основі математичного моделювання керованого підмагнічуванням шунтуючого реактора для дослідження комутаційних та динамічних режимів роботи КШР у складі електроенергетичної системи.

# 1 ВИКОРИСТАННЯ КЕРОВАНИХ ШУНТУЮЧИХ РЕАКТОРІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В даний час в електроенергетиці багатьох країн велике значення надається створенню керованих або гнучких ліній електропередач, що є складовою «інтелектуальних» (Smart Grid) мереж із пристроями FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [13]. Для оптимального ведення режимів таких енергосистем, необхідні високоефективні засоби регулювання потоків як активної, так і реактивної потужності.

Для управління режимами по напрузі та реактивної потужності поряд з традиційним застосуванням генераторів, синхронних і статичних компенсаторів, комутованих реакторів і конденсаторних батарей в останнє десятиліття все ширше використовуються нові пристрої – керовані шунтуючі реактори (КШР) [14]. Трансформаторне виконання для відкритої установки на будь-який клас напруги з можливістю плавного регулювання споживаної реактивної потужності дозволяє встановити КШР у будь-якій частині енергосистеми та забезпечити стабілізацію напруги, оптимізацію перетоків реактивної потужності, підвищення пропускної здатності електропередач, зниження втрат, числа комутацій вимикачів та дій РПН трансформаторів [15]. Поєднання КШР із паралельно встановленою батареєю статичних конденсаторів (БСК) дозволяє забезпечити як повільно регульовану компенсацію (споживання) реактивної потужності, а й її видачу відповідно до потужності БСК при розвантаженні КШР до режиму холостого ходу [16 – 18].

За попередній до теперішнього часу період (до 2014 р.) у найближчих країнах виготовлено та введено в експлуатацію понад вісімдесят керованих реакторів напругою від 6 до 500 кВ. Основні типи керованих шунтуючих реакторів, їх потужність, ким виготовлені і впроваджені, зазначені в таблиці 1.1.



Таблиця 1.1 – Характеристики керованих шунтуючих реакторів різних класів напруги впроваджених в енергосистемах деяких країн

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Виробник	Де введено, країна	Ко л - во
Регулювання перемиканням відпайок	Одна обмотка с РПН	180 МВА, 330 кВ	Західна Європа	Білорусь	1
Трансформаторний типу (КШРТ) – потужність тиристорних ключів для керування дорівнює номінальній потужності пристрою	Трансформатор з напр. к.з. 100 % та тиристорні ключі на номінальну потужність УШР	50 МВА, 420 кВ	Індія	Індія	1
		60 МВА, 230 кВ	Україна	Ангола	1
		25 МВА, 110 кВ	Росія та Білорусь	росія	6
Керовані підмагнічуванням стрижнів магнітопроводу - потужність управління становить близько 1% номінальної потужності УШР	С 2 обмотками, суміщ.. СО и ОУ	180 МВА, 500 кВ	Мокшан. ел. завод	росія	1
	С одной обмоткой	3,3 МВА, 6-10 кВ	Україна	Монголія	3
	З 2 обмотками, суміщ.. ОУ и КО	10-25 МВА, 35 – 110 кВ	Україна	Казахстан, Білорусь, Литва	35
	с 3 окремими обмотками	63-180 МВА 110-500 кВ			46

За принципом дії трифазні повільнорегульовані реактори для компенсації реактивної потужності можна розділити на три класи – керовані підмагнічуванням магнітопроводу, трансформаторного типу (КШРТ) та реактори з перемиканням відпайок (аналогічно РПН трансформаторів).

Керовані шунтуючі реактори трансформаторного типу (КШРТ) і є силовий трансформатор з напругою короткого замикання 100 %, на вторинній обмотці якого встановлені зустрічно-паралельні тиристорні ключі на повну потужність реактора [19 - 21]. Аналогічно відомою схемою статичного тиристорного компенсатора (СТК) [22, 23] 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 повільно регулюється зміною кута управління вентилів з відповідною появою вищих гармонік у струмі, що споживається. Для

зниження рівня цих гармонік із боку нижчої напруги встановлюються фільтри.

Таким чином, схема КШРТ зводиться до схеми СТК, електромагнітної частини якого поєднані індуктивності фаз з трансформатором зв'язку з вищою напругою. Це дозволяє, на відміну від СТК, підключати КШРТ до будь-якого класу напруги, проте тиристорні ключі великої потужності запобігають підвищеній вартості виготовлення, монтажу та експлуатації.

Керовані підмагнічуванням реактори типу РТУ на напруги від 35 до 500 кВ понад 15 років випускає ВАТ «Запоріжтрансформатор». В даний час на ВАТ «Запоріжтрансформатор» розробляється КШР напругою 500 кВ. Основною відмінністю цього КШР від виробів ВАТ «Запоріжтрансформатор» є суміщення у первинній мережевій обмотці функцій споживання реактивної потужності та підмагнічування магнітопроводу. При цьому тиристорний перетворювач випрямленої напруги підключається до нейтралів «зірок» розщепленої обмотки мережної реактора, між секціями якої циркулюють постійні складові струму підмагнічування. Наявність у розщеплених гілках мережної обмотки цього реактора основного споживаного струму промислової частоти, випрямленого струму підмагнічування та вищих гармонік зумовлює додаткові вимоги до конструкції, джерела підмагнічування, схеми з'єднань трансформаторів струму, алгоритмів релейного захисту та автоматики.

У свою чергу номенклатура КШР, що випускаються заводом «Запоріжтрансформатор», має ряд схемотехнічних виконань залежно від класу напруги, потужності реактора та вимог замовника щодо складу обладнання, виду охолодження, алгоритмів управління, числа вбудованих трансформаторів струму, функцій моніторингу тощо. При однаковому принципі дії основні відмінності між модифікаціями КШР серії РТУ для різних класів напруги (35...110 кВ, 220...330 кВ, 500...750 кВ) полягають у схемі електромагнітної частини та у складі системи підмагнічування.

Для КШР напругою 35 або 110 кВ порівняно невеликої потужності (10-25 МВА) техніко-економічно кращим є виконання електромагнітної частини з

двома обмотками - мережевою обмоткою (МО) і обмоткою управління (ОУ) за схемою подвійного розімкнутого трикутника, що поєднує 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 трансформаторами живлення, підключеними до висновків ОУ реактора через високовольні запобіжники. Як правило, такі КШР працюють паралельно з БСК і можуть на вимогу замовника мати загальну систему автоматичного керування (САУ) реактором та секційованою 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 – мережевою (СО), компенсаційною (КО) та управління (ОУ), кожна з яких виконує свою функцію відповідно до споживання реактивної потужності, компенсації (замикання в «трикутнику») основних вищих гармонік та управління (підмагнічування стрижнів магнітопроводу). У комплект поставки входять два однакові трифазні трансформатори з тиристорним перетворювачем (ТМП), з яких основний підключається через вимикач 10 кВ до висновків компенсаційної обмотки реактора, а резервний – до розподілу 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 до швидкодії - час повного набору або скидання потужності за час не більше 0,3 сек., тобто. лише 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 напругу. Цей ТМП підключається до зовнішнього живлення 6 або 10 кВ забезпечуючи форсовані режими набору або скидання потужності, а також попереднє підмагнічування реактора при включеннях. Крім того, виконання електромагнітної частини цих реакторів може бути трифазним, так і однофазним для зменшення транспортних габаритів і маси.

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

Реактори 220 - 330 кВ також підмагнічували від єдиного ТМП із зовнішнім живленням, а крім того оснащувалися вбудованими струмообмежуючими дроселями (при напрузі к.з. між МО і КО порядку 20 %) та заземлюючими фільтрами типу ФМЗО на виводах компенсаційної обмотки. Тепер дроселі (при напрузі к.з. більше 50 %) та фільтри відсутні, а основне підмагнічування забезпечується безпосередньо від реактора з повним резервуванням ТМП.

Перші КШР напругою 500 кВ, встановлені на ПС «Таврійська», мали оригінальне двообмотувальне виконання електромагнітної частини з трьох фаз РОДУ-60000/500 з однофазними перетворювачами в приставних баках на кожній фазі. Незважаючи на компактну конструкцію та п'ятирічний досвід експлуатації такі реактори більше не випускаються через властиві їм недоліки – відсутність резервування та низьку ремонтпридатність системи підмагнічування, а також незадовільну схему попереднього підмагнічування [17]. Тепер всі реактори цього класу напруги, як трифазного, так і однофазного виконання, мають описану вище триобмотувальну електромагнітну частину та систему підмагнічування з трьох трифазних ТМП однакової потужності (1 МВА) та габаритів.

Основним призначенням керованих шунтуючих реакторів є регулювання напруги та реактивної потужності. В КШР з підмагнічуванням для плавного регулювання споживаної реактивної потужності, а значить і напруги в точці підключення, використовується насичення сталі магнітопроводу постійним потоком, що створюється випрямленим струмом у

спеціальній обмотці управління. Фактично для потужного високовольтного трансформаторного пристрою використовується принцип магнітного підсилювача, коли в міру насичення стрижнів магнітопроводу знижується індуктивність розташованої на них обмотки, і також пропорційно знижується її індуктивний опір. У міру зниження або зворотного підвищення індуктивного опору мережної обмотки реактора пропорційно зростає або зменшується її струм, а отже, і споживана потужність КШР в діапазоні від холостого ходу (близько 1%) до номінальної потужності або допустимого навантаження (100 – 120 %). Таким чином, використання ділянок сталі магнітопроводу КШР в режимах від ненасиченого стану до глибокого насичення, близького до граничного, коли магнітна проникність наближається до магнітної проникності повітря, що дозволяє отримати діапазон повільного регулювання реактивної потужності з кратністю понад 100.

З великої кількості запропонованих раніше схемотехнічних рішень і конструкцій реакторів, що підмагнічуються, - з поздовжнім, поперечним, кільцевим підмагнічуванням, з магнітним полем, що обертається, 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 та ОУ, розташованих на одному магнітопроводі, необхідні дві умови – зустрічне включення секцій цих обмоток (тоді на виводах обмотки управління не буде змінної напруги) та створення окремих шляхів для змінного та постійного потоків, що забезпечується бронестрижневою конструкцією магнітопроводу з розщепленими стрижнями фаз.

Схема однієї фази керованого реактора з бронестрижневим магнітопроводом та двома напівстрижнями, на яких розташовані секції мережевої обмотки та обмотки управління, до якої у свою чергу підключено джерело постійної або випрямленої напруги для підмагнічування наведена на рисунку 1.1, а. Постійний потік підмагнічування, створюваний струмом ОУ, замикається між центральними напівстрижнями, а змінний потік – через

верхні та бічні ярма магнітопроводу, складаючись у напівстрижнях із постійним.

На розрахункових осцилограмах для реактора 500 кВ потужністю 180 МВА показаний струм мережевої обмотки в залежності від струму обмотки управління при наборі потужності від мінімальної (холостий хід) до номінальної, якою відповідають значення струмів 200 А в ЗІ і 1,9 кА в ОУ (масштаби явищ у програмі NRAFT, що використовується, наводяться в лівому верхньому куті кожного з виведених явищ в кА) (рис. 1.1, б). Залежність між струмами практично лінійна.

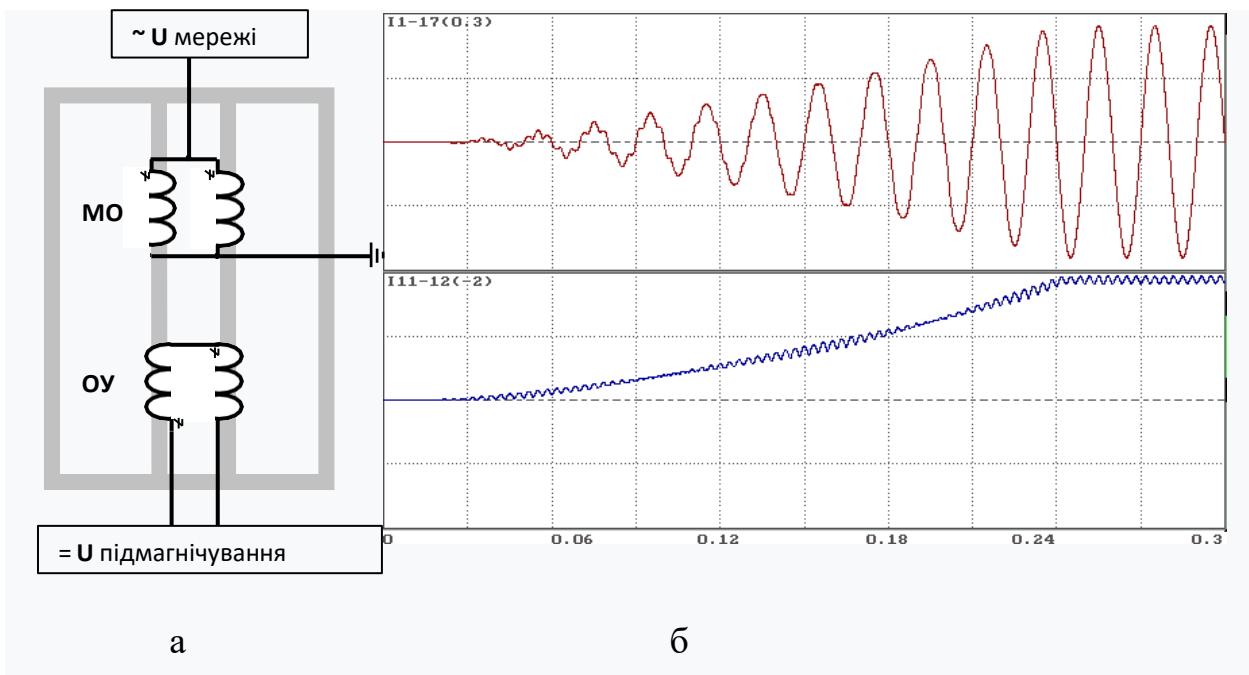


Рисунок 1.1 – Електромагнітна схема фази КШР (а) та розрахункова осцилограма набору потужності для УШР потужністю 180 МВА 500 кВ (б)

В області мінімальних навантажень у струмі МО 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 УШР, що не істотно впливає на синусоїдність напруги в точці його підключення ( трохи більше 0,1...0,2 %).

Слід зазначити, що така форма струму МО УШР забезпечується тільки за умови повної компенсації споживаного струму найбільш потужної третьої

гармоніки і кратних їй. Для трифазних реакторів це забезпечується наявністю вторинної обмотки, з'єднаної в трикутник, у якій і замикаються, не виходячи в мережу, гармоніки, кратні трьом. Практично це реалізується у конструкціях КШР, що випускаються, окремою додатковою компенсаційною обмоткою (КО) для триобмотувальних реакторів, або спеціальними схемами з'єднань вторинної обмотки управління, наприклад, у подвійний розімкнений трикутник для двообмотувальних реакторів напругою 35...110 кВ.

Режим набору потужності УШР 500 кВ зі струмом в трикутнику КО на верхній осцилограмі наведений на рис. 1.2, а. На відміну від силових трансформаторів, струму 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 навантаженні живлення практично дорівнює нулю, як і інші вищі гармоніки в струмі МО. Це пояснюється тим, що реактори серії РТУ проектується з номінальною потужністю так званому напівграничному режимі насичення, коли постійний потік номінального підмагнічування по черзі в кожному напівстержні магнітопроводу витісняє змінний потік рівно на час половини періоду частоти мережі (рис. 1.2 б). В результаті комбінації послідовності в часі напівперіодів синусоїдального струму, викликаних почерговим насиченням напівстрижнів, струм КШР, що споживається, в номінальному режимі також не містить вищих гармонік.

При подальшому наборі потужності в область навантаження (і граничного насичення магнітопроводу) в струмі КО знову утворюється третя, а в ЗІ - інші вищі гармоніки. Осцилограми із сумарними індукціями у напівстрижнях магнітопроводу наведено на рисунку 1.2 б, з якого видно, що в номінальному напівграничному режимі навантаження час знаходження індукції кожного півстрижня за перегином характеристики насичення сталі (близько 2 Тл) становить половину періоду промислової частоти мережі.

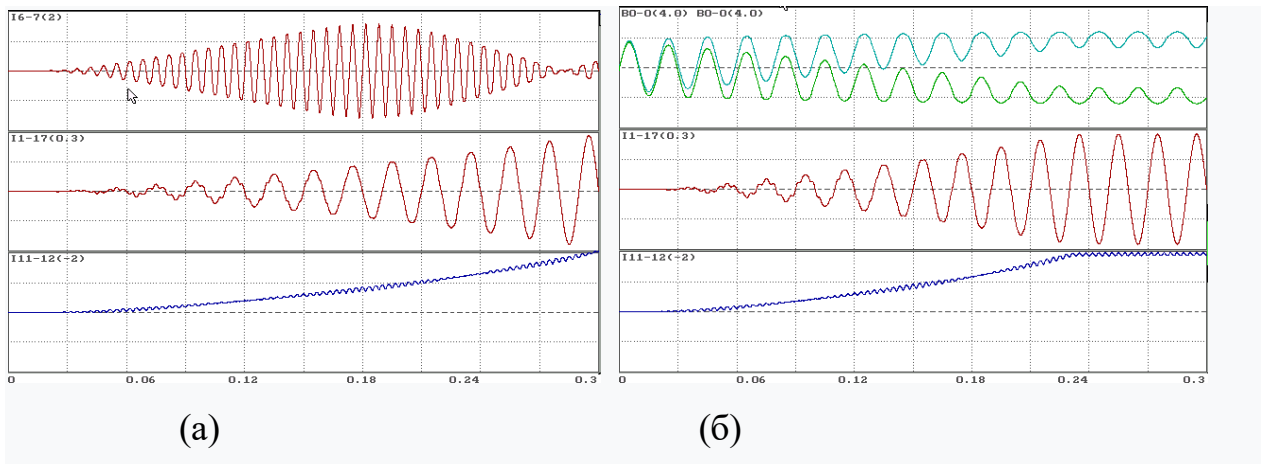


Рисунок 1.2 – Зміна струму в КО(а) та зміна індукції у напівстрижнях магнітопроводу(б) реактора при наборі потужності КШР

З'єднання компенсаційної обмотки в трикутник, що, як було зазначено раніше, необхідно з точки зору компенсації гармонік кратних трьох, у разі установки КШР в лінію призводить до підживлення струму дуги у разі однофазного КЗ на лінії. Дана обставина істотно позначається на виборі варіанта, який забезпечує успішну реалізацію циклу однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) ПЛ з урахуванням керованого реактора. Відомі дослідження, присвячені участі шунтуючих реакторів у циклі ОАПВ [20] в силу значних конструктивних відмінностей керованих та некерованих ШР не дозволяють оцінити вплив КШР на процеси, що протікають у мережі в зазначеному режимі. У літературі зустрічаються результати проведених досліджень щодо можливості успішного застосування керованих реакторів у циклі ОАПВ лінії та представлені аналітичні вирази, що дозволяють оцінити струм підживлення дуги від КШР та напругу 50 Гц, що відновлюється, на відключеній фазі після згасання дуги КЗ.

Конструктивні особливості КШР 220-500 кВ. На рисунку 1.3 показано магнітну систему трифазного КШР, а на рисунку 1.4 наведено електромагнітну схему трифазних триобмотувальних КШР серії РТУ напругою 220 кВ і вище. Стержні всіх фаз магнітопроводу розділені на два півстрижні, на кожному з яких розміщуються секції компенсаційної обмотки, з'єднаної в трикутник. Зверху секцій КО розташовуються секції обмотки управління, включені в



кожній фазі послідовно-зустрічно до обмоток МО і КО (початки секцій обмоток відзначені зірочкою). Висновки всіх фаз ЗУ з'єднуються паралельно та підключаються до висновків перетворювачів ТМП.

Кожна фаза мережевої обмотки виконується паралельними гілками з введенням усередину і намотується поверх вторинних обмоток з охопленням обох напівстержнів. МО з'єднується у схему «зірка із заземленою нейтраллю», підключається до шин підстанції або до лінії та забезпечує споживання реактивної потужності відповідно до заданого закону регулювання.



Рисунок 1.3 – Магнітна система трифазного КШР із підмагнічуванням

Компенсаційна обмотка з номінальною напругою 10 кВ, з'єднана в трикутник, виконує дві основні функції – виключення із споживаного мережевого струму гармонік, кратних трьом, та живлення основного трансформатора з перетворювачем, що забезпечує необхідний рівень підмагнічування магнітопроводу через ОУ. Оскільки встановлена потужність ТМП становить 1 МВА (номінальний первинний струм менше 60 А), а споживана в номінальному режимі не перевищує 300 кВА, компенсаційна

обмотка розраховується на тривале протікання максимального струму третьої гармоніки та виконується зменшеного перерізу (якщо на КЗ не передбачається іншого додаткового навантаження, наприклад, при можливому підключенні конденсаторної батареї).

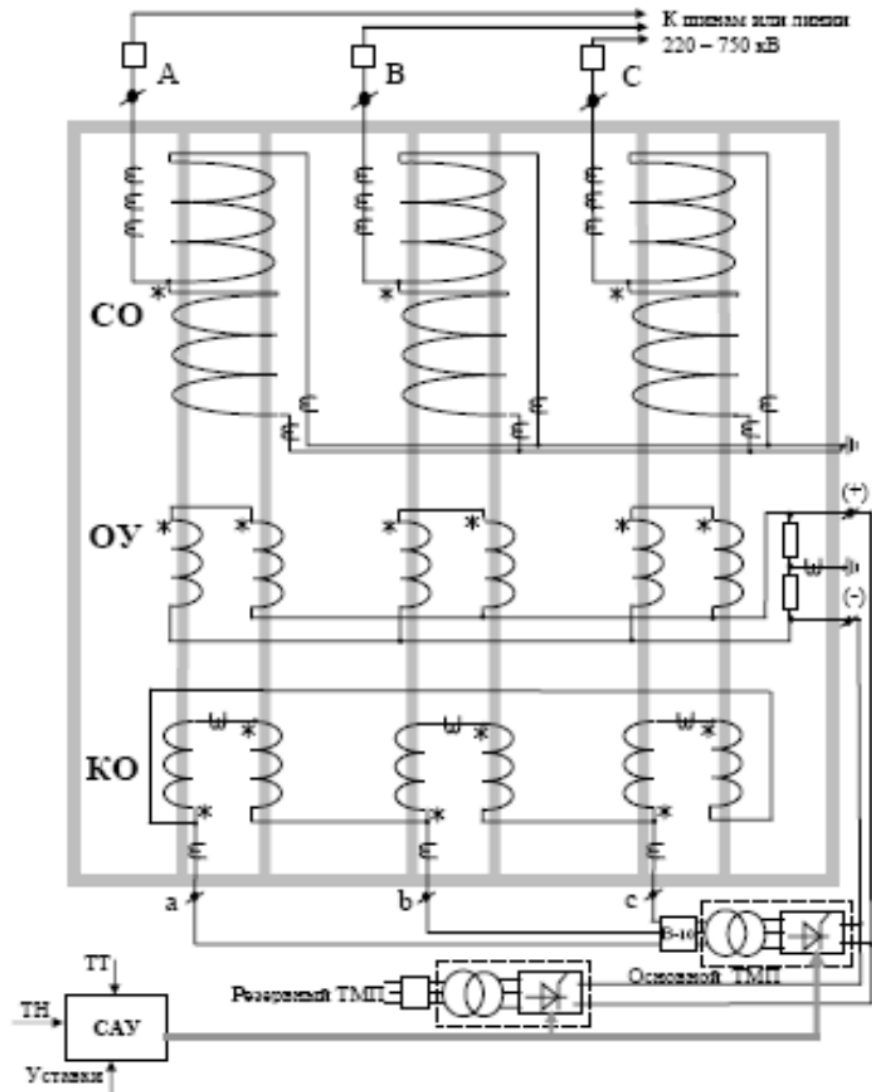


Рисунок 1.4 – Електромагнітна схема трифазного триобмотувального КШР:

САУ – система автоматичного керування; ТМП – трансформатор із перетворювачем; МО – мережна обмотка, ОУ – обмотка управління, КО – компенсаційна обмотка

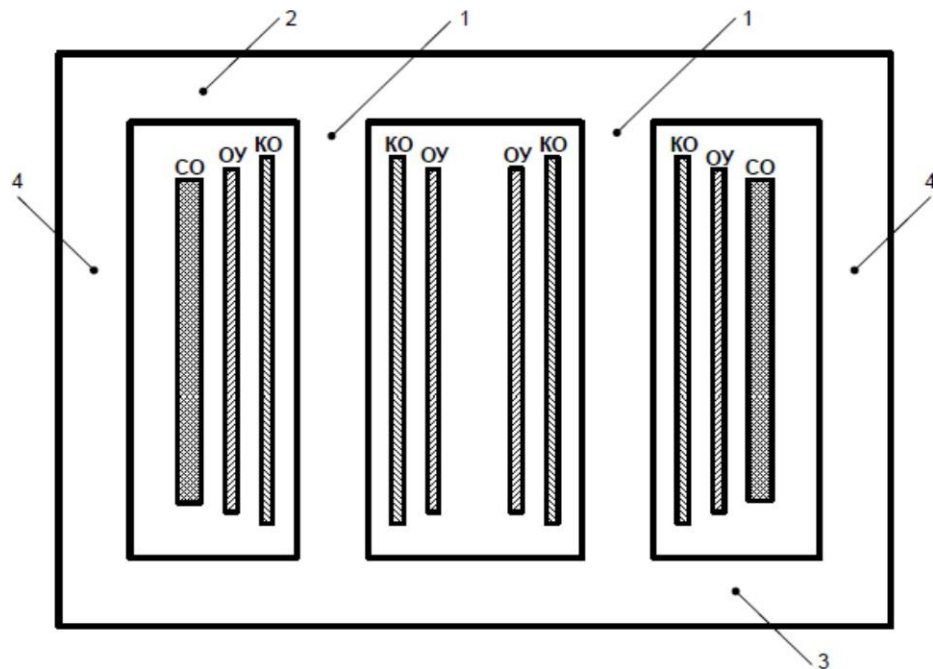


Рисунок 1.5 – Розріз магнітної системної однієї фази УШР 500 кВ

Завдяки зустрічному включенню своїх секцій обмотки управління має екіпотенційні висновки (+) і (-), на яких в нормальних і перехідних режимах відсутня змінна напруга від обмоток МО або КО. При закритих тиристорах основного або резервного ТМП випрямлена напруга на цих виводах ОУ також відсутня, відповідно відсутня струм підмагнічування в ОУ, тому магнітна система знаходиться в ненасиченому стані, а КШР – як холостого ходу, як звичайний трансформатор.

По мірі відкриття тиристорів і зростання випрямленої напруги наростає струм підмагнічування в секціях обмотки управління, внаслідок чого відбувається насичення стрижнів магнітопроводу та зростання споживаного струму реактора.

Тиристори основного ТМП (а за його профілактики чи несправності – резервного) управляються від цифрової системи автоматичного управління (САУ) за вибраним алгоритмом стабілізації напруги чи підтримки заданого значення споживаної реактивної потужності. Для реалізації цих алгоритмів у САУ подаються сигнали від трансформаторів напруги та струму, а також уставки регулювання, які задаються персоналом за вказівкою диспетчера

енергосистеми. Після вибору режиму та завдання необхідних вставок втручання персоналу в автоматичну роботу реактора не потрібно.

Як зазначалося раніше, реактори напругою 500 кВ і вище відрізняються, по суті, лише кількістю ТМП (доданий форсувальний перетворювач динамічних режимів) та можливістю однофазного виконання електромагнітної частини. У разі зменшуються транспортні габарити і є можливість замовлення резервної фази. Однак загальна площа, що займається на підстанції чотирма фазами типу РОДУ-60000/500, як і їхня вартість, істотно вища, ніж для електромагнітної частини реактора 500 кВ трифазного виконання типу РТДУ-180000/500. Крім того, в РТДУ напругою 220 кВ і вище є вбудовані трансформатори струму на лінійних виводах трикутника КО, а в РОДУ єдина група ТТ КО залишається в трикутнику, що збирається повітряною ошиновкою.

Повну схему електричних з'єднань реактора 500 кВ однофазного виконання наведено на рисунку 1.6. Магнітна система не показана, але, як і на рисунку 1.4, зображено той же основний склад обладнання КШР, що поставляється, - електромагнітна частина (чотири РОДУ), система підмагнічування з трьох ТМП (у складі трансформатора ТМ і тиристорного перетворювача ПП) і система управління (САУ)). Крім того, до складу поставки входять датчики випрямленого струму та напруги (ДПТ та ДПН).

На схемі, наведеній на рисунку 1.6, представлено наступне обладнання, що входить до складу комплексу КШР серії РТУ-180000/500-УХЛ1:

1. РОДУ-600000/500 – електромагнітна частина РТУ-180000/500;
2. ТМД-трансформатор динамічних режимів, 1000 кВА, 6(10)/1,1 кВ;
3. ТМО – основний трансформатор статичних режимів 1000 кВА, 10/0,40 кВ;
4. ТМР - резервний трансформатор статичних режимів 1000 кВА, 10/0,40 кВ;
5. ППО, ППС, ППД – напівпровідникові трифазні керовані перетворювачі;



резервування струмових ланцюгів та використання декількох видів РЗ для цієї обмотки.

Датчик постійного струму включається в розсічення будь-якого полюса ошиновки випрямленого струму між групами ТМП і РОДУ і служить для контролю та обмеження в САУ підмагнічування струму від будь-якого працюючого ТМП. Як згадувалося вище КШР 500 кВ можуть бути виготовлені як у трифазному виконанні потужністю 180 МВА, так і у вигляді групи однофазних реакторів потужністю 60 МВА.

Як відмінні особливості двох виконань можна відзначити різну кількість вбудованих шунтуючих опорів в обмотці управління. Шунтуючі опори необхідні для гасіння енергії запасеної в реакторі у разі аварійного обриву зв'язку (одного полюса) між обмоткою управління та перетворювальним блоком при роботі реактора в режимі відмінному від холостого ходу. Розрахунки показали, що найбільш ефективною величиною опору для виключення небезпечних впливів на обмотку управління є 21 Ом (з виводом із середини).

Таким чином, при трифазному виконанні електромагнітної частини встановлюється один опір 21 Ом, а у разі однофазного виконання - кожна фаза КШР має опір 21 Ом, що призводить до триразового зниження сумарного опору шунтуючого реактора до 7 Ом.

Крім основного складу обладнання КШР (ЕМЧ, САУ, ТМП) для лінійних КШР при необхідності можуть застосовуватися компенсаційний реактор (КР), що встановлюється в нейтраль мережевої обмотки УШР, а також додаткові вимикачі пофазнокеровані, що встановлюються між фазами компенсаційної обмотки. Необхідність КР та вимикачів КО обумовлена участю ЛУШР у циклах АПВ, однак їх вибір має здійснюватися лише на підставі розрахунків неповнофазних режимів, а не застосовуватися повсюдно.

Трансформатори всіх ТМП мають однакові потужності та схеми з'єднань «зірка з нулем – трикутник», що дозволяє включати їх первинну обмотку як із ізольованою, так і із заземленою нейтраллю. Для ТМП, що

підключаються до компенсаційної обмотки реактора, частіше використовується глухе заземлення нейтралі первинної обмотки живильного трансформатора, що забезпечує великі струми замикання на землю і чутливість МТЗ як міжфазним, так і однофазним коротким замиканням.

Вбудовані в окремий масляний бак тиристорні перетворювачі ТМП виконуються за відомою «схемою Ларіонова» з додатковою гілкою, що шунтує, застосовується при роботі трифазного випрямляча-інвертора при роботі на індуктивне навантаження.

Необхідно відзначити, що використання регулювання потужності в КШР трансформаторно-перетворювального блоку малої потужності (1 % номінальної потужності реактора), накладає на обладнання, що входить до складу реактора і на алгоритми його управління, особливі вимоги при застосуванні КШР на лінії. Проведені на ряді мережевих об'єктів експерименти за участю та під керівництвом автора показують, що комутація реактора може вивести з ладу напівпровідниковий перетворювач ТМП. У разі експлуатації КШР на шинах ПС вказана проблема була вирішена досить просто – шляхом реалізації режиму попереднього підмагнічування перед включенням реактора в мережу, що виключає появу небезпечних для напівпровідникового перетворювача перенапруження на виводах обмотки керування. З огляду на те, що установка КШР у лінію 500 кВ передбачає його участь у циклі трифазного автоматичного повторного включення (ТАПВ), час безструмової паузи якого досить мало (0,5-5 сек), застосування режиму попереднього підмагнічування, алгоритм реалізації якого закладається в автоматику реактора, може забезпечити необхідного результату. Ця обставина в кращому разі призведе до неуспішного ТАПВ лінії 500 кВ, а в гіршому – до пошкодження обладнання реактора та необхідності аварійного виведення КШР, а можливо, і лінії з роботи. Зустрічаються дослідження процесів, що протікають у реакторі в циклі ТАПВ лінії, а також запропоновані заходи, що дозволяють ефективніше використовувати реактори у зазначеному режимі роботи ПЛ.

Конструктивні особливості УШР 35 – 110 кВ. Для КШР 35-110 кВ як основне конструктивне виконання був обраний варіант з двома обмотками – мережевою та обмоткою управління (рис. 1.7). На схемі, наведеній на рисунку 1.7, представлено наступне обладнання, що входить до складу КШР серії РТУ-25000/110-УХЛ1:

1. РТДУ – електромагнітна частина реактора типу РТДУ-25000/110 із вбудованими ТТ;
2. ПП – напівпровідниковий трифазний перетворювач ППМ-200/750;
3. САУ – система автоматичного керування реактора;
4. ОМ - трансформатор перетворювача типу ОМ-200/22/0,22;
5. ТМО – трансформатор початкового підмагнічування ТМО-2,5/0,4/0,012;
6. Запобіжник типу ПКТ 101-10-31,5-12,5;
7. УЗП - пристрій захисту від перенавантаження;
8. ДПТ – датчик постійного струму;
9. ДПН - датчик постійної напруги.

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

Обмотка управління такого КШР також складна: схема з'єднань ОУ є «подвійним розімкненим трикутником» і поєднує в собі кілька функцій [26]:

- 1) забезпечує підключення до висновків "+" / "-" обмотки малопотужного (приблизно 1% від встановленої потужності КШР) трансформаторно-перетворювального блоку, що здійснює циркуляцію випрямленого струму в ОУ;
- 2) забезпечує компенсацію гармонік кратних трьох за рахунок з'єднання обмоток управління в трикутник;
- 3) забезпечує живлення трансформаторно-перетворювальних блоків



безпосередньо від обмотки керування за рахунок їх підключення до висновків змінної напруги ОУ;

4) забезпечує суміщення в одній вторинній обмотці функцій компенсаційної обмотки та обмотки управління, що дозволяє не лише зменшити кількість обмоток, а й знизити витрати активних матеріалів. Зупинимося докладніше на описі обладнання, що входить до складу РТУ-25000/110-УХЛ1.

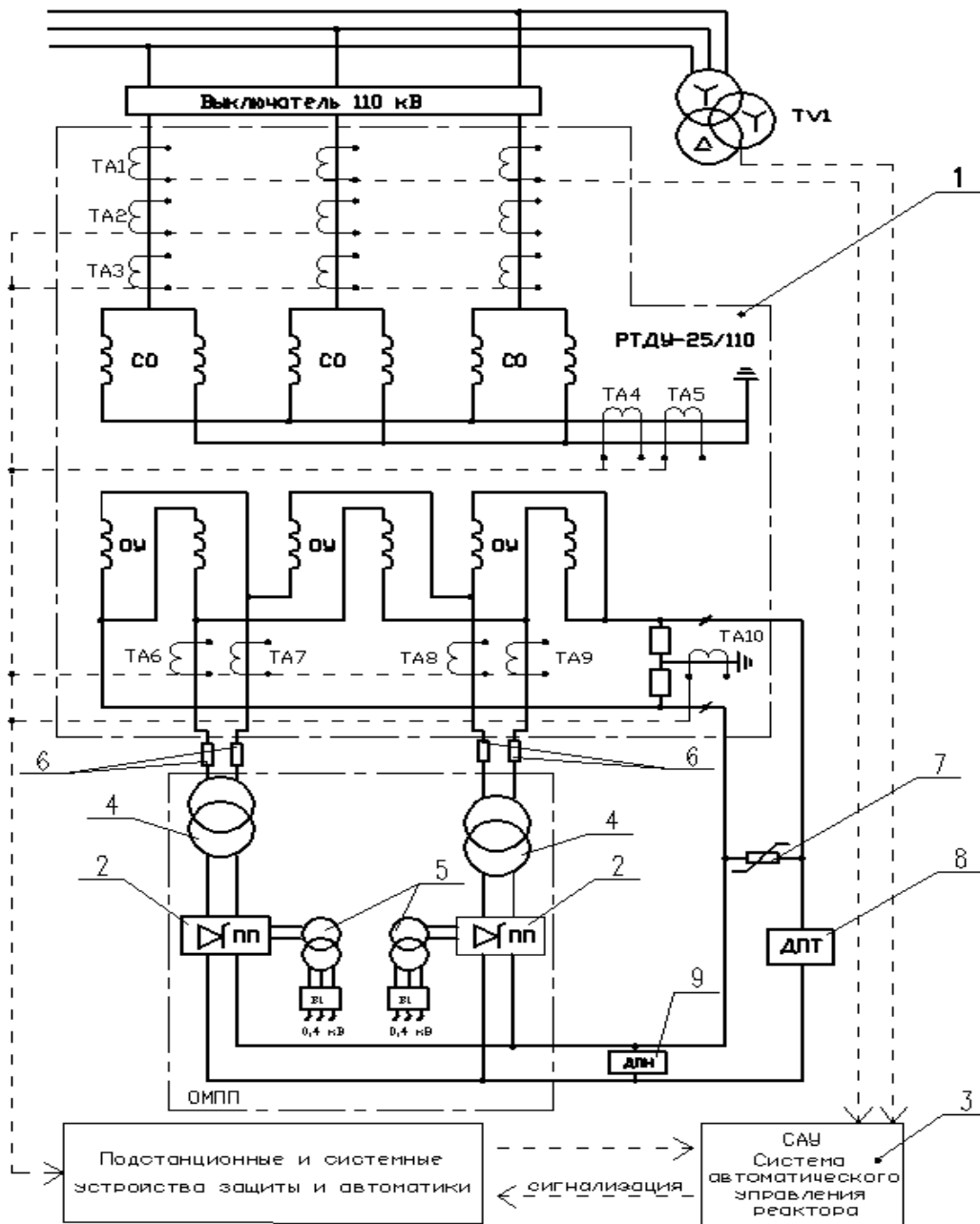


Рисунок 1.7 – Схема з'єднань КШР 110 кВ

Електромагнітна частина, що складається з магнітопроводу бронестержневого типу з шістьма напівстержнями (по два на фазу). Конструкція фази такого реактора показана на рисунку 1.8.

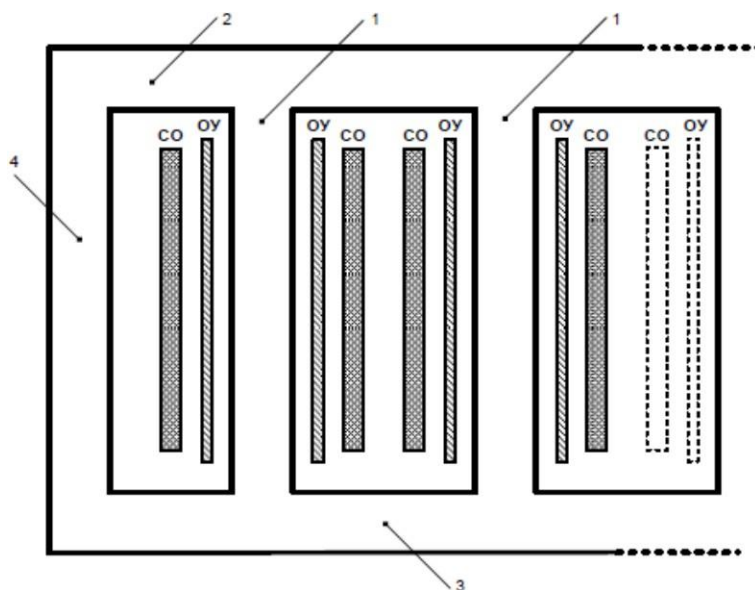


Рисунок 1.8 – Розріз магнітної системи фази УШР 25 МВА 110 кВ (показана крайня ліва з трьох фаз трифазного магнітопроводу). Окрема компенсаційна обмотка відсутня

Магнітна система фази складається з двох напівстрижнів (1), верхнього (2) та нижнього (3) горизонтальних ярем та двох бічних ярем (4). На кожному півстержні розташовуються секції обмотки управління ОУ та мережевої обмотки СО. На відміну від УШР 220-500 кВ, мережева обмотка в УШР 35-110 кВ має дві секції, кожна з яких розміщена на своєму напівстержні.

Два однофазні трансформаторно-перетворювальні блоки типу ОМ-200/22/0.22, які підключаються через запобіжники до висновків змінної напруги обмотки управління та забезпечують регулювання споживаної реактором реактивної потужності в повному діапазоні.

Два трансформатори початкового (попереднього) підмагнічування типу ТМО-2,5/0.4/0.012, які підключаються до трифазної мережі 380 В. Дані трансформатори мають зв'язок з боку низької напруги з однофазними перетворювачами типу ППМ-200/750 та необхідні для забезпечення

початкового підмагнічування реактора перед його включенням.

4. Цифрова система автоматичного управління, у якій реалізовані алгоритми управління потужністю реактора.

Між висновками «+»/«-» обмотки управління всередині бака реактора встановлюються два резистори, точка з'єднання яких заземляється. Резистор необхідний на випадок обриву з'єднання між обмоткою управління та полюса перетворювача для забезпечення гасіння запасеної в обмотці управління енергії.

У роботі КШР використовується інформація, що отримується з датчиків постійного струму та напруги (ДПТ та ДПН відповідно). На підставі цієї інформації відбувається налаштування обмеження випрямленого струму перетворювачів у різних режимах роботи КШР, а також необхідні обмеження у разі перевантаження перетворювача та трансформатора.

На сьогоднішній день в енергосистемах різних країн експлуатуються понад 30 од. КШР 110 кВ описаної вище конструкції. Практика їх експлуатації, показали, що одним з найістотніших недоліків КШР 110 кВ є низький час набору та скидання повної потужності реактора, що становить близько 4 с (для КШР 500 кВ – 0 - 3 сек). Істотним режимним обмеженням для підстанцій з одностороннім живленням є неможливість одночасного включення лінії, підстанції та керованого реактора 110 кВ у мережу без його попереднього підмагнічування, що, як і для випадку з КШР 500 кВ, пов'язано з можливістю появи на виводах перетворювача небезпечної перенапруги.

## 2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КЕРОВАНОГО ШУНТУЮЧОГО РЕАКТОРА

Однією з основних переваг КШР з підмагнічуванням є можливість його управління (регулювання споживаної ним потужності) за рахунок малої потужності, що підключається до обмотки управління трансформаторно-перетворювального блоку (ТМП), який становить всього 1 % номінальної потужності реактора. Ця обставина істотно покращує економічні показники керованого реактора. Однак наявний досвід експлуатації УШР показує, що ТМП порівняно малої потужності одночасно є основним слабким місцем керованого підмагнічуванням реактора, що шунтує.

На підставі статистики аварійних відключень КШР 500 кВ можна дійти висновку, що більшість нештатних відключень реактора пов'язані з ушкодженням перетворювального блоку КШР. Експертиза тиристорів ПП на заводі-виробнику показує, що його вихід з ладу пов'язаний з перевищенням допустимої напруги тиристора. Аналіз аварійної статистики говорить про те, що найбільше разів КШР відключався через вихід з ладу перетворювального блоку, що входить до складу керованого реактора 500 кВ, встановленого на лінії. Перенапруга на виводах обмотки управління виникають у випадках, коли напруга на реакторі зникає, а потім з'являється з мінімальним інтервалом часу.

Як один із прикладів описаної вище ситуації можна навести режим ТАПВ лінії із встановленим КШР (рис. 2.1). Відомо, що при ТАПВ пошкоджена ЛЕП незалежно від виду КЗ (двофазне, трифазне або ін.) відключається трьома фазами з обох кінців лінії та по закінченні заданої безструмової паузи повторно включається з одного боку, а потім, якщо відключення не сталося, і з іншого боку .

У тому випадку, якщо в циклі ТАПВ лінії 500 кВ бере участь керований реактор, а повторна подача напруги на лінію відбувається на КШР без його попереднього підмагнічування, на виводах ОУ КШР може виникнути

перенапруга, здатна вивести з ладу напівпровідниковий перетворювач, що у свою чергу призведе до аварійного відключення реактора. Таким чином, повторне включення в роботу лінії стає неможливим.

Метою даного розділу є аналіз причин появи небезпечних для напівпровідникового перетворювача перенапруги, дослідження на розробленій імітаційній моделі КШР рівнів їх впливу, а також розробка заходів, що дозволяють підвищити надійність ПП. Крім того, у цьому розділі представлені заходи, що забезпечують успішну роботу ректора у циклі трифазного автоматичного повторного включення лінії 500 кВ.

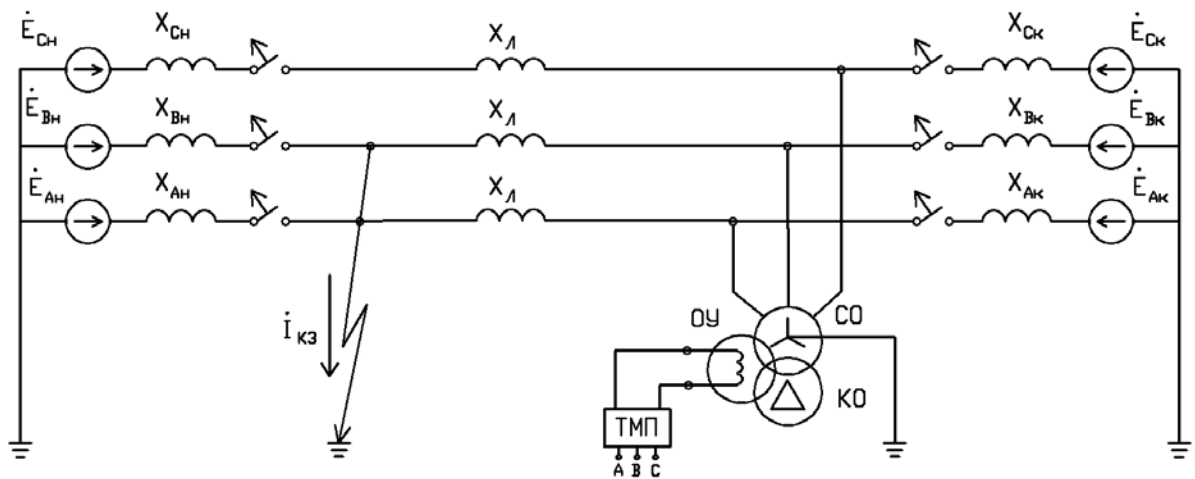


Рисунок 2.1 – ТАПВ лінії 500 кВ із встановленим КШР

Схема з'єднання КШР крім основних елементів, таких як обмотки, стрижні, ярма тощо, містить активний опір, який встановлюється між висновками обмотки управління, виконаний таким чином, що його середня точка заземлена. Призначення зазначеного резистора, номінальне значення якого становить 21 Ом, полягає в заземленні обмотки управління, організації захисту від однофазних КЗ, а також гасіння на ньому запасеної в обмотці управління енергії при обриві ланцюгів підмагнічування.

Вибір номінального значення резистора виконаний таким чином, щоб забезпечити ефективне гасіння енергії в ОУ, а також мінімізувати перенапругу, що з'являється на ньому при включенні КШР без попереднього

підмагнічування.

На даний час в електроенергетичних мережах знайшли широке застосування керовані реактори як у трифазному виконанні, так і однофазному, які збираються в групу із трьох зовнішньою повітряною ошиновкою. Основною відмінністю зазначених виконань з погляду оцінки досліджуваних на чолі комутаційних перенапруг є те, що на відміну від трифазної конструкції, в КШР, що складається з трьох однофазних реакторів, резистивний опір встановлюється між висновками обмотки управління кожної з фаз. На рисунках 2.2 та 2.3 представлені спрощені електричні схеми з'єднання обмотки управління та напівпровідникового перетворювача для керованого реактора трифазного та однофазного виконання відповідно.

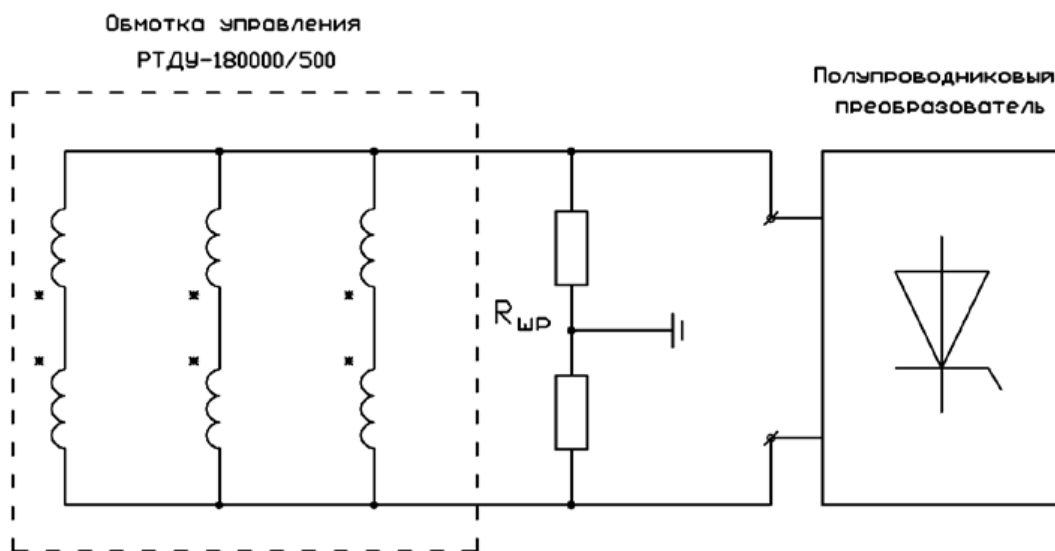


Рисунок 2.2 – Спрощена електрична схема з'єднань обмотки керування та напівпровідникового перетворювача для КШР типу РТДУ-180000/500

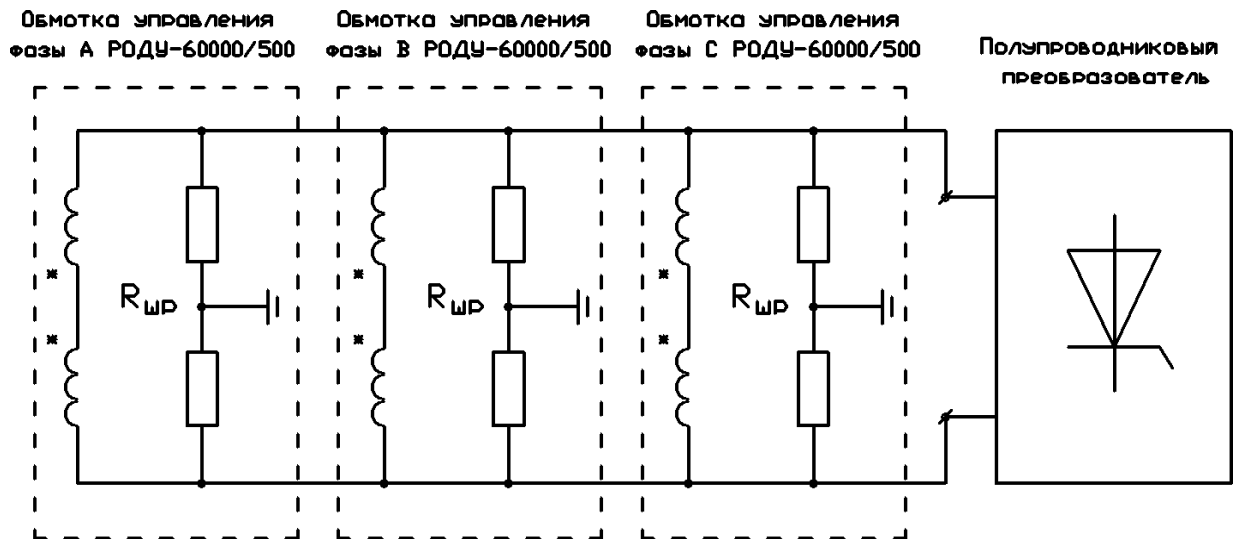


Рисунок 2.3 – Спрощена електрична схема з'єднань обмотки керування та напівпровідникового перетворювача для КШР типу 3хРОДУ-60000/500

На підставі представлених схем можна відзначити, що еквівалентний опір вбудованих резисторів щодо висновків обмотки управління для КШР, що складається з групи однофазних реакторів, становить 7 Ом.

Основною причиною появи небезпечних перенапруг на виводах ОУ при включенні КШР без підмагнічування є різноспрямованість залишкових індукцій у напівстрічках фази КШР. Можна зробити висновок, що не тільки напрямки індукцій у напівстріжнях реактора, але і їх значення істотно впливають на величину комутаційних перенапруг, що виникають. Варто відзначити, що струм в обмотці керування на момент включення відсутня, тобто.  $i_{ou} = 0$ , в той час як залишкові індукції у напівстріжнях реактора можуть мати різні значення.

Нижче буде проведено аналіз, що виникають на виводах ОУ та підключених до неї резисторах, відхилень напруги при включенні КШР до мережі. У розрахунках враховуватимемо різні величини залишкових індукцій в полустрижнях реактора, і навіть те, що імпульси управління напівпровідникового перетворювача заблоковані, тобто. відсутня шлях замикання примусових складових струму включення до ОУ через ПП.

## 2.1 Аналіз напруг, що виникають, на виводах обмотки управління при включенні КШР в однофазному виконанні

Використовуючи комп'ютерні моделі КШР, проаналізуємо виникаючі на обмотці управління та шунтуючих резисторах ОУ перенапруг при включенні КШР у мережу. Як зазначалося вище, розрахунки будуть проведені для різних величин залишкових індукцій у напівстрижнях фаз реактора, а також з урахуванням включення мінімум або максимум синусоїди напруги на мережній обмотці реактора.

На рисунку 2.4 представлені осцилограми напруг, що з'являються, на виводах обмотки управління, а також на шунтуючих резисторах ОУ при включенні КШР в мережу в момент проходження напруги фази «А» через нуль. Залишкова індукція на момент включення відповідає індукції номінального режиму КШР та становить 2 Тл.

З рисунку 2.4 видно, що максимальне значення напруги, яке з'являється при включенні реактора в мережу в момент переходу напруги фази А через нуль, становить 18,7 кВ. Враховуючи, що допустима напруга напівпровідникового перетворювача становить 3,4 кВ, можна зробити висновок про можливий вихід ППМ з ладу у разі, якщо не буде вжито додаткових заходів щодо його захисту.

Як було зазначено вище, комутаційна перенапруга, максимальний рівень та енергетика якого становить 18 кВ і 654 кДж, відповідно, може виникнути тільки у разі включення КШР без попереднього підмагнічування (знято імпульси керування тиристорів перетворювального блоку, або стався розрив повітряної ошиновки) з облік що залишкова індукція у напівстрожнях магнітної системи реактора становить 2 Тл. Якщо говорити про появу описаного вище випадку на практиці, то варто говорити про цикл ТАПВ лінії з КШР, коли напруга на реакторі зникає при його роботі в номінальному режимі. Час, через який на реакторі повторно з'являється напруга мережі, відповідає тривалості ТАПВ, яке може становити менше 1 сек.



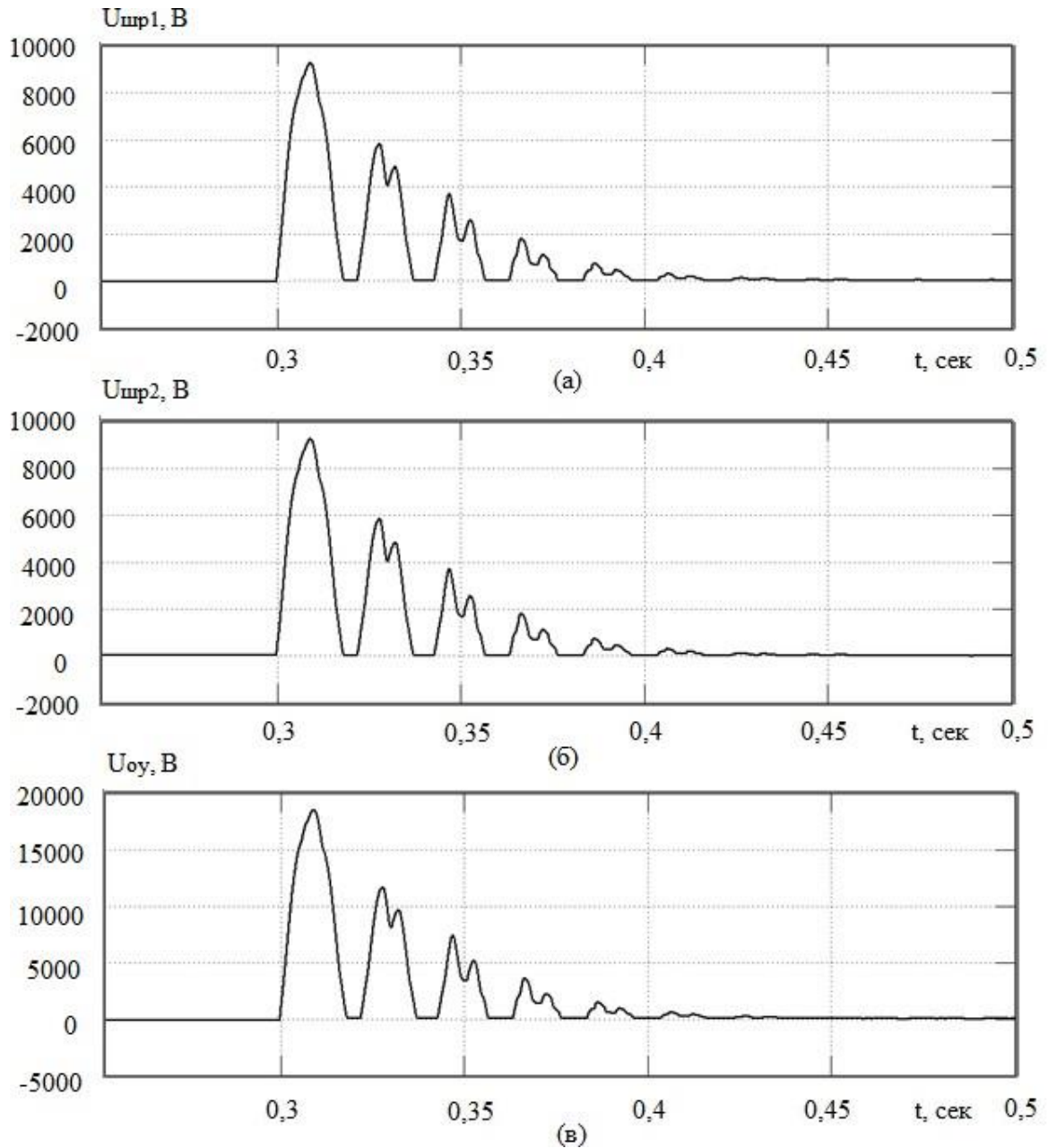


Рисунок 2.4 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) при включенні КШР типу 3хРОДУ-60000/500 у мережу після його відключення з номінального режиму

Оцінити зміни значень індукцій у напівстрижні КШР після відключення реактора з номінального режиму можна на підставі рисунку 4.5 з якого видно, що після зникнення напруги в момент часу 0,6 сек. вони змінилися трохи.

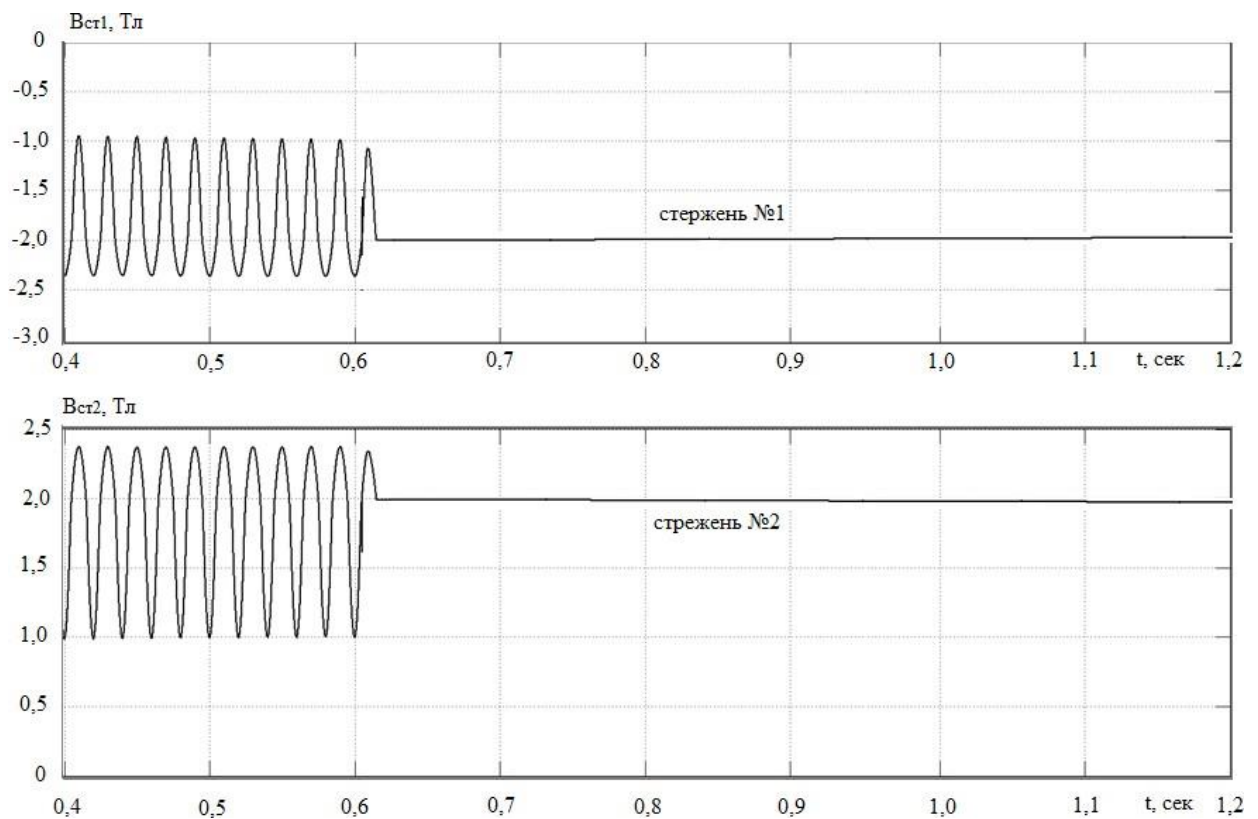


Рисунок 2.5 – Зміна індукції у напівстрижнях фази КШР при відключенні реактора з номінального режиму

На рисунку 2.6. наведено результати розрахунку напруги, які з'являються на шунтуючих резисторах ОУ (а, б) і на виводах обмотки управління (в) при подачі напруги на КШР в момент проходження фази «А» через нуль. Залишкова індукція у напівстрижнях момент включення реактора відповідає індукції 1 Тл (навантаження КШР при його відключенні становить половину номінальної потужності).

Максимальне значення напруги, що з'являється на виводах ОУ у вказаному режимі, становить 11,97 кВ. Розрахунок перенапруг на виводах обмотки управління та шунтуючих резисторах ОУ при включенні КШР у мережу з урахуванням того, що реактор до його відключення працював у режимі холостого ходу показує, що небезпечних, з точки зору напівпровідникового перетворювача та обмотки управління явищ, не виникає. Пов'язано це з тим, що в процесі роботи реактора на холостому ході відбувається розмагнічування напівстержні реактора змінним потоком і

залишкова індукція на момент включення КШР має нульове значення.

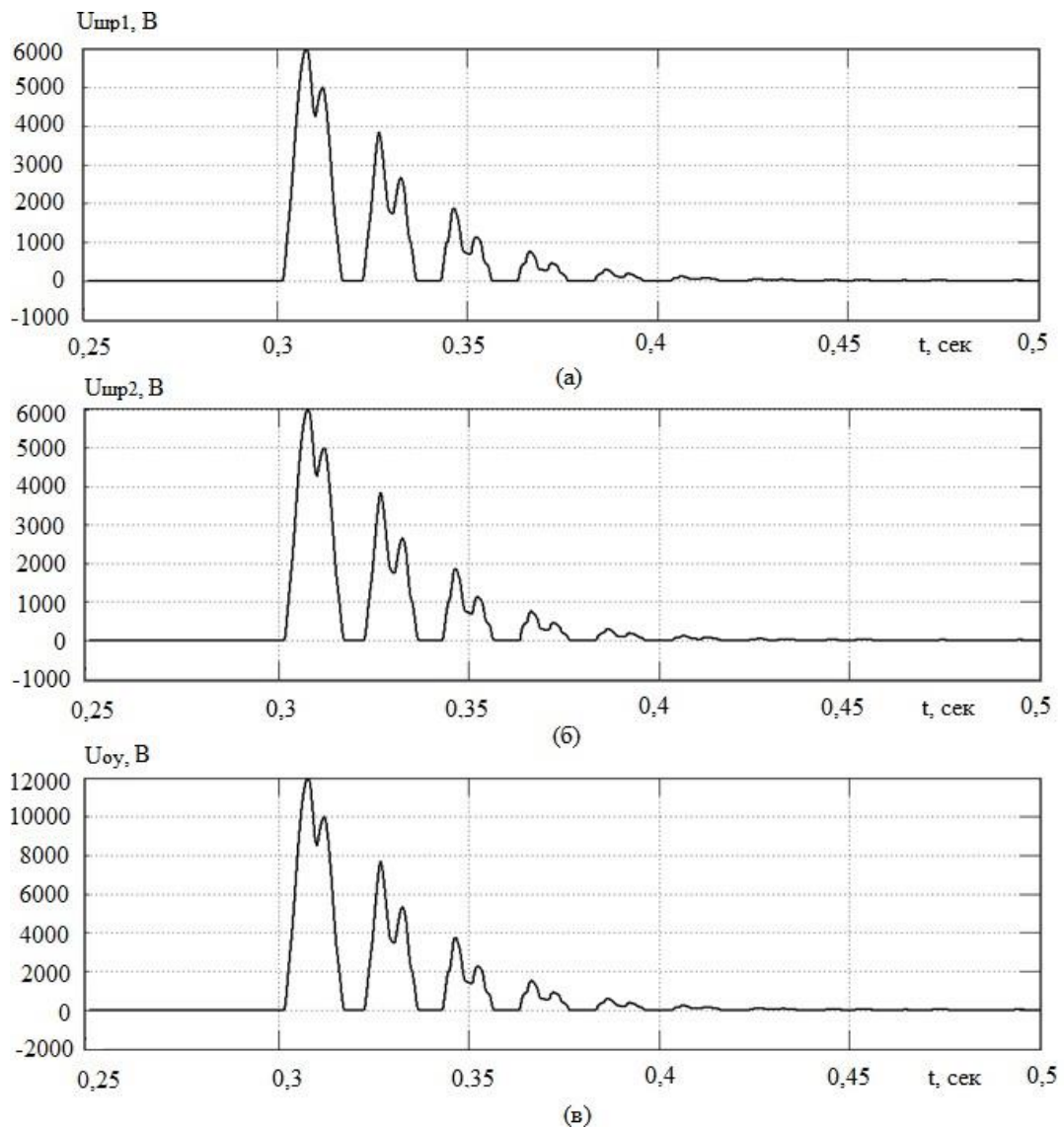


Рисунок 2.6 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки керування (в) при включенні КШР типу 3хРОДУ-60000/500 у мережу після його відключення з 50 % номінальної потужності

Аналіз процесів при включенні КШР типу 3хРОДУ-60000/500 в мережу з урахуванням різних значень залишкових індукцій свідчать про те, що зроблені раніше висновки про їх суттєвий вплив на рівень напруг, що виникають на обмотці, вірні. Найбільше значення напруги на ОУ, що становить 18 кВ, виникає при залишковій індукції у напівстрижнях, що відповідає індукції номінального режиму роботи реактора – 2 Тл.

Максимальне значення енергії, що виділяється у шунтуючих резисторах становить 654 кДж.

Слід зазначити, що це теоретично можливий режим максимальних впливів, що враховує, що в циклі ТАПВ лінії з УШР тривалість якого становить менше 1 сек, реактор працював у номінальному режимі і при цьому ланцюг підмагнічування відсутня шлях протікання струму через ПП.

2.2 Аналіз напруг, що виникають, на виводах обмотки управління при включенні КШР у трифазному виконанні

Як було зазначено на початку поточного розділу, основною відмінністю з точки зору розрахунку напруг, що виникають на виводах обмотки управління при включенні КШР в мережу без його попереднього підмагнічування, є величина еквівалентного опору резисторів, що шунтують, яке підключається до висновків +/- ОУ і напівпровідникового перетворювача. Проаналізувати зазначену відмінність можна виходячи з схем, представлених на рисунках 2.2 та 2.3. Еквівалентний опір шунтуючого резистора для трифазної схеми КШР типу РТДУ-180000/500 становить 21 Ом, а для КШР, що складається з групи однофазних реакторів типу 3хРОДУ-60000/500 – 7 Ом.

Використовуючи розроблену комп'ютерну модель трифазного КШР проведемо оцінку напруги, що з'являються на виводах обмотки управління та шунтуючих резисторах ОУ, при включенні КШР типу РТДУ-180000/500 в мережу з урахуванням різних величин залишкової індукції в його напівстрижні. Для моделювання зазначених режимів будуть зроблені розрахунки при відключенні КШР з різних режимів його роботи – номінального режиму, відповідного половинного завантаження реактора, режиму холостого ходу.

На рисунку 2.7 наведено результати розрахунків напруг на виводах обмотки управління, а також на шунтуючих резисторах ОУ, які з'являються при включенні КШР в момент проходження напруги фази «А» через нуль.

Залишкова індукція на момент включення відповідає індукції номінального режиму КШР і становить 2 Тл.

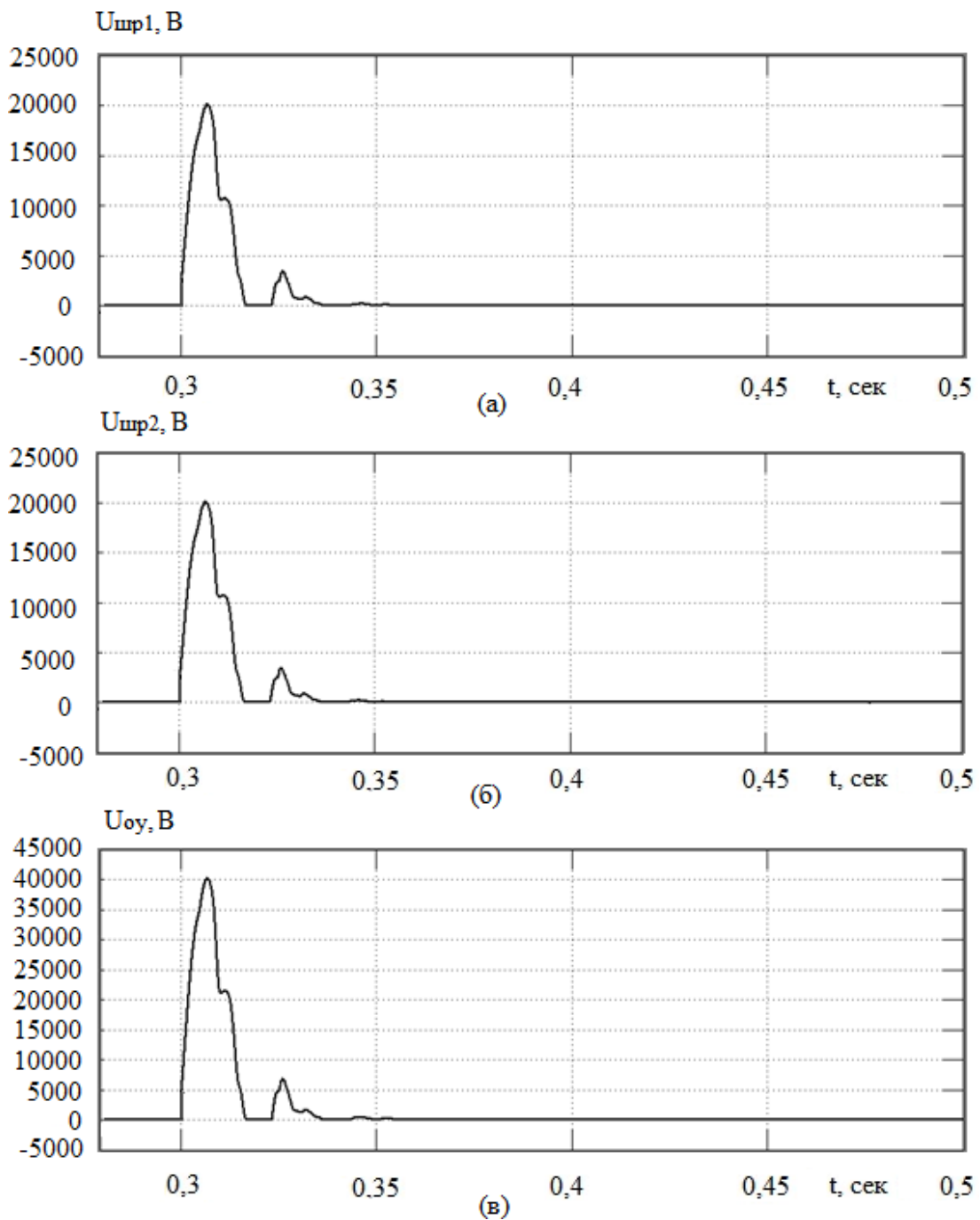


Рисунок 2.7 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) при включенні КШР типу РТДУ-180000/500 у мережу при проходженні напруги фази «А» через нуль

З представлених результатів розрахунку видно, що максимальне значення напруги, яке виникає при включенні реактора в мережу в момент

переходу напруги фази «А» через нуль, становить 40 кВ, що більш ніж удвічі більше, ніж для УШР, що складається з трьох однофазних реакторів типу ЗхРОДУ-60000/500. Тривалість імпульсів напруги, що виникають - 0,036 сек.

Проведемо аналіз обмотки управління, що з'являються на виводах, і шунтуючих резисторах ОУ напруг для випадку, коли включення реактора відбувається при проходженні напруги фази «А» через максимум, результати розрахунку представлені на рисунку 2.8.

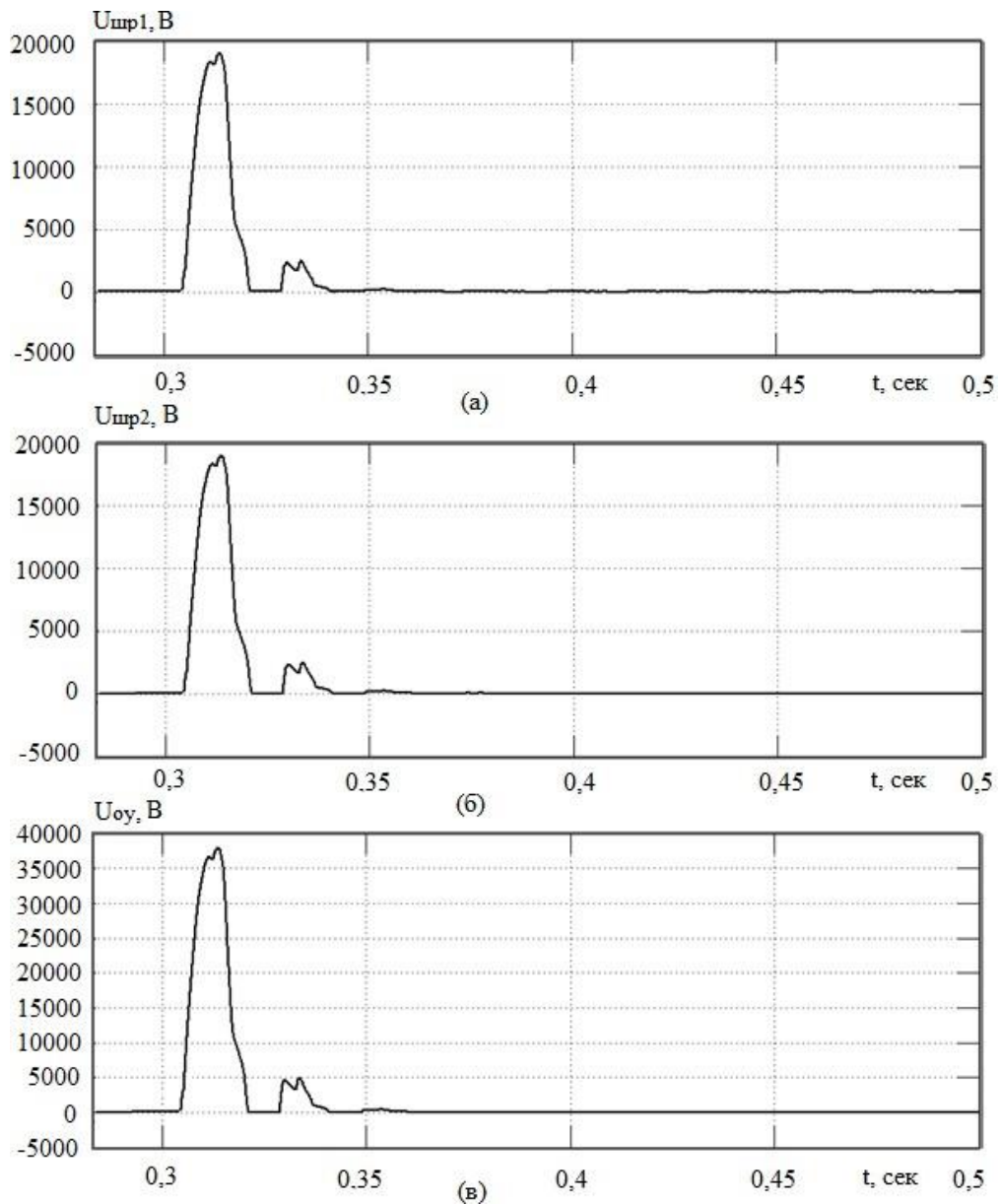


Рисунок 2.8 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) при включенні КШР типу РТДУ-180000/500 у мережу при проходженні напруги фази «А» через максимум



З наведеного рисунку 2.8. видно, що напруга, що досліджується на виводах обмотки управління становить 38 кВ, що трохи нижче, ніж для випадку, коли КШР включається в мережу при проходженні напруги фази «А» через нуль (40 кВ). Енергія імпульсу напруги на ОП – 550 кДж.

На даний час існує тенденція, згідно з якою, з метою зниження аперіодичних струмів включення реакторів передбачається встановлення в ланцюгах управління їх вимикачів пристрою синхронної комутації, що забезпечує почергове включення фаз реактора в моменти максимумів напруг.

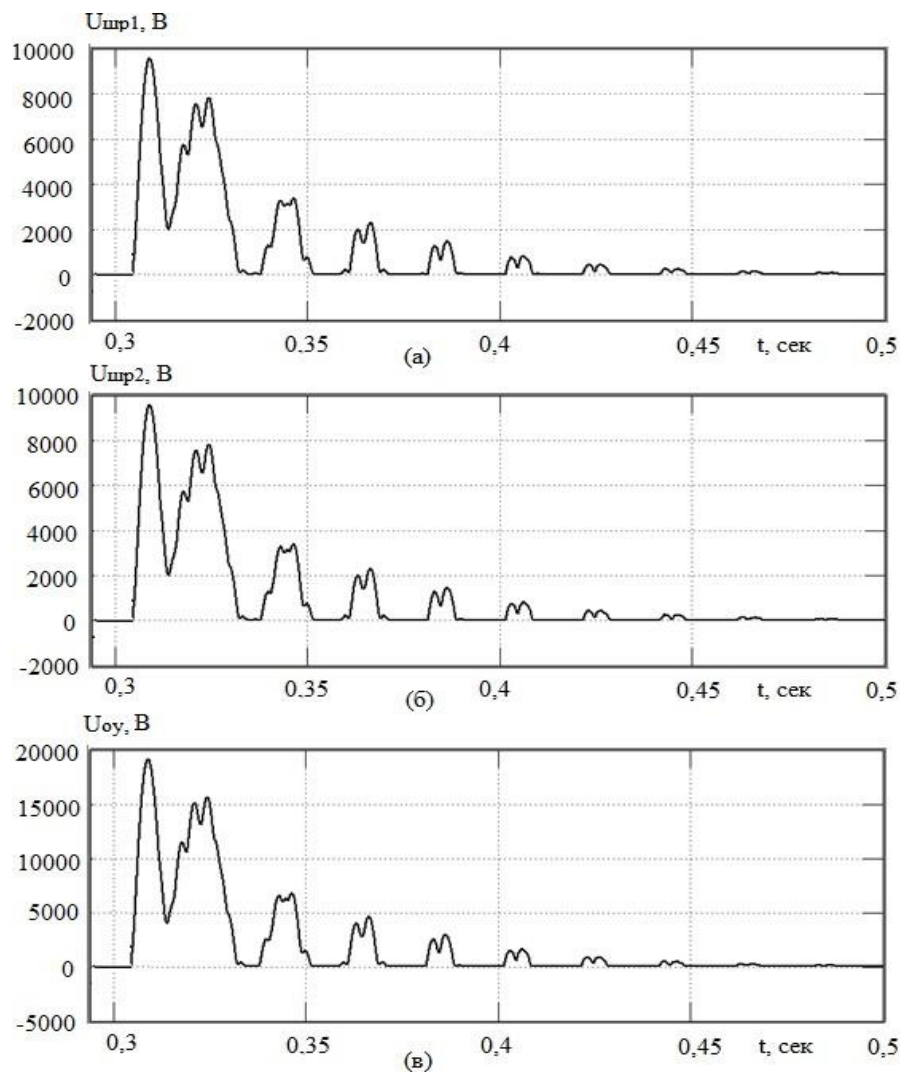


Рисунок 2.9 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) при включенні КШР типу РТДУ-180000/500 у мережу при проходженні напруг фаз через свої максимуми

Результати розрахунків напруг, що з'являються на виводах обмотки управління та шунтуючих резисторах, при включенні трифазного КШР в мережу при проходженні напругою фаз «А», «В», «С» через максимуми представлені на рисунку 2.9. Відключення реактора сталося під час його роботи у номінальному режимі.

З представленого рисунку можна дійти невтішного висновку у тому, що застосування пристроїв синхронної комутації при включенні УШР до мережі, істотно зменшує максимальне значення напруги на виводах ОУ проти розглянутими раніше випадками (рис. 2.7 і 2.8). Величина обмотки управління напруги, що виникає на виводах, і енергія відповідного йому імпульсу становить 19 кВ і 238 кДж відповідно.

Дослідження процесів при включенні КШР в мережу після його відключення з режиму споживання 50% номінальної потужності, що відповідає залишковій індукції в напівстрижнях КШР 1 Тл, показують, що максимальна величина напівпровідникового перетворювача імпульсу напруги, що з'являється на виводах, і його енергетика складають 28,5 кДж відповідно. Варто зазначити, що розрахунок проводився при врахуванні, що КШР включається в мережу в момент проходження напруги фази А через нуль.



### 3 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ОБМЕЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ НА НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ КШР ДО МЕРЕЖІ

Вище зазначалось, що використання режиму попереднього підмагнічування перед включенням КШР у мережу забезпечує не тільки безінерційний вихід реактора на номінальний режим, а й, як показала практика, виключає появу небезпечних з погляду напівпровідникового перетворювача та обмотки управління КШР перенапруг, які можуть виникнути на виводах ОУ під час включення реактора.

На рисунку 3.1 представлені результати розрахунків значень струму мережної обмотки фази «А» (поле а), індукції напівстрижнів фази «А» (поле б), напруги на виводах обмотки управління (поле в), струм, що протікає через напівпровідниковий перетворювач та загальну ошиновку ОУ (поле г).

Аналіз отриманих значень досліджуваних явищ (рис. 3.2) показує, що включення реактора з використанням попереднього підмагнічування, організованого за рахунок спеціалізованого режиму напівпровідникового перетворювача, не викликає перенапруг на ОУ.

Різноспрямованість індукцій у напівстрижнях, які, як було зазначено вище, є основною причиною появи досліджуваних перенапруг, позначається на значення струму, що протікає через ППМ на момент включення. Таким чином, при появі напруги на реакторі випрямлений струм ОУ суттєво збільшується та перевищує своє номінальне значення. Збільшення струму на момент включення КШР перестав бути критичним чинником з погляду перетворювача.

Проведені у роботі дослідження процесів комутації КШР без використання попереднього підмагнічування показують, що максимальний рівень впливу на напівпровідникові перетворювачі та обмотку управління реактора становлять 18 кВ для групи однофазних КШР та 40 кВ для

трифазного реактора. Енергія відповідних імпульсів напруги, що виділяється на вбудованих шунтуючих резисторах зазначених реакторів – 650 кДж та 550 кДж.

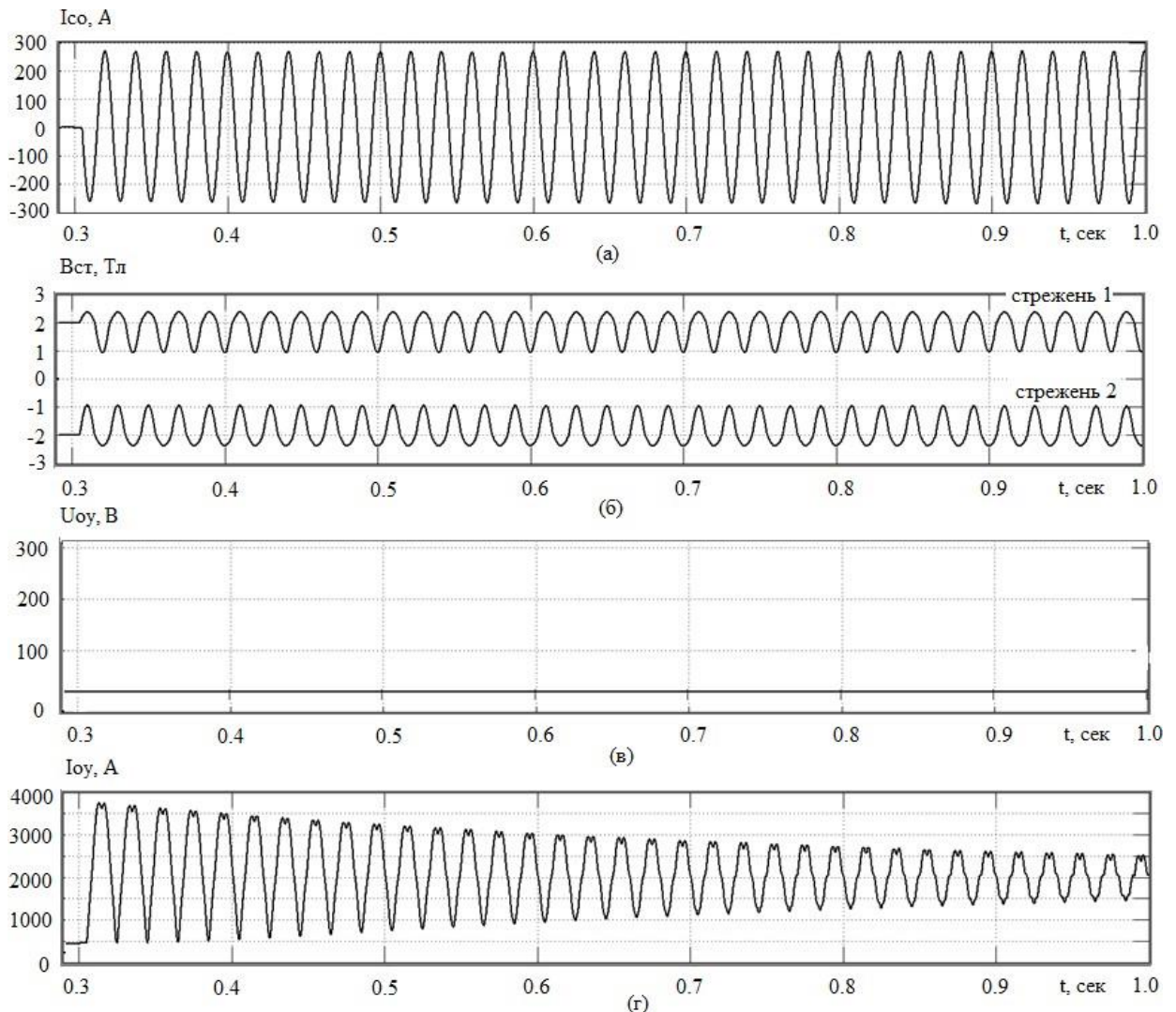


Рисунок 3.1 – Процеси при включенні УШР до мережі із попереднім підмагнічуванням

Практика роботи обладнання в енергосистемах показує, що найефективнішим засобом обмеження комутаційних перенапруг є ОПН, проте типові конструкції, які, з урахуванням ізоляційних властивостей ППМ, могли б бути застосовані для вирішення досліджуваних проблем, у номенклатурі заводів-виробників відсутні. Враховуючи представлені вище результати розрахунків розроблено технічні вимоги до ОПН-2,0/3,0-400, завданням якого

є обмеження перенапруги на обмотці керування та напівпровідниковому перетворювачі, що виникають при включенні УШР до мережі за можливої відсутності попереднього підмагнічування. Основні вимоги до зазначеного ОПН та його вольтамперна характеристика представлені у таблиці 3.1 та на рисунку 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1 – Основні технічні вимоги до ОПН для захисту ПВМ

№ п/п	Найменування параметра (характеристики), розмірність	Значення параметра (Характеристики))
1	Найбільша тривала допустима робоча напруга УНР постійного струму, кВ, не більше	2,0
2	Напруга, що залишається, при комутаційному імпульсі струму з амплітудою 2 кА, УОСТ кВ, не більше	3,0
3	Енергія, що розсіюється ОПН при поглинанні комутаційного імпульсу струму з амплітудою 2 кА, кДж, не менше	400

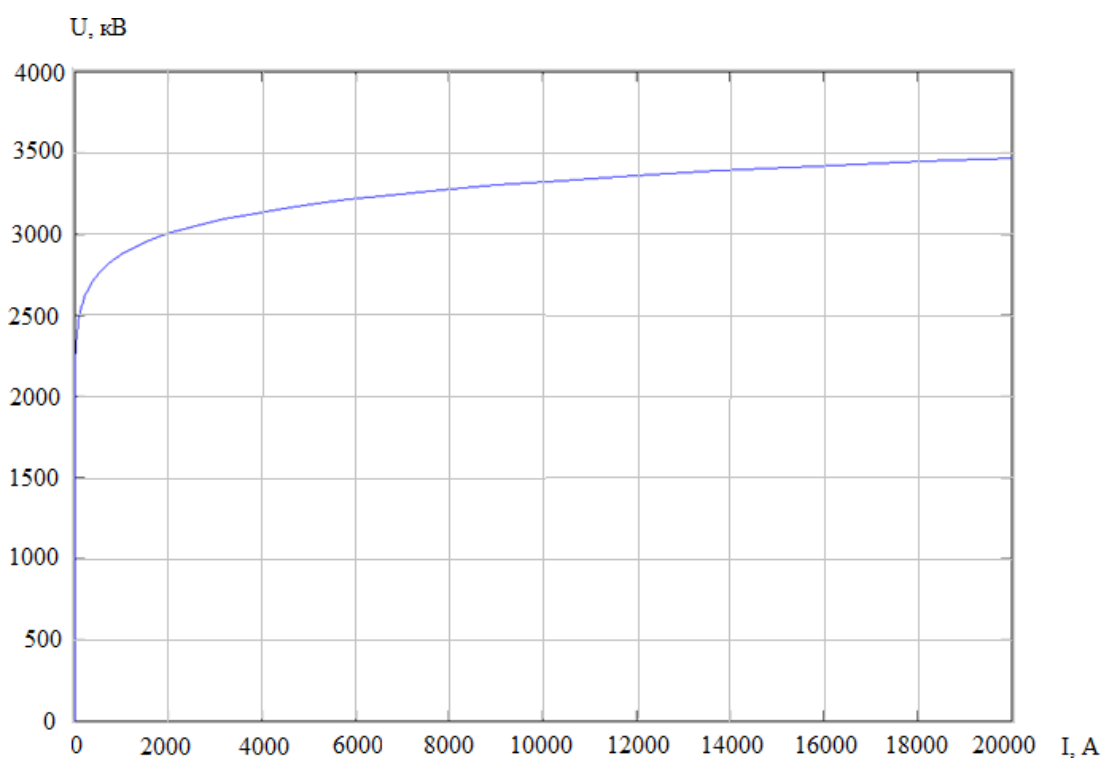


Рисунок 3.2 – Вольтамперна характеристика ГНН-2,0/3,0-400

Проведемо аналіз напруг, що виникають, на обмотці управління КШР з урахуванням підключеного до висновків ППМ ОПН 400 кДж при включенні реактора в мережу для найбільш важких описаних вище випадків.

Результати розрахунку напруг ОУ при включенні групи однофазних КШР типу 3хРОДУ-60000/500 та трифазного РТУ-180000/500 наведено на рисунку 3.3 та 3.4 відповідно.

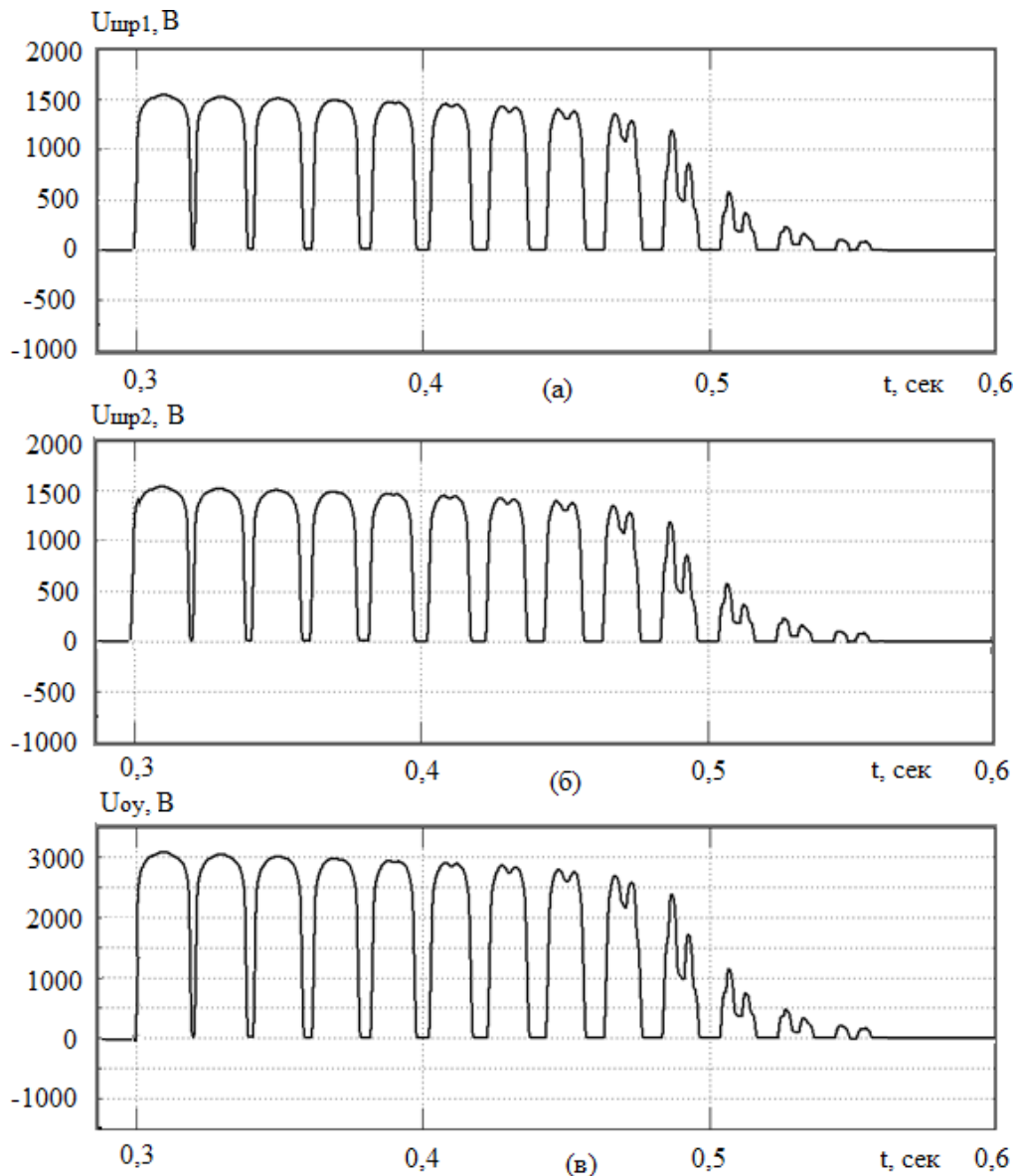


Рисунок 3.3 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) з урахуванням підключеного ОПН-2,0/3,0-400 при включенні КШР типу 3хРОДУ-60000/500 у мережу в момент проходження напруги фази «А» через нуль

Енергія, що виділяється в ГНН, при появі перенапруги на виводах ОУ становить:

$$W_{\text{гнн}} = \int_{0,3}^{0,5} U_{\text{гнн}} I_{\text{гнн}} dt = 380 \text{ кДж}$$

Максимальне значення напруги на ОП – 3,1 кВ.

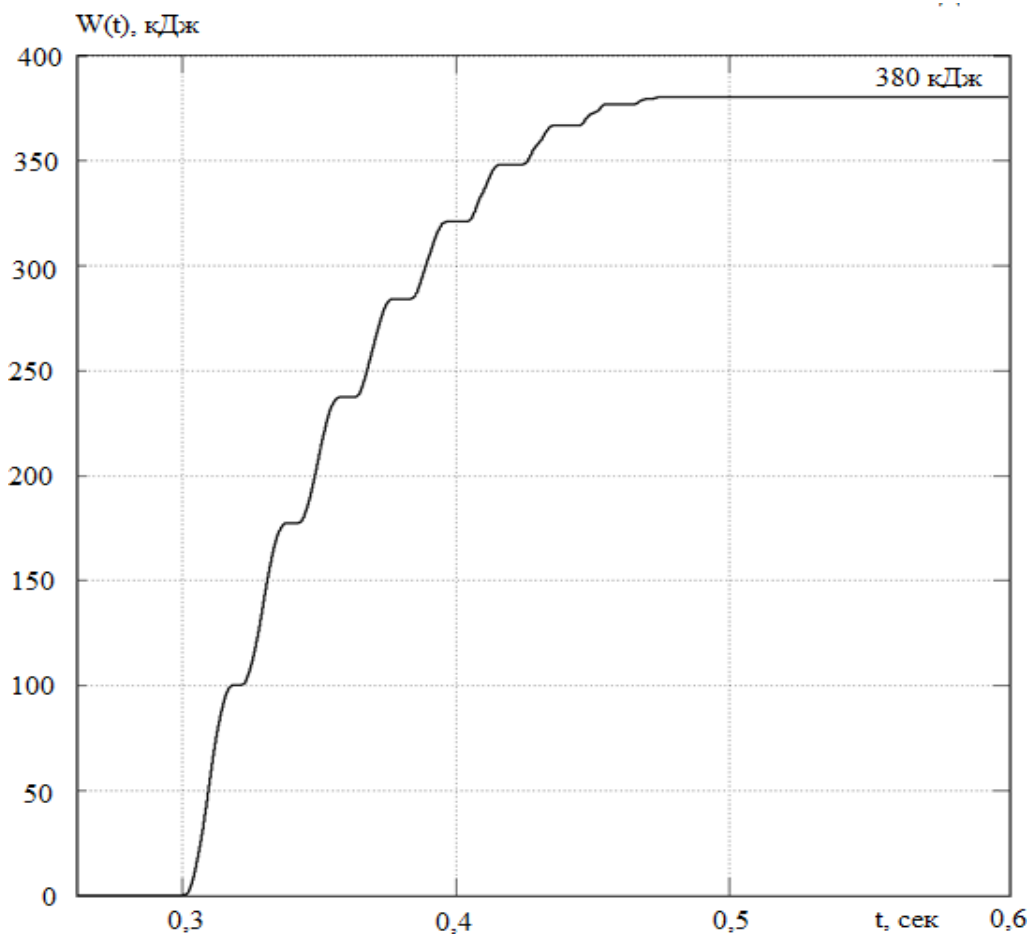


Рисунок 3.4 – Розрахунок енергії, що виділяється в ГНН, який підключений до виводів ОУ, при включенні КШР типу 3хРОДУ-60000/500 у мережу

Енергія, що виділяється в підключеному до ОУ ОПН-2,0/3,0-400 при включенні керованого реактора в мережу в момент проходження напруги фази А через нуль становить 380 кДж.

Грунтуючись на результатах аналізу процесів (рис. 3.3 - 3.4) при

включенні в мережу КШР з урахуванням наявності на виводах обмотки управління ОПН, можна зробити висновок про те, що пропонується до встановлення нелінійний обмежувач перенапруги типу ОПН-2,0/3,0- 400 є надійним способом захисту напівпровідникового перетворювача. Напруга, що з'являється на ОУ, повністю скоординована із захисними властивостями ПП.

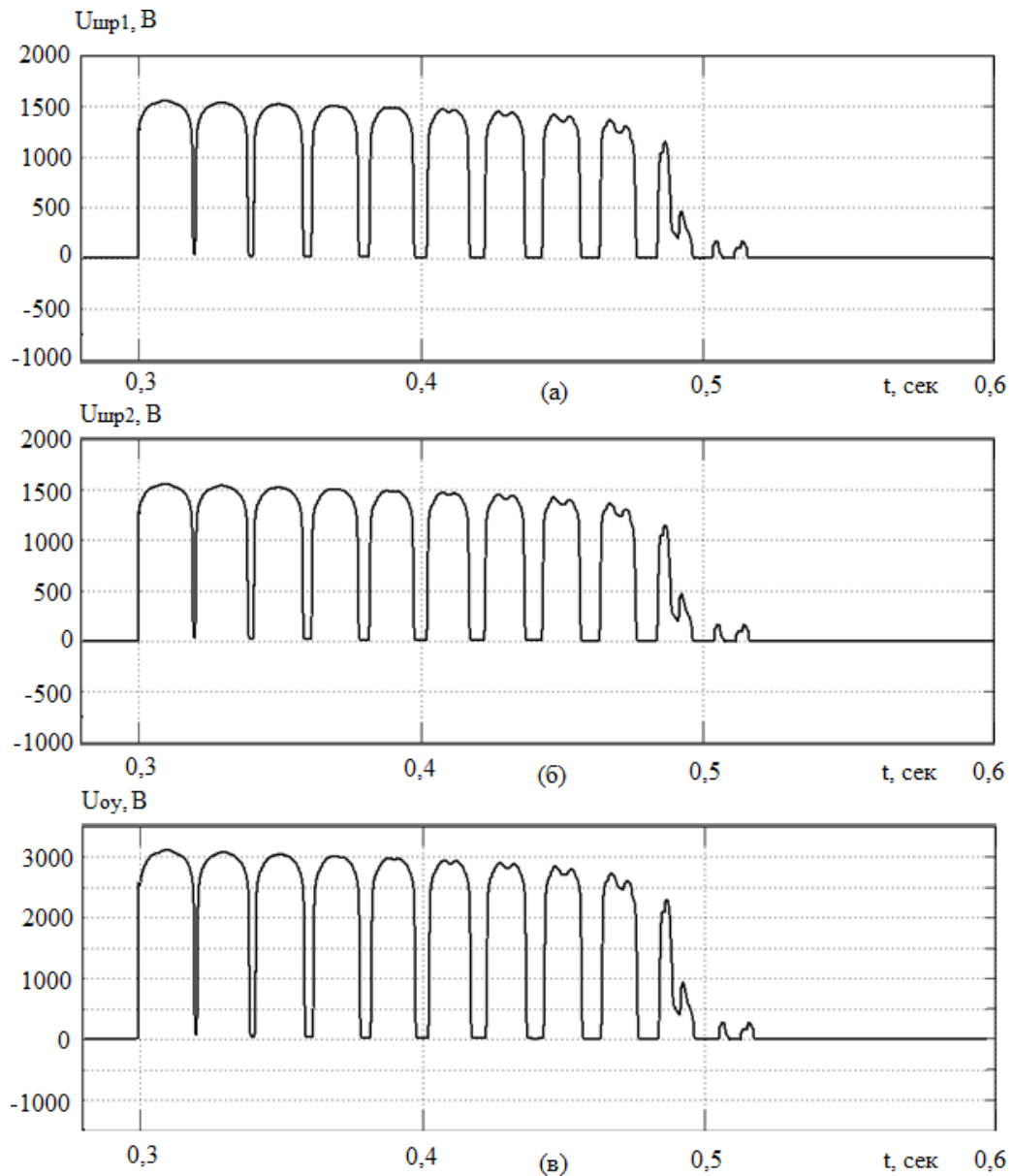


Рисунок 3.4 – Напруги на шунтуючих резисторах (а, б) та виводах обмотки управління (в) з урахуванням підключеного ОПН-2,0/3,0-400 при включенні КШР типу РТУ-180000/500 у момент проходження напруги фази «А» через

нуль

Проведений у роботі аналіз можливих перенапруг на ОУ та ПП відносяться до лінійних КШР, що беруть участь у циклі ТАПВ, тривалість якого становить 0,5-5 сек. Якщо говорити про застосування керованих реакторів на шинах, слід зазначити таке:

1) у разі оперативного відключення КШР 500 кВ при його роботі в режимі холостого ходу небезпечних перенапруг на виводах ППМ не виникає. Ця обставина пов'язана з розмагнічуванням напівстрижні реактора змінним полем.

2) низка теоретичних та практичних робіт, присвячених вивченню залишкової індукції в стрижнях магнітопроводу силових трансформаторів, показують, що вона в експлуатованих потужних силових трансформаторах рідко буває вище 1 Тл, що дозволяє значно знизити енергоємність ГНН. Так для надійного захисту напівпровідникового перетворювача при включенні реактора типу ЗхРОДУ-60000/500 в мережу енергоємність ГНН не перевищуватиме 100 кДж.

### 3.1 Рекомендації щодо збільшення швидкості набору попереднього підмагнічування

Практика використання режиму попереднього підмагнічування показує, що гарантований рівень підмагнічування з точки зору безінерційного виходу КШР на номінальний режим забезпечується при протіканні через перетворювач струму випрямленого порядку 10 % номінального. Вибір необхідного рівня струму через напівпровідниковий перетворювач досягається установкою фіксованого кута відкриття тиристорів перетворювального блоку, що залишається незмінним у процесі експлуатації обладнання.

Теоретичні та практичні дослідження свідчать про те, що для випадків, коли перед зникненням напруги на реакторі останній працював у режимі близькому до холостого ходу, установка фіксованого кута управління, що

відповідає 10 % номінального струму ОУ, забезпечує набір необхідного для включення рівня попереднього підмагнічування за час не менше 16 с (рис. 3.4), що істотно вище за розрахунковий час ТАПВ 0,5-5 сек. На рисунку 3.5 представлений процес набору підмагнічування, який полягає у збільшенні індукцій у напівстрижнях реактора до значень, що відповідають номінальному споживанню КШР реактивної потужності при подачі на нього напруги. Кут керування перетворювача обраний таким чином, щоб струм в обмотці керування становив близько 10% його номінального значення. На рисунку 3.5 представлений процес набору попереднього підмагнічування для випадку, коли напруга на КШР зникає при його роботі як споживання 50 % номінальної потужності.

Аналіз описаних процесів дозволяє зробити висновок про те, що час набору попереднього підмагнічування до необхідного рівня істотно залежить від споживаної КШР реактивної потужності до зникнення на ньому напруги і може бути значно більше часу безструмової паузи ТАПВ. Ця обставина значно знижує ефективність застосування циклу ТАПВ на лініях з керованими реакторами, що шунтують.

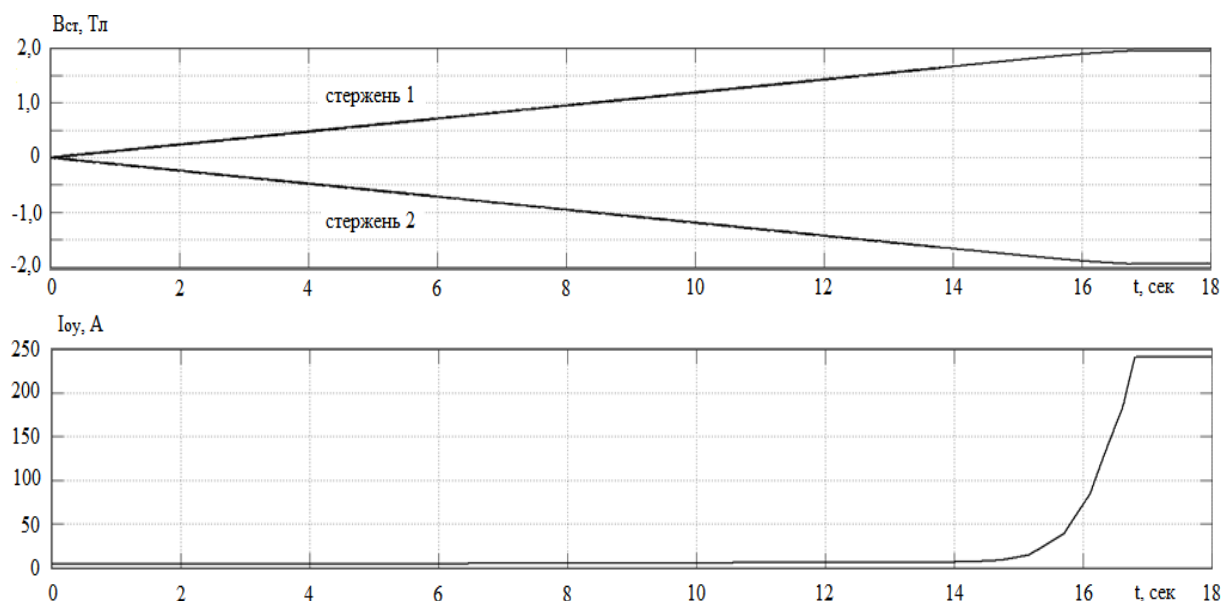


Рисунок 3.5 – Процес зміни індукцій у напівстрижнях (верхнє поле) та струму в обмотці керування КШР (нижнє поле) при наборі попереднього підмагнічування за рахунок кута керування, що відповідає 10 % номінального струму ОУ



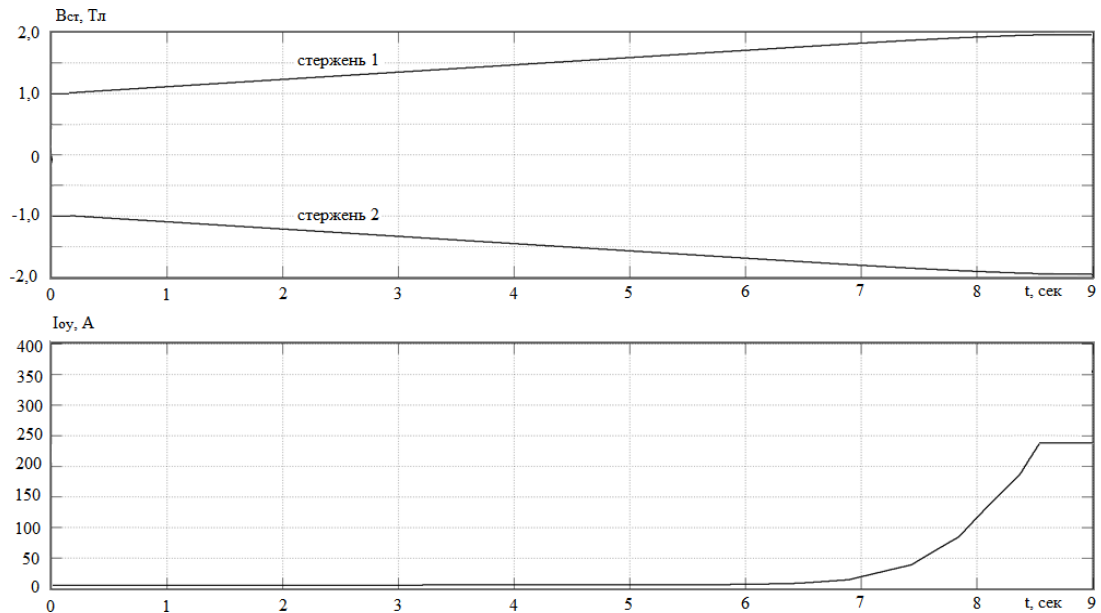


Рисунок 3.6 – Процес зміни індукцій у півстрожнях (верхнє поле) та струму в обмотці управління КШР (нижнє поле) при наборі попереднього підмагнічування за рахунок кута управління, що відповідає 10 % номінального струму ОУ

Для підвищення експлуатаційних властивостей лінійних реакторів необхідна мінімізація часу попереднього підмагнічування КШР у циклах АПВ. І тому розроблено спеціалізований алгоритм роботи перетворювача з двох кутів управління. Один з кутів управління формується в певний проміжок часу і відповідає більшій вихідній напрузі перетворювача, ніж вихідна напруга ПП, що відповідає струму ОУ, що встановлюється, що становить 10 % його номінального значення, що визначається другим кутом. Другий кут формується до моменту появи напруги на реакторі. Таким чином, завдяки роботі перетворювача по двох кутах управління тиристорів ПП, можна сформувати необхідний час попереднього підмагнічування і при цьому суттєво скоротити його.

Вище було показано, що найбільший час для забезпечення необхідного підмагнічування УШР потрібен у тих випадках, коли реактор до моменту зникнення на ньому напруги працював у режимі холостого ходу, тобто.

магнітна система реактора була розмагнічена. Вибір першого кута управління ПІМ алгоритму, що розробляється, варто вибирати таким чином, щоб необхідний стан магнітної системи для подачі напруги забезпечувалося за мінімально можливий час і було менше заданого часу ТАПВ.

Проведені в роботі розрахунки показують, що використання як початкового кута управління кута, який відповідає форсировочному, дозволяє забезпечити готовність до включення реактора протягом близько 0,3 сек. На рисунку 3.7 показаний процес набору попереднього підмагнічування розмагніченого КШР відповідно до алгоритму керування по двох кутах з подальшою подачею напруги на реактор. Час формування першого кута становить 0,28 с, потім напівпровідниковий перетворювач переходить на роботу з другим кутом управління, який відповідає протіканню 10% номінального струму в обмотці управління. Другий кут підтримує необхідне значення струму ОУ до моменту подачі напруги на реактор.

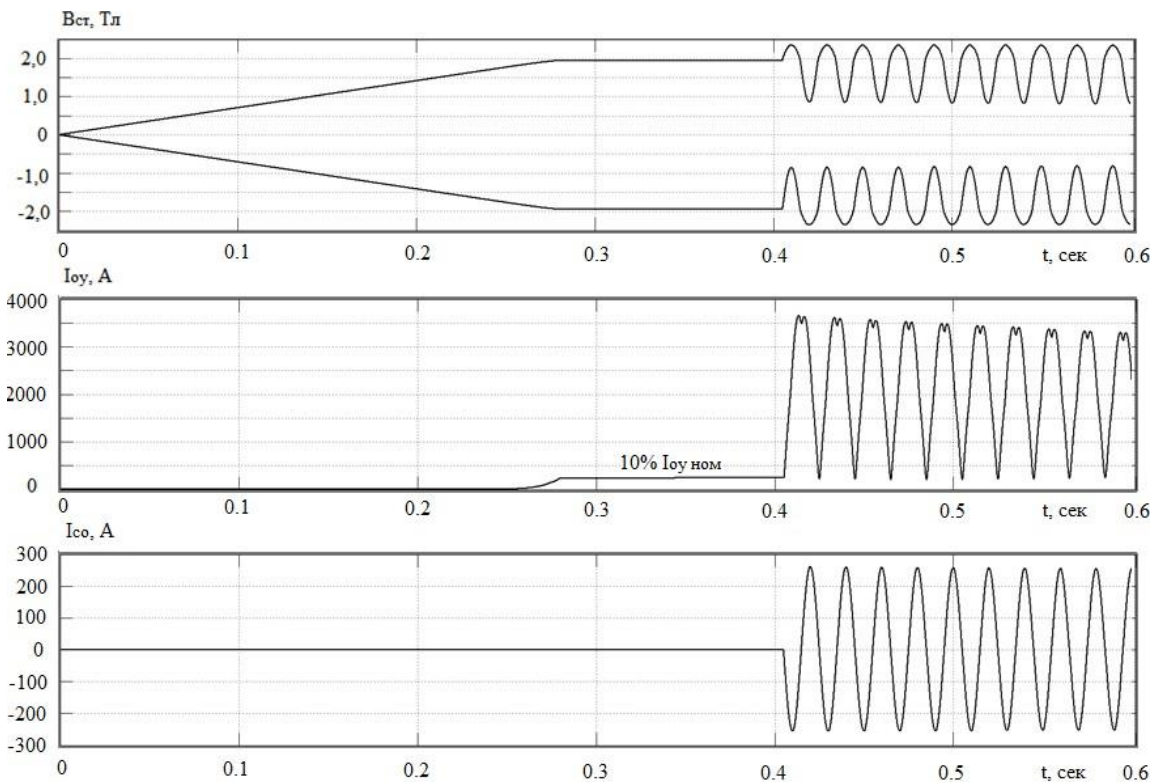


Рисунок 3.7 – Процес підмагнічування розмагніченого КШР відповідно до алгоритму управління двома кутами

У тих випадках, коли напруга на КШР пропадає при його роботі в режимі, відмінному від холостого ходу, потрібно менше часу, який необхідний для забезпечення готовності реактора до включення. Як приклад на рисунку 3.8 представлений процес набору підмагнічування КШР у циклі ТАПВ при відключенні реактора в режимі споживання 50 % номінальної потужності (залишкова індукція у стрижнях реактора становить 1 Тл). На представленому рисунку в інтервалі  $[0,1; 0,24]$  формується форсувальний кут управління ППМ, далі, до моменту появи напруги на реакторі, перетворювач працює відповідно до другого кута, забезпечуючи підтримку необхідного струму підмагнічування. Таким чином, час набору струму, необхідного з погляду готовності реактора до включення, становить 0,14 с.

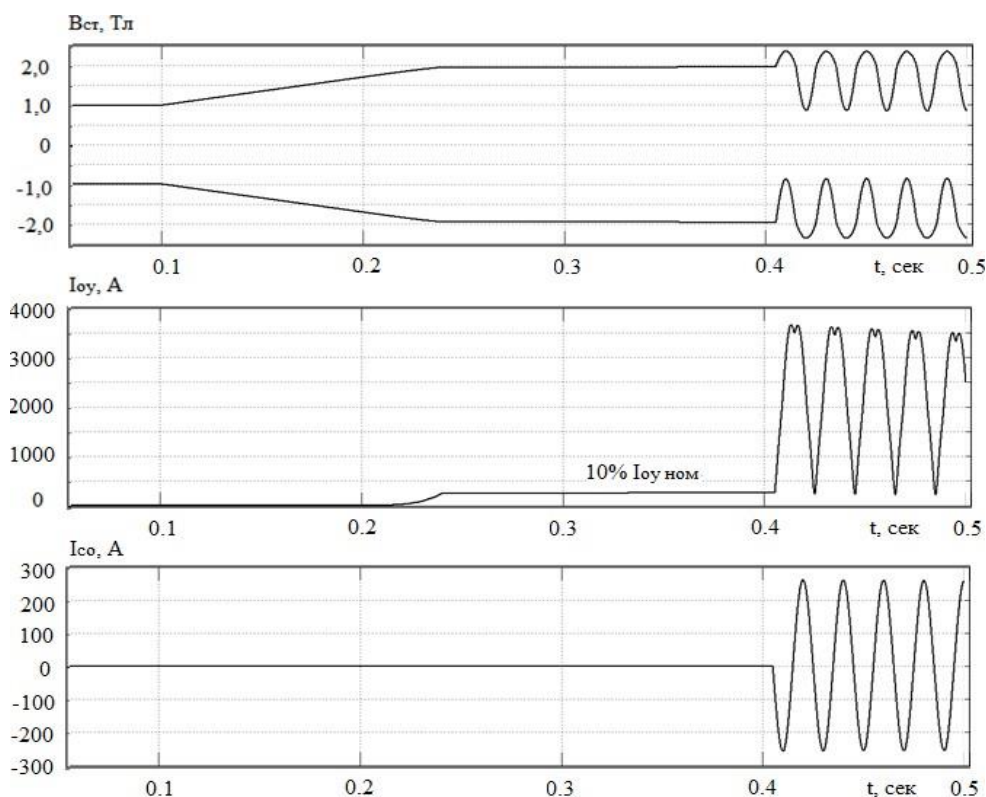


Рисунок 3.8 – Процес підмагнічування відключеного з режиму споживання 50 % потужності КШР відповідно до алгоритму управління двома кутами

Слід зазначити, що з наближенням індукції стрижнів реактора до точки на кривій намагнічування 2 Тл, що відповідає режиму споживання КШР номінальної потужності відбувається різке збільшення струму, що видається

перетворювальним блоком (рис. 3.9). Ця обставина пояснюється зниженням індуктивного опору реактора за рахунок насичення його магнітної системи постійним струмом, і з метою запобігання пошкодженню ПП у разі подальшого насичення реактора має контролюватись системою управління. Контроль значень струму в обмотці управління здійснюється шляхом аналізу інформації, отриманого з датчика постійного струму, встановленого ланцюга випрямленого струму, що дає можливість забезпечити прискорений набір необхідного рівня попереднього підмагнічування незалежно від режиму, з якого був відключений реактор. У випадку, якщо з яких-небудь причин відсутня можливість отримати та/або проаналізувати значення струму в ланцюзі ОУ, алгоритм передбачає обмеження роботи перетворювача відповідно до першого кута за часом. Незалежно від режиму роботи реактора, при якому на ньому зникла напруга, час формування першого кута, що відповідає форсувальному куту управління перетворювачем, обмежується на рівні 0,3 с. З одного боку цього часу достатньо для прискореного забезпечення необхідного рівня підмагнічування, а з іншого боку, унеможлиблює пошкодження перетворювача.

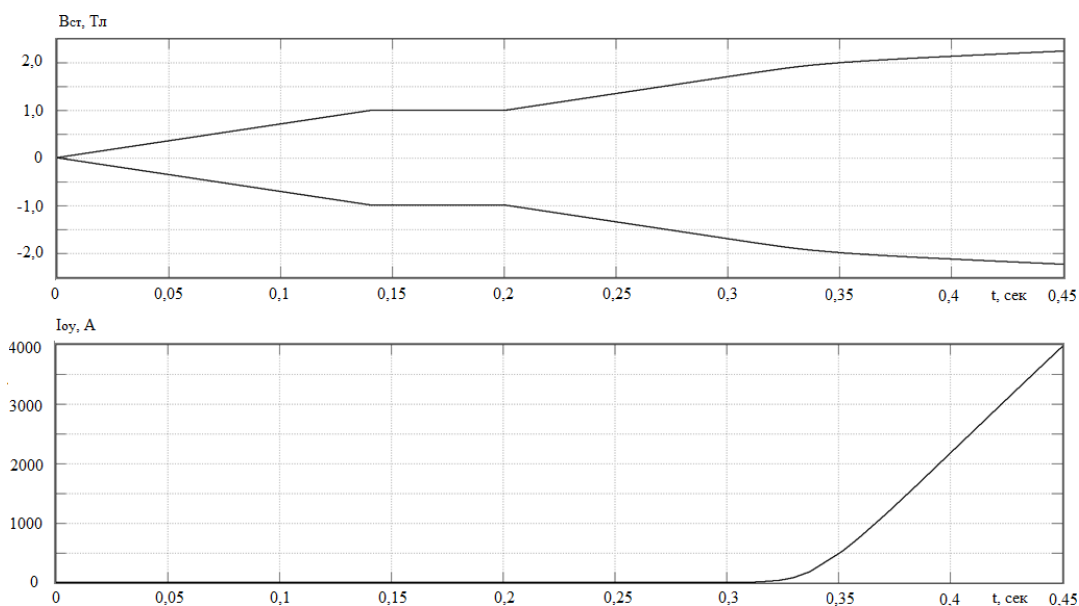


Рисунок 3.9 – Перевантаження перетворювального блоку за відсутності контролю процесу попереднього підмагнічування з боку системи автоматичного керування

## ВИСНОВКИ

У представленій роботі розглянута можливість зменшення втрат електричної енергії в точках підключення ліній електропередач енергетичних систем шляхом використання керованих шунтуючих реакторів, зокрема КШР 110 кВ та 500 кВ в електричній мережі.

У роботі оцінено вплив керованого реактора 500 кВ на процеси, що протікають у циклі ОАПВ лінії з КШР. Врахування впливу КШР ґрунтується на аналізі представлених аналітичних виразів, що дозволяють оцінити струм підживлення дуги від КШР та напругу 50 Гц, що відновлюється, на відключеній фазі після згасання дуги КЗ.

Проведено аналіз, який дозволяє оцінити рівень перенапруг, що з'являються, на виводах обмотки управління при включенні керованого реактора 500 кВ в мережу без його попереднього підмагнічування. На підставі аналізу комутаційних впливів сформульовані вимоги до основних параметрів захисних пристроїв (ОПН), які встановлюються на стороні напруги випрямленого напівпровідникового перетворювача.

Розглянуто механізм управління КШР 500 кВ, який дозволить знизити час, за який забезпечується готовність керованого реактора до повторної подачі на нього напруги.

У роботі також проаналізовано процеси в КШР 110 кВ, що впливають на його швидкодію, визначено причини, що обмежують можливість зменшення часу набору та скидання потужності реактора типової конструкції. Цей спосіб дозволить істотно поліпшити швидкісні характеристики КШР 110 кВ без конструктивних доробок електромагнітної частини реактора.

У роботі показано, що заборона заводу-виробника на включення КШР 110 кВ типової конструкції без попереднього підмагнічування, а також

необхідність використання додаткових захисних заходів може бути знята, оскільки небезпечних, з погляду напівпровідникового перетворювача, перенапруг на виводах обмотки управління немає. Ця обставина дозволяє у поширених схемах одностороннього живлення ПС 110 кВ включати КШР без попереднього підмагнічування.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://ztr.com.ua/ua/controlled-shunt-reactors>
2. ГОСТ 18624-73 Реакторы электрические. Термины и определения.
3. ГОСТ 16772-77 Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия.
4. ГОСТ 14794-79 Реакторы токоограничивающие бетонные. Технические условия.
5. Электрическая часть станций и подстанций: Учеб. для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшков и др.; Под ред. А. А. Васильева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть станций и подстанций. Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 648 с.
8. Чунихин А. А. Электрические аппараты: общий курс. Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 720 с. — ISBN 5-283-00499-6
9. Брянцев А.М. Подмагничиваемые ферромагнитные устройства с предельным насыщением участков магнитной цепи/ Брянцев А. М.// Электричество. - 1986. - №2.
10. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ 50 МВАр пущен в эксплуатацию. // Электричество. - 2002. - № 3.
11. Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат. Электричество. 1985. №12. С. 2 –8.
12. Бовчалюк С.Я., Тимчук С.О., Фурман І.О., Піскаръов О.М. Перспективи побудови інтелектуальних мереж SMART GRID на базі пліс-

технологій. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 5. С. 80 – 85.

13. Бржезицький В.О., Крисенко Д.С., Ткаченко М.П., Яновський В.П. Розрахунок перенапруг на непошкоджених фазах при однофазних коротких замиканнях в мережах 110 – 750 кВ. Технічна електродинаміка. 2010. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки» Ч. 3. С. 17 – 20.

14. Бургсдорф В.В., Турская Т.Б. Опыт эксплуатации линий электропередачи 750 кВ. Электрические станции. 1988. №5. С. 2 – 4.

15. Беляков Н.Н., Рашкес В.С., Савченко Е.Б., Таловерья В.Л., Хоециан К.В. Испытания схемы четырехлучевого реактора на электропередаче 750 кВ. Электричество. 2006. №5. С. 11 – 16.

16. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

17. Гавриков В.И., Гамилко В.А., Евдокунин Г.А. Математическое моделирование открытой дуги переменного тока. Энергетика. 1984. № 8. С. 14 – 17.

18. Гусейнов А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах. Электричество. 2012. № 5. С. 10 – 17.

19. Дмитриев М.В. Требования к компенсации зарядной мощности линий электропередачи 500 – 750 кВ. Энергетик. 2014. № 11. С. 3 – 8.

20. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гринев Н. Аперiodические токи ВЛ 500 – 750 кВ с шунтирующими реакторами. Новости электротехники. 2012. № 2(76). С. 28 – 32.

21. Кадомская К.П., Лавров К.П., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них.



Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. 2004. 368 с.

22. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Smart grid як пріоритети розвитку електроенергетики України та Європи. Матеріали V Міжнародної конференції [«Інтелектуальні енергетичні системи – 2017»] (Київ, 05 – 09 червня 2017 р.) / НТУУ «КПІ». 2017.

23. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Шполянський О.Г. Дослідження внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах надвисокої напруги та розробка заходів по їх запобіганню й обмеженню. Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 2013. Вип. 35. С. 117–123.

24. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. Перенапруги в аномальних режимах ліній електропередачі надвисокої напруги. Технічна електродинаміка. 2012. №2. С. 40 – 41.

25. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Лиховид Ю.Г., Мельничук В.А. Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. Електротехніка і електромеханіка. 2018. №2. С. 69 – 73.

26. Кульбовський І.І., Голуб Г.М. Аналіз нормативно-технічної бази впровадження інтелектуальних енергетичних систем на основі технологій SMART GRID. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2016. №3. С. 50 – 57.

27. Кучанський В.В. Критерій виникнення резонансних перенапруг в аномальних режимах ліній електропередач надвисокої напруги. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. №4. С. 51 – 54.

28. Лиховид Ю.Г., Тугай І.Ю. Моделювання режимів роботи компенсованих ліній електропередач. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. 2017. №1 (6). С. 10 – 12.

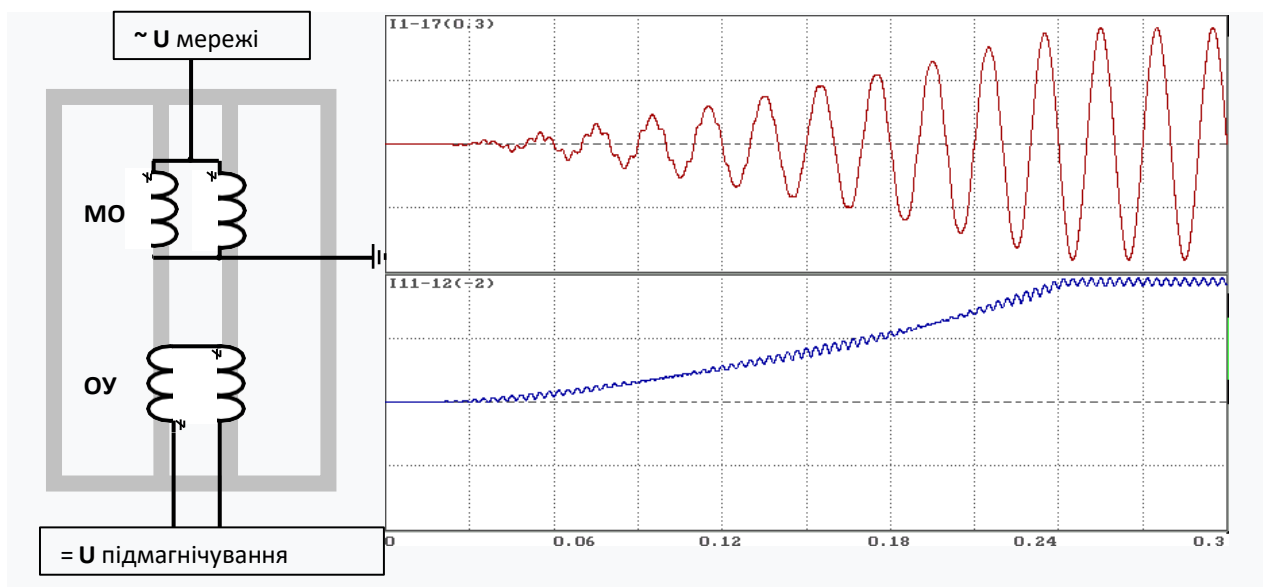
Додаток А

Демонстраційні матеріали дипломної роботи

Характеристики керованих шунтуючих реакторів різних класів напруги  
впроваджених в енергосистемах деяких країн

Тип КШР	Виконання (схема)	Потужність, напруга	Виробник	Де введено, країна	Ко л - во
Регулювання перемиканням відпайок	Одна обмотка с РПН	180 МВА, 330 кВ	Західна Європа	Білорусь	1
Трансформаторний типу (КШРТ) – потужність тиристорних ключів для керування дорівнює номінальній потужності пристрою	Трансформатор з напр. к.з. 100 % та тиристорні ключі на номінальну потужність УШР	50 МВА, 420 кВ	Індія	Індія	1
		60 МВА, 230 кВ	Україна	Ангола	1
		25 МВА, 110 кВ	Росія та Білорусь	росія	6
Керовані підмагнічуванням стрижнів магнітопроводу - потужність управління становить близько 1% номінальної потужності УШР	С 2 обмотками, суміщ.. СО и ОУ	180 МВА, 500 кВ	Мокшан. ел. завод	росія	1
	С одной обмоткой	3,3 МВА, 6-10 кВ	Україна	Монголія	3
	З 2 обмотками, суміщ.. ОУ и КО	10-25 МВА, 35 – 110 кВ	Україна	Казахстан, Білорусь, Литва	35
	с 3 окремими обмотками	63-180 МВА 110-500 кВ			46

Електромагнітна схема фази КШР та розрахункова осцилограма набору потужності для УШР потужністю 180 МВА 500 кВ

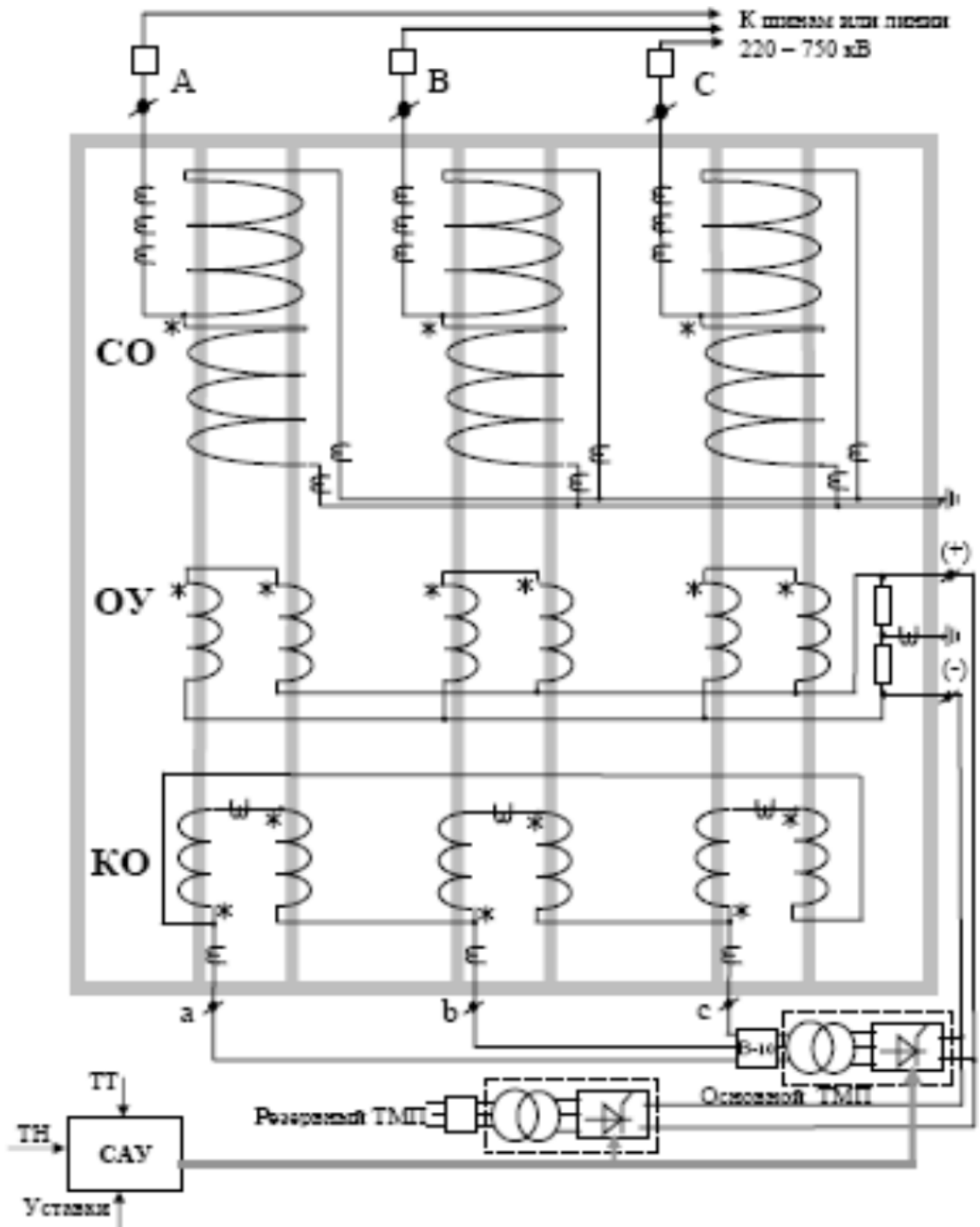




Магнітна система трифазного КШР із підмагнічуванням



Електромагнітна схема трифазного триобмотувального КШР



САУ – система автоматичного керування;

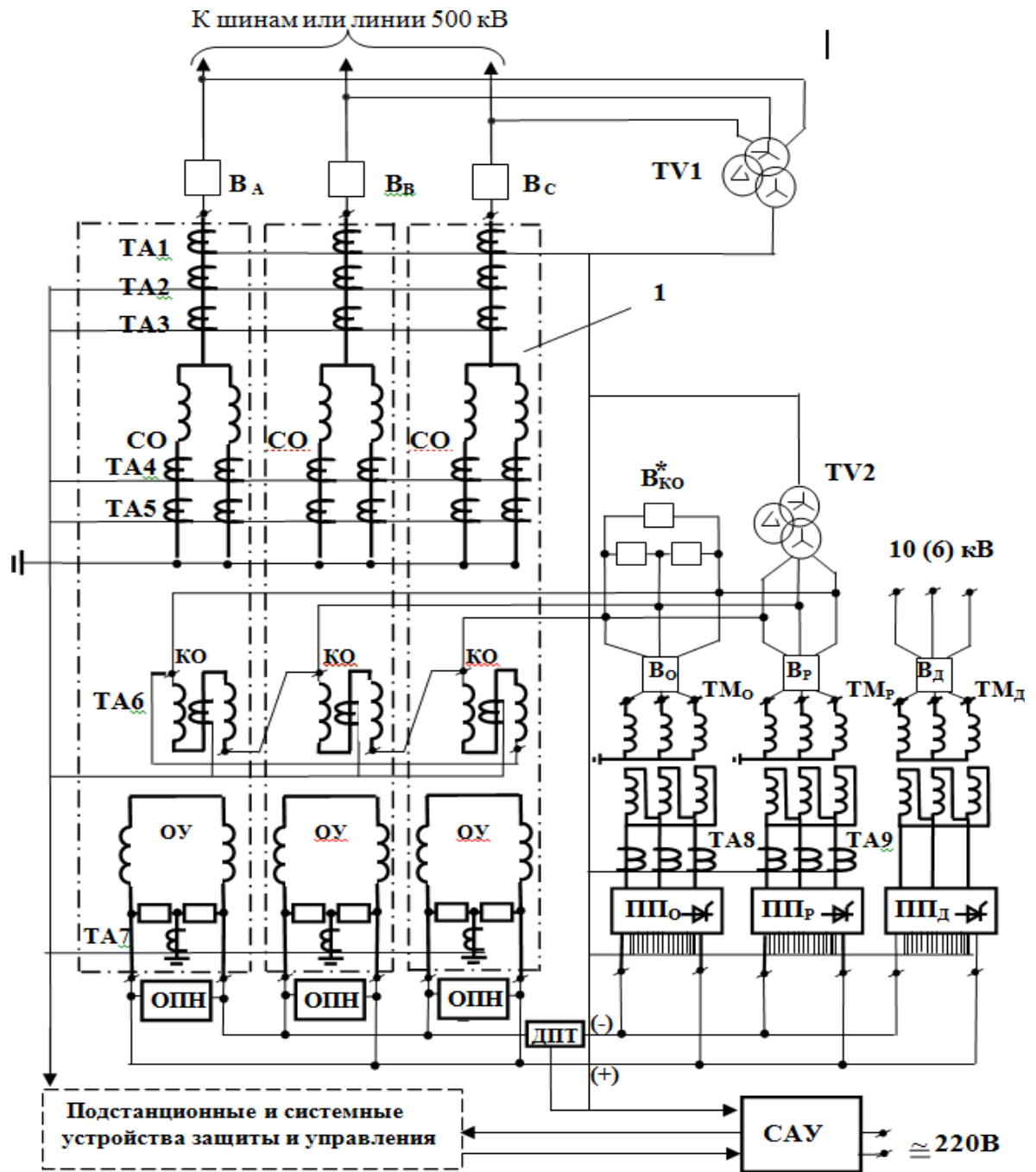
ТМЦ – трансформатор із перетворювачем;

МО – мережна обмотка,

ОУ – обмотка управління,

КО – компенсаційна обмотка

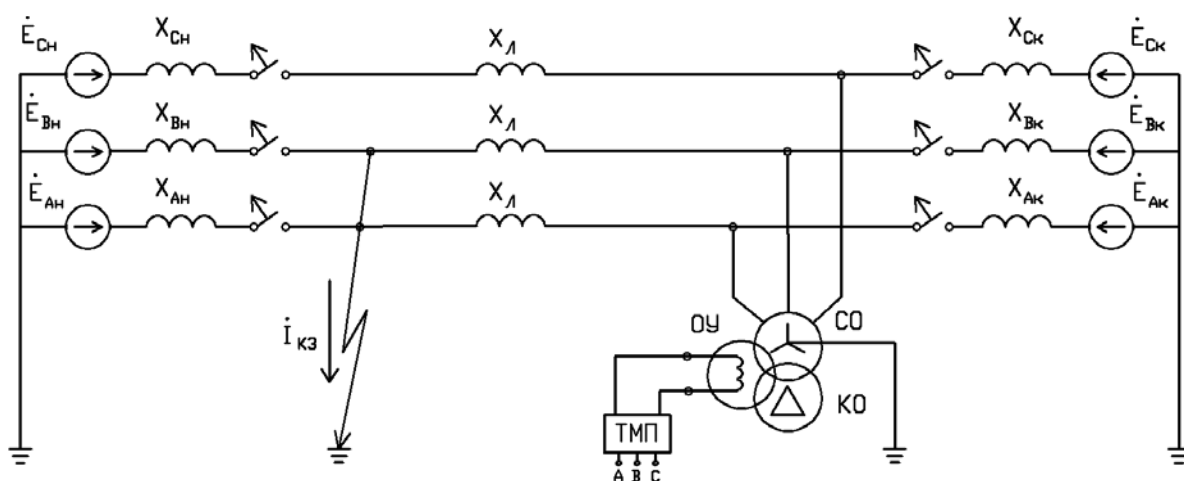
# Схема з'єднань КШР 500 кВ однофазного виконання



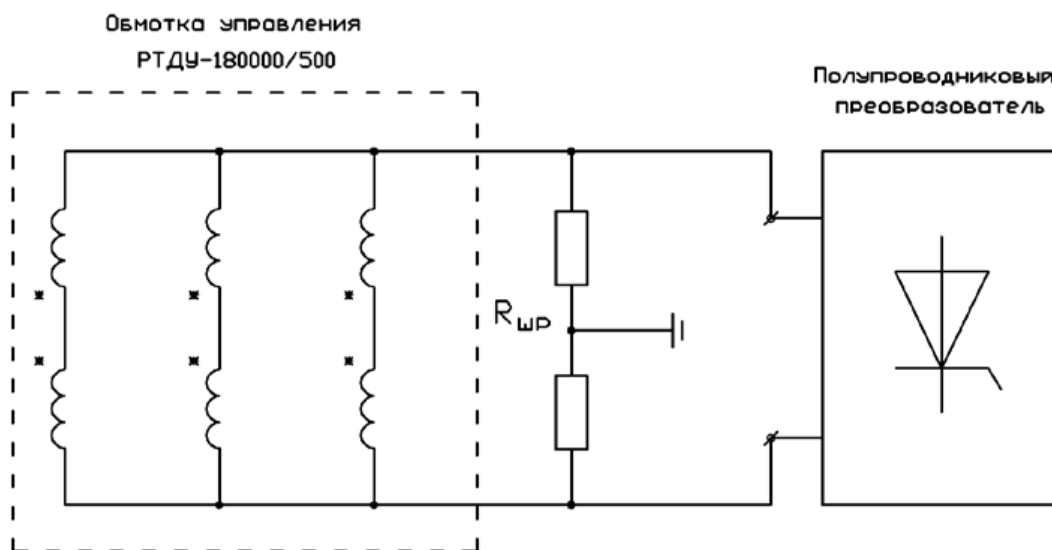




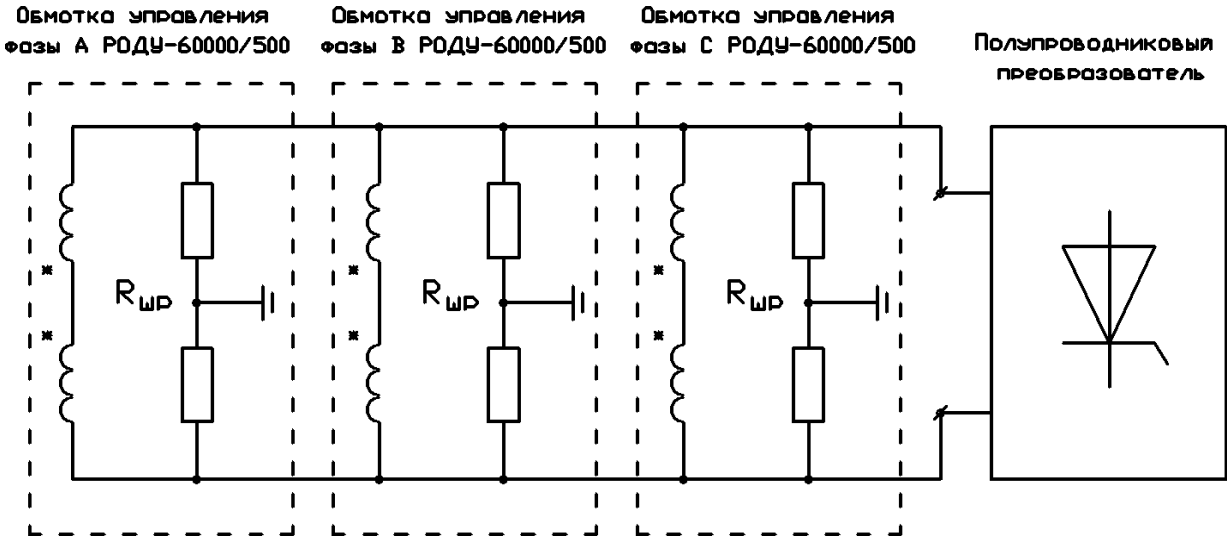
## ТАПВ лінії 500 кВ із встановленим КШР



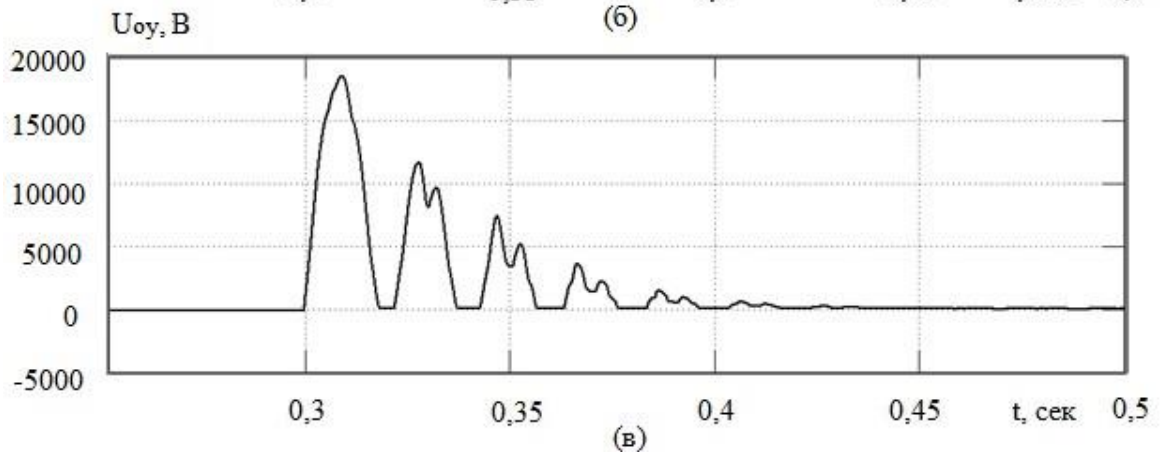
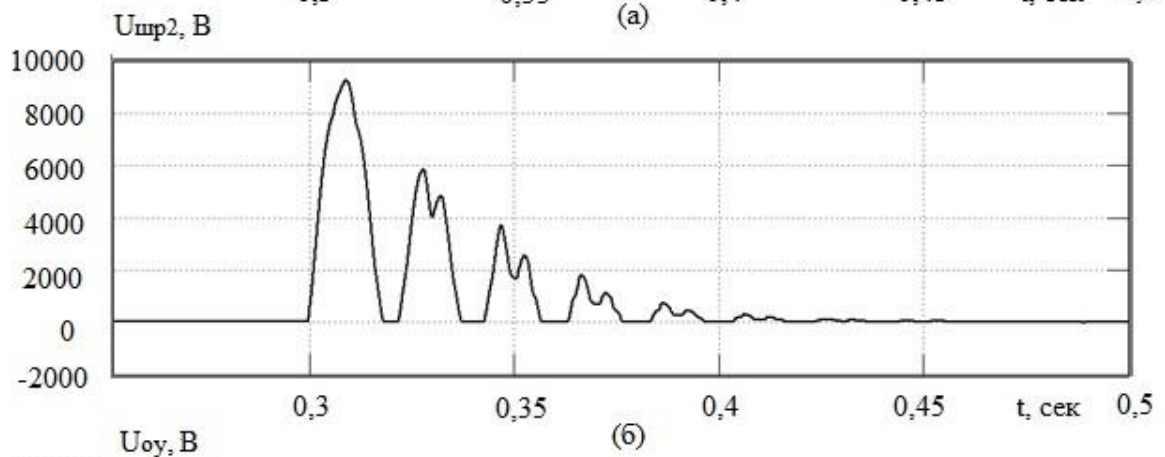
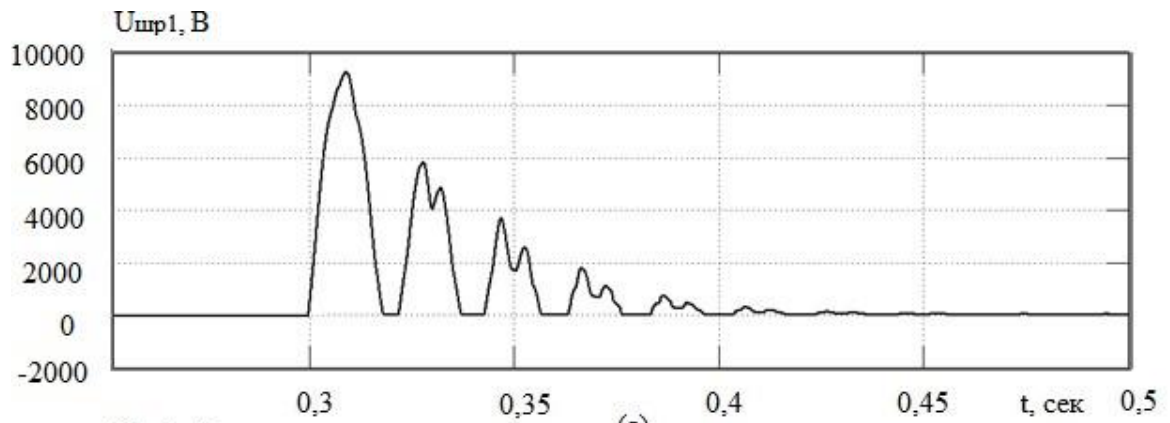
Спрощена електрична схема з'єднань обмотки керування та напівпровідникового перетворювача для КШР типу РТДУ-180000/500



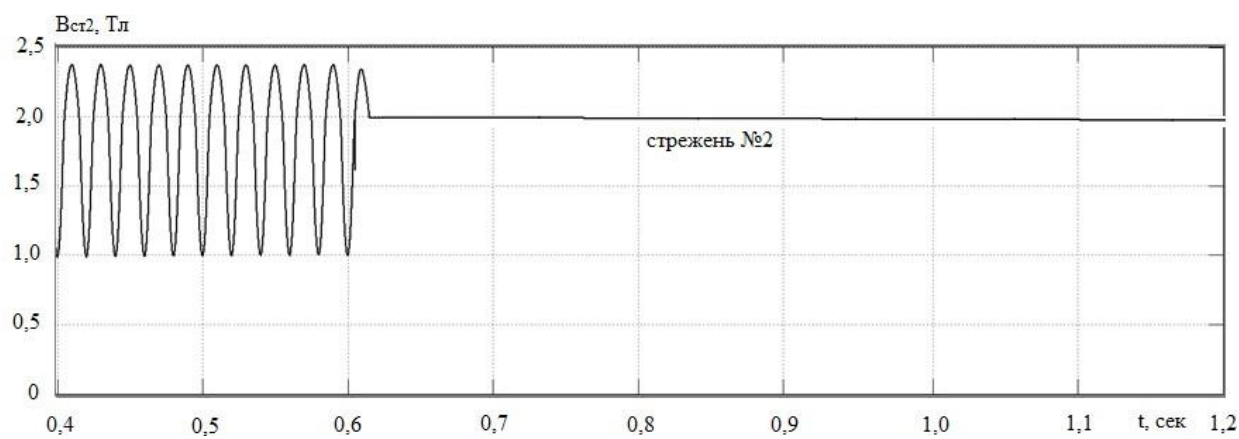
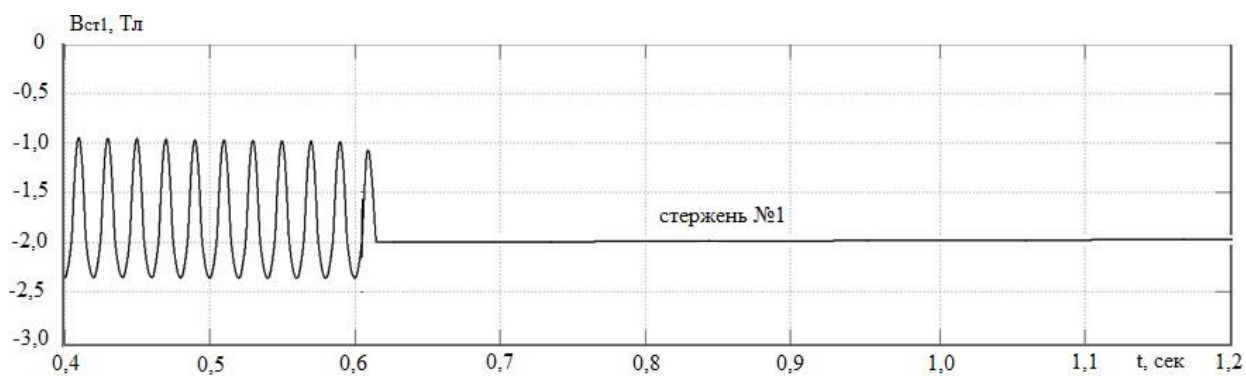
Спрощена електрична схема з'єднань обмотки керування та  
напівпровідникового перетворювача для КШР типу ЗхРОДУ-60000/500



Напруги на шунтуючих резисторах та виводах обмотки управління при включенні КШР типу ЗхРОДУ-60000/500 у мережу після його відключення з номінального режиму



# Зміна індукції у напівстрижнях фази КШР при відключенні реактора з номінального режиму



Напруги на шунтуючих резисторах та виводах обмотки керування при включенні КШР типу ЗхРОДУ-60000/500 у мережу після його відключення з 50 % номінальної потужності

