

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідуючого кафедри

_____ /Д.О. Босий/

«_____» _____ 20__ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Система управління виробництвом та розподілом електроенергії**

Тема **Удосконалення алгоритму керування випрямним агрегатом тягової підстанції для стабілізації напруги**

Thema **Improving the control algorithm of the rectifier unit of the traction substation for voltage stabilization**

Керівник дипломної роботи

доц. _____ В.О.Дьяков

Нормоконтролер

доц. _____ В.М.Ляшук

Студент групи ЕС1927

_____ С.С.Півнов

Student

Pivnov Stanislav

Дніпро-2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту

Імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о зав. кафедри

_____ Босий Д.О.
{підпис}

«17» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС _____ магістр
{освітньо-кваліфікаційний рівень} _

студента групи ЕС1927 _____ Півнов С.С.
{номер групи} {ПІБ}

1 Тема дипломного проекту {роботи} Удосконалення алгоритму керування випрямним агрегатом тягової підстанції для стабілізації напруги

затверджена наказом по університету від «16» 09 2020 р. № 494ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту {роботи} дослідження науково обґрунтованого технічного рішення для вирішення проблеми стабілізації напруги контактної мережі.

4 Зміст пояснювальної записки {перелік питань до розробки}:аналіз існуючих способів і пристроїв для стабілізації напруги контактної мережі, розробка та дослідження способу стабілізації напруги.

5 Перелік креслень {демонстраційного матеріалу}:ілюстрований опис результатів досліджень.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Огляд розділу, %
ВСТУП	17.09	5
ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ	21.10	25
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ЗАДОПОМОГОЮ ЗМІНИ СТУПЕННЯ НАМАГНІЧУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ПІДСТЕРЖНЕЙ	11.11	30
РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРНИХ-ВИПРЯМЛЯЧІВ ТА СТАБІЛІЗУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ	25.11	30
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	04.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдань «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

к.т.н., доц. Дьяков В.О.

⟨підпис⟩

⟨ПБ⟩

Завдання прийняв до виконання

Півнов С.С.

⟨підпис⟩

⟨ПБ⟩

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 113 сторінок, складається з 3 розділів та містить 63 ілюстрацій, 1 таблицю та 53 використаних джерел.

Метою дослідження є розробка та дослідження науково обґрунтованого технічного рішення для вирішення проблеми стабілізації напруги контактної мережі постійного струму напруги 3,3 кВ.

Існуючі пристрої стабілізації напруги на шинах живильної підстанції в умовах тривалого перевищення тягових струмів не завжди здатні підтримувати необхідний рівень випрямленої напруги з достатнім ступенем надійності, і як наслідок, діапазон функціональних можливостей таких пристроїв звужується. Всі ці факти вказують на необхідність розробки агрегату електропостачання підстанції, здатного самостійно компенсувати відхилення напруги від необхідного рівня на шинах підстанції постійного струму 3,3 кВ.

Різко змінний характер навантаження, а також зростаючі потреби в збільшенні пропускної спроможності залізничних магістралей, пов'язані з використанням вантажного і високошвидкісного електрорухомого складу, пов'язані з низкою негативних наслідків, що впливають з особливостей системи електротяги 3,3 кВ постійного струму. До цього числа входять: спотворення форми струму, одержуваного від системи живлення через нелінійності тягової підстанції, збільшення тягових струмів в 1,25...1,5 рази від їх номінального значення і зниження рівня напруги на шинах тягових підстанцій.

Посилення системи тягового електропостачання реалізується за рахунок збільшення перерізу проводів контактної підвіски, будівництва нових тягових підстанцій.

Застосування того чи іншого способу посилення системи електропостачання залежить від умов експлуатації електрифікованих ділянок.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Так, при організації високошвидкісного руху на існуючих залізничних лініях найбільш підходящим варіантом стало застосування вольтододаткових керованих перетворювачів на суміжних живлячих підстанціях постійного струму.

Всі ці факти вказують на необхідність розробки пристроїв, здатних компенсувати відхилення напруги від необхідного рівня на шинах підстанції постійного струму 3,3 кВ. Такі пристрої повинні мати високий ступінь надійності та малі втрати електроенергії.

Ключеві слова: ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ВИПРЯМНИЙ АГРЕГАТ, ВИСОКОШВИДКІСНИЙ ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ, СТАБІЛІЗАЦІЯ НАПРУГИ НА ШИНАХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		5

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ.....	12
1.1 Стабілізація напруги тягової підстанції з боку первинної обмотки трифазного трансформатора.....	12
1.1.1 Зміна числа витків первинної обмотки трифазного трансформатора.....	12
1.1.2 Компенсація реактивної потужності в мережі, яка живить трифазний трансформатор.....	18
1.2 Стабілізація напруги підстанції з боку вторинної обмотки трифазного трансформатора.....	21
1.2.1 Використання вольтододаткових пристроїв напівпровідникових перетворювачів.....	21
1.2.2 Використання надпровідникових індуктивних накопичувачів енергії.....	25
1.3 Стабілізація напруги контактної мережі за допомогою тягового трансформатора з модифікованою конструктивною схемою.....	26
Висновки по 1 розділу.....	29
2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗМІНИ СТУПЕННЯ НАМАГНІЧУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ПІДСТЕРЖНЕЙ.....	30
Лінії по переробці трансформатора.....	30

					02.15.EC1927.РД.2020-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Півнов С.С.			Удосконалення алгоритму керування випрямним агрегатом тягової підстанції для стабілізації напруги	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Дьяков В.О.					6	113
Н. Контр.		Ляшук В.М.				ДНУЗТ, ІСЕ, зр. EC1927		
Затверд.								

2.1 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопроводу трансформатора без короткозамкнутих витків на підстержнях (варіант1).....30

2.2 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопроводу трансформатора з короткозамкненими витками(варіант 2).....51

2.3 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопроводу трансформатора з короткозамкненими витками і секціонованої первинною обмоткою (варіант3).....61

2.4 Порівняльний аналіз розроблених способів стабілізації напруги66

Висновки по 2 розділу.....67

3. РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ

ТРАНСФОРМАТОРНИХ-ВИПРЯМЛЯЧІВ ТА СТАБІЛІЗУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТІ.69

3.1 Дослідження номінального режиму роботи трансформатора.....69

3.2 Дослідження режиму холостого ходу трансформатора зі стабілізуючими властивостями.....85

3.3 Дослідження режиму короткого замикання трансформатора зі стабілізуючими властивостями.....92

3.4 Деякі результати досліджень випрямляча трансформаторно-випрямного агрегату.....98

Висновки по 3 розділу.....103

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....104

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....106

ДОДАТОК 1. ПЕРЕЛІК ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ІЗ СТАБІЛІЗУЮЧИМ ЕФЕКТОМ.....113

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Різко змінний характер навантаження, а також дедалі більші потреби в збільшенні пропускної спроможності залізничних магістралей, пов'язані з використанням вантажного і високошвидкісного електрорухомого складу (ЕРС), пов'язані з низкою негативних наслідків, що впливають з особливостей системи електротяги 3,3 кВ постійного струму. В їх число входять: спотворення форми струму, одержуваного від системи живлення через нелінійності тягової підстанції, збільшення тягових струмів в 1,25...1,5 рази від їх номінального значення, зниження рівня напруги на шинах тягових підстанцій, зменшення коефіцієнта потужності, що викликається роботою тягової підстанції та ЕРС, нагрів обладнання живильних підстанцій.

Посилення системи тягового електропостачання реалізується за рахунок збільшення перерізу проводів контактної підвіски, будівництва нових тягових підстанцій, а також пунктів паралельного з'єднання і схем подвійної напруги 6,6/3,3 кВ з пунктами підвищеної напруги, впровадження сучасного обладнання, елементна база якого заснована на потужних IGCT-тиристорах і IGBT-транзисторах, використання вольтододаткових пристроїв (ВДУ), застосування згладжуючих піки струмів навантаження накопичувальних елементів, а також впровадження трифазної групи трансформаторів з магнітними шунтами.

Застосування того чи іншого способу посилення системи електропостачання залежить від умов експлуатації електрифікованих ділянок. Так, при організації високошвидкісного руху на існуючих залізничних лініях найбільш підходящим варіантом стало застосування вольтододаткових керованих перетворювачів на суміжних живлячих підстанціях постійного струму. Дослідження, що проводились в 1983-х роках Р.І. Мірошниченко по вивченню роботи засобів регулювання на основі магніто-діодних приставок до випрямлячів, не дали бажаних результатів [1-4].

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні керовані тиристорні перетворювачі в умовах тривалого перевищення тягових струмів не здатні підтримувати необхідний рівень випрямленої напруги з необхідним ступенем надійності, і як наслідок, діапазон функціональних можливостей таких пристроїв різко звужується. Всі ці факти вказують на необхідність розробки пристроїв, здатних компенсувати відхилення напруги від необхідного рівня на шинах підстанції постійного струму 3,3 кВ. Такі пристрої повинні мати високий ступінь надійності та малі втрати електроенергії.

Метою дослідження є Розробка та дослідження науково обґрунтованого технічного рішення для вирішення проблеми стабілізації напруги контактної мережі постійного струму напруги 3,3 кВ.

Об'єкт дослідження - трансформаторно-випрямний агрегат підстанції постійного струму зі стабілізуючим ефектом.

Предметом дослідження є електромагнітні процеси, що протікають в конструктивних елементах трансформаторно-випрямного агрегату при різних режимах роботи і забезпечують його стабілізуючі властивості.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети завданнями роботи є:

1. Розробка і дослідження способу стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней тягового трифазного трансформатора агрегату.
2. Дослідження впливу основних параметрів магнітопровіда і обмоток трансформатора на процес стабілізації напруги.
3. Розробка конструкції трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями для тягових підстанцій постійного струму.
4. Математичне моделювання основних режимів роботи трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом.
5. Проведення експериментальних випробувань на моделі трифазного трансформатора для верифікації його стабілізуючих властивостей.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Розробка методики визначення основних параметрів трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями.

7. Дослідження впливу випрямляча на стабілізуючу функцію трансформаторно-випрямного агрегату підстанції 3,3 кВ.

Методика досліджень. В ході досліджень використовувалися методи математичного аналізу, теорії функцій комплексного змінного, теорії нелінійних ланцюгів, лінійних електричних ланцюгів, теорії електромагнітного поля, теорії подібності, чисельні методи з використанням пакета програми Elcut.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Способи стабілізації напруги контактної мережі за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора.

2. Результати розрахункових досліджень трансформаторно-випрямного агрегату із стабілізуючим ефектом в різних режимах його роботи.

3. Методика розрахунку трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом.

Наукова новизна. В ході роботи були отримані наступні результати:

1. Розроблено новий спосіб стабілізації напруги контактної мережі за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора, трансформаторно-випрямного агрегату підстанції постійного струму.

2. Побудовано математичну модель трансформатора із стабілізуючим ефектом, що описує електромагнітні процеси, що протікають в трифазному трансформаторі зі стабілізуючими властивостями.

3. Розроблено методику розрахунку трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів підтверджена: результатами математичного моделювання в середовищі пакета Elcut 6.0 і

експериментальними даними, отриманими в ході проведення серії досліджень на моделі однофазного трансформатора з стабілізуючими властивостями.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем на міжнародній студентській науковій конференції «Теоретичне та практичне застосування результатів сучасної науки» (Запоріжжя, 27 листопада 2020 рік).

Публікації.

Півнов С.С. «Удосконалення алгоритму керування випрямним агрегатом тягової підстанції для стабілізації напруги» // Теоретичне та практичне застосування результатів сучасної науки: тез.доп. на міжнародній студентській науковій конференції,(27.11.2020).- Запоріжжя,2020.- с. 79-81.ISBN978-617-7171-56-9.
DOI10.36074/27.11.2020v2.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

Існуючі способи стабілізації напруги на тягових підстанціях постійного струму (слід зазначити, що стабілізація напруги контактної мережі жорстко пов'язана зі стабілізацією напруги на шинах тягової підстанції, тому ці два поняття будемо вважати еквівалентними) можна розділити на три групи:

1. Способи стабілізації напруги тягової підстанції з боку первинної обмотки трифазного трансформатора.
2. Способи стабілізації напруги тягової підстанції з боку вторинної обмотки трифазного трансформатора.
3. Способи стабілізації напруги, пов'язані зі зміною конструкції трифазного трансформатора, що входить до складу трансформаторно-випрямного агрегату тягової підстанції.

1.1 Стабілізація напруги тягової підстанції з боку первинної обмотки трифазного трансформатора

1.1.1 Зміна числа витків первинної обмотки трифазного трансформатора

Стандартами ГОСТ 11920-85 [5] і ГОСТ 12965-85 [6] встановлюється діапазон потужностей і межі регулювання первинної напруги для силових трансформаторів з РПН.

Вторинна напруга U_2 трифазного трансформатора, що є ядром перетворювального агрегату, може змінюватися при збільшенні струму вторинної обмотки I_2 або при зміні напруги первинної обмотки U_1 . Такі зміни вторинної напруги безпосередньо впливають на стабільність випрямленої напруги тягової підстанції.

Тому з урахуванням можливого відхилення напруги на первинній обмотці трансформатора від номінального значення більш ніж на 10% у силових

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

знижувальних трансформаторів роблять відгалуження на стороні високої напруги, підтримуючи, відношення $\frac{U_{1н}}{U_{2н}}$ постійним [7].

Схема пристрою перемикачів під навантаженням з струмообмежувальним реактором показана на рис. 1.1.

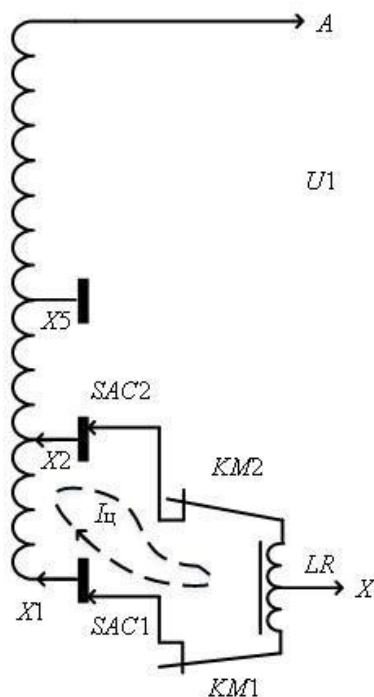


Рисунок 1.1 – Схема пристрою перемикачів під навантаженням з струмообмежувальним реактором LR (проміжна позиція при перемиканні між відгалуженнями, де $I_{ц}$ - протікаючий струм)

При переході з одного ступеня на інший струм, що протікає по сусіднім відгалуженням, обмежується реактором LR, тривалість протікання такого струму не перевищує 1 секунди, а загальний час переходу між сходинками не перевищує 3 секунди. У силових трансформаторах класу напруги до 35 кВ включно і потужністю до 6300 кВА застосовується спрощена схема регулювання напруги без вимикачів KM1 і KM2.

До розмикання контактів перемикачів SAC1 і SAC2 їх відключають від мережі живлення або від навантаження вимикачами KM1 і KM2. У момент часу, коли конфігурація схеми забезпечує протікання циркулюючого струму $I_{ц}$, реактор

LR своїм опором обмежує його стрибкоподібну зміну вище допустимого значення щільності струму проводів первинної обмотки.

Якщо первинна обмотка містить 5 відгалужень (див. рис. 1.1 всі відгалуження не показані), такий трансформатор має 5 зовнішніх характеристик - залежностей напруги вторинної обмотки від струму вторинної обмотки (рис. 1.2). (U_{201} - напруга холостого ходу трансформатора при роботі на 1-му відгалуженні первинної обмотки, U_{205} - напруга холостого ходу трансформатора при роботі на 5-му відгалуженні первинної обмотки, 1..5 - зовнішні характеристики перетворювального трансформатора, 6 - зовнішня стабілізована характеристика, ΔU - зміна напруги вторинної обмотки трансформатору)

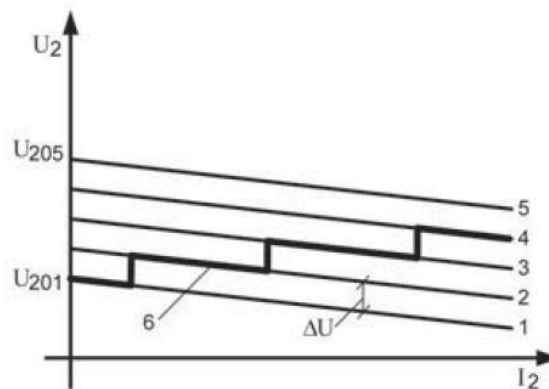


Рисунок 1.2 - Зовнішні характеристики перетворювального трансформатора

При перемиканні між відгалуженнями $X1$ і $X2$ (див.рис. 1.1), тобто зі зміною числа витків первинної обмотки, відбувається перехід роботи трансформатора з однієї зовнішньої характеристики на іншу. При цьому рівень напруги вторинної обмотки змінюється на значення, яке визначається з [7] за формулою:

$$\Delta U = 2,5 \frac{U_{10}}{100}, \quad (1.1)$$

де U_{10} - напруга холостого ходу первинної обмотки, В.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Крім механічних перемикачів можуть використовуватися керовані реактори, що підключаються до відпайки первинної обмотки трансформатора.

До трансформатора типу ТДПУ (ТДРУ)-20000/35ЖУ1 або ТДПУ20000/10ЖУ1 підключають випрямні установки, зібрані за схемами: «дві зворотні зірки з зрівняльним реактором» або трифазна 6-ти або 12ти пульсова [8], крім того використовуються трансформатори типу ТДП-16000/10 і ТРДП-16000/10 [9]. Діапазон регулювання напруги вторинної обмотки становить $U_{2\phi} \div 1,2U_{2\phi}$.

Підтримка певного рівня випрямленої напруги тягової підстанції здійснюється апаратами, розміщеними в шафах типу ШАУНТ-3У4 (схема автоматики побудована на магнітних підсилювачах) і ШАУНТ-1У4 [10] (схема автоматики побудована на тиристорах). У режимі інвертування або випрямлення для трансформаторів можуть підключатися випрямно-інверторні перетворювачі типу ВІПЕ-2 [11].

До складу первинної обмотки трансформатора, регульованого під навантаженням (рис. 1.3), входить основна обмотка з числом витків w_{β} і регульовальна обмотка з числом витків w_{α} .

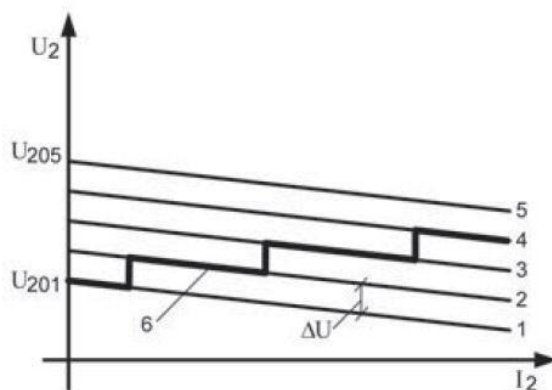


Рисунок 1.3 - Принципова схема безконтактного регулювання під навантаженням з керованими реакторами

До відводів регульовальної частини первинної обмотки підключені два керованих реактора УР1 і УР2 [9, 12] з обмотками управління w_y і дросельними обмотками w_d . Опір реакторів УР1 і УР2 залежить від струмів намагнічування I_{y1}

і I_{y2} , що протікають в обмотках управління w_y . Процес регулювання напруги полягає в підмагніченні одного реактора і розмагнічуванні іншого. У граничних станах, коли реактор УР1 повністю намагнічений, його опір мінімальний, в той же час опір повністю розмагніченого реактора УР2 максимальний. Плавність регулювання напруги вторинної обмотки забезпечується тим, що число витків первинної обмотки змінюється від $w_\beta + w_\alpha$ до w_β . При цьому коефіцієнт трансформації трансформатора залишається постійним і визначається як:

$$k = \frac{1}{w_2} (w_\beta + \gamma w_\alpha), \quad (1.2)$$

де w_2 - число витків вторинної обмотки трансформатора;

γ - параметр, що залежить від режиму намагнічування реакторів.

Зміна ступеня намагнічування керованих реакторів дозволило отримати сімейство зовнішніх характеристик перетворювального агрегату (рис. 1.4) [7,9,11].

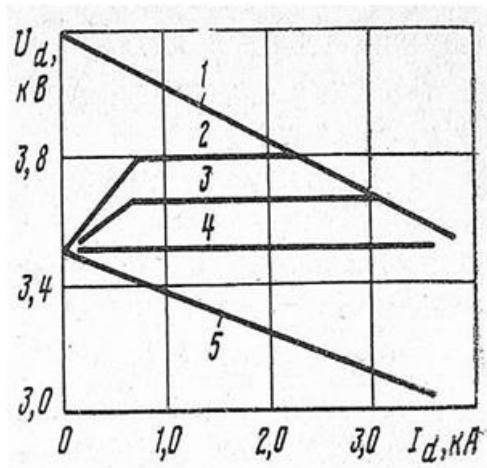


Рисунок 1.4 – Зовнішні характеристики перетворювального агрегату, де I_d - випрямлений струм тягової підстанції, U_d - випрямлена напруга тягової підстанції

Зона регулювання напруги агрегату задана кривими 1 і 5. Крива 1 відповідає розмагнічуванню реактора УР1 і намагнічуванню реактора УР2, крива

5 відповідає намагнічуванню $УР1$ і розмагнічуванню $УР2$, крива 4 відповідає режиму стабілізації напруги агрегату, криві 2 і 3 відповідають режимам, які виходять стабілізовані.

Перетворювальний трансформатор, керовані реактори, а також шафа управління формують систему автоматичної стабілізації напруги тягової підстанції (АСНТп). Сучасні шафи управління побудовані на тиристорах. З джерела [10] відома система АСНТп, до складу якої входять перетворювальний трансформатор ТДП-16000/10, реактор РТДП-6300/10 і підмагнічені тиристорний регулятор ШАУНТ-1У4. Така система здатна підтримувати випрямлену напругу тягової підстанції в діапазоні 3500...3800 В.

З 2006 року використовуються регулятори типу ШАУН5-У4 [13]. Дослідження системи АСНТп, до складу якої входив трансформатор ТРДП-16000/10 ЖУ1, реактори РТДП6300/10 і регулятор ШАУН5-У4, показали, що напруга тягової підстанції стабілізується в діапазоні від 3500 В до 3800 В.

Модифікацією пристроїв РПН трансформатора є включення замість керованих і некерованих реакторів тиристорних ключів (рис. 1.5) [7, 11].

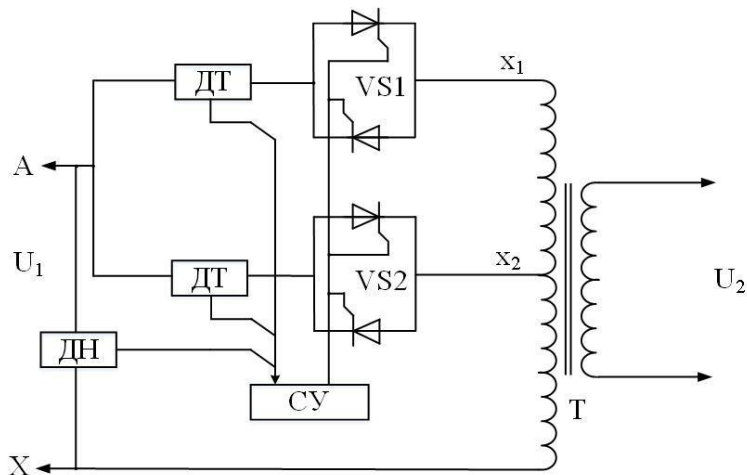


Рисунок 1.5 – Принципова схема тиристорного РПН трансформатора з залежним від струмів і напруги способів перемикання тиристорів

Розробка тиристорних регуляторів трансформаторів дозволить підвищити якість напруги, скоротити час компенсації відхилення напруги на вторинній обмотці трансформатора [14].

Принципова особливість такого регулятора полягає в тому, що в схемі відсутній реактор. Схема такого регулятора зібрана з двох тиристорних ключів VS1 і VS2, а також датчиків струму (ДТ) і напруги (ДН) і системи управління СУ. Датчики струму задають напрямки струмів, що протікають в відгалуженнях первинної обмотки, датчик напруги задає полярність напруги, прикладеної до первинної обмотки трансформатора. Тим самим виключається можливість протікання циркулюючого струму і струму короткого замикання в контурі VS1-x1-x2-VS2-VS1, виключається можливість падіння робочого струму до нуля. Подібне схемне рішення може бути виконано і для трифазного тиристорного регулятора [7].

Широке регулювання напруги на стороні первинної обмотки можливо при установці регулюючої апаратури, однак при цьому ускладнюються конструкція обмоток трифазного трансформатора, збільшуються розміри його магнітної системи. Все це веде до подорожчання конструкції трансформатора.

1.1.2 Компенсація реактивної потужності в мережі, яка живить трифазний трансформатор

Однією з причин зниження напруги у споживача при збільшенні струму навантаження є різке зростання реактивних втрат напруги на елементах мережі. З метою зниження реактивної складової струму в мережі живлення вводяться фільтро-компенсуючі пристрої, що являють собою конденсаторно-реакторні блоки, налаштовані на частоти вищих гармонік струму [15] і трансформаторно-вентильні компенсатори реактивної енергії [16].

Існують альтернативні засоби регулювання напруги на шинах тягової підстанції постійного струму в залежності від струмового навантаження при наявності батареї ємнісної компенсації, що дозволяють залишати ємність цієї батареї незмінною і плавно регулювати величину реактивної потужності батареї. До таких способів можна віднести використання керованого конденсаторного-тиристорного джерела реактивної потужності з узгоджувальним трансформатором [17] (рис. 1.6).

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

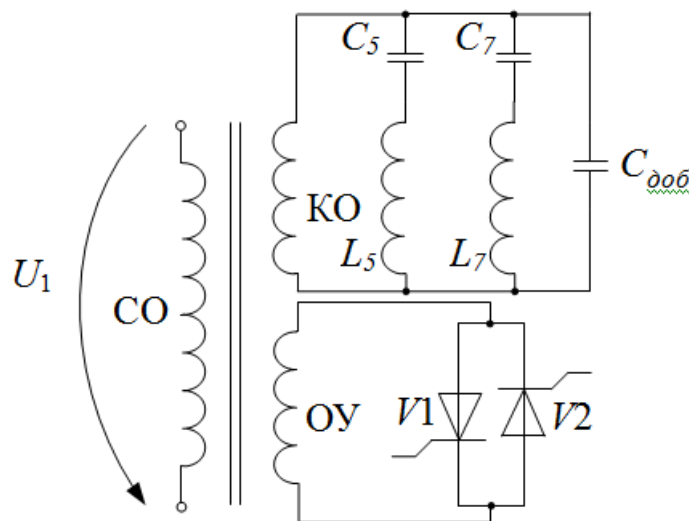


Рисунок 1.6 – Джерело реактивної потужності з узгоджувальним трансформатором

Узгоджувальний трансформатор складається з мережевої обмотки СО, компенсаційної обмотки КО з фільтрами вищих гармонік і додаткової батареї конденсаторів $C_{доб}$ і обмотками управління ОУ з тиристорним блоком, що складається з зустрічно включених тиристорів V1-V2.

Для трансформатора може бути обраний силовий трансформатор типу ТРДП-16000/10ЖУ1.

На рис. 1.7 представлена осцилограма вихідної напруги при навантаженні в мережі 24 МВт і 6 МВт.

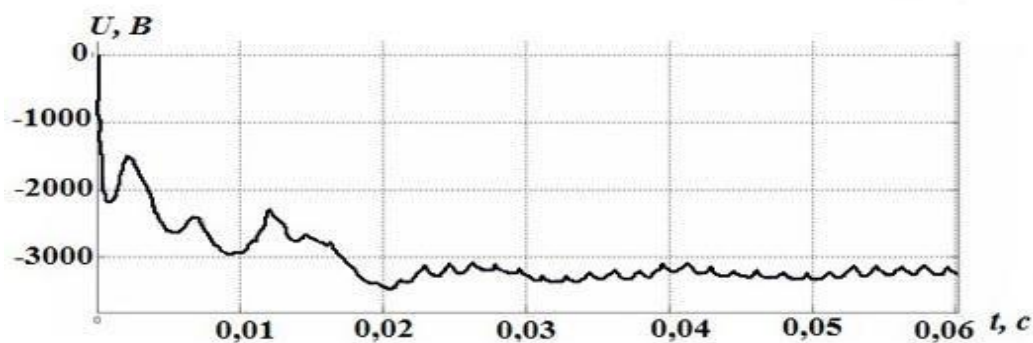


Рисунок. 1.7 – Вихідні напруги тягової підстанції при дворазовому навантаженні

Кут відкриття тиристорів при цьому навантаженні $\alpha=180^\circ$. Як видно, напруга на виході підстанції навіть при подвійному перевантаженні залишається на необхідному рівні (3300 В).

При номінальному навантаженні кут відмикання тиристорів може перебувати в межах $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. Це дозволяє не перевантажувати тиристори при перекомпенсації і підтримувати напругу на виході підстанції на необхідному рівні.

Перевага компенсації реактивної потужності живильної трансформатор мережі - підтримка напруги на вторинній обмотці трансформатора ТРДП-16000/10ЖУ1 на необхідному рівні. Недолік полягає в необхідності введення додаткових фільтруючих пристроїв, що усувають значні пульсації в формі випрямленої напруги підстанції.

1.2 Стабілізація напруги підстанції з боку вторинної обмотки трифазного трансформатора

1.2.1 Використання вольтододаткових пристроїв напівпровідникових перетворювачів

Перетворювач випрямний для електрифікованого транспорту регульований (ПВЕР).

Одним із способів посилення ділянок електрифікованого залізничного транспорту є установка вольтододаткових пристроїв на тягових підстанціях постійного струму. До таких технічних засобів відноситься перетворювач випрямний для електрифікованого транспорту регульований (ПВЕР). Перетворювач складається з регульованих і нерегульованих частин. Нерегульована частина виконана за схемою «дві зворотні зірки з зрівняльним реактором». Регульована частина виконана за схемою Ларіонова. Живлення здійснюється від трансформатора типу ТМП-3200/10.

Номінальна напруга перетворювача складає 600 В, номінальний випрямлений струм - 3,0 кА.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Управління перетворювачем - амплітудно-фазне [18]. Регулювання напругою здійснюється подачею на керовані електроди тиристорів імпульсних сигналів з рівним зрушенням по фазі на кут α [9].

Вихідні характеристики агрегату ПВЕР наведені на рис. 1.8.

Переваги використання ПВЕР:

1. Вольтододаткова частина, що входить в ПВЕР, дозволяє не тільки регулювати (характеристика 4), а й стабілізувати (характеристика 3) напругу на шинах тягової підстанції.

2. Використання паралельно включених шунтуючих діодів в схему регульованої частини ПВЕР дозволяє забезпечити безперервне протікання тягового струму при зникненні сигналів управління на виходах тиристорів, отже, підвищується надійність роботи тягової підстанції.

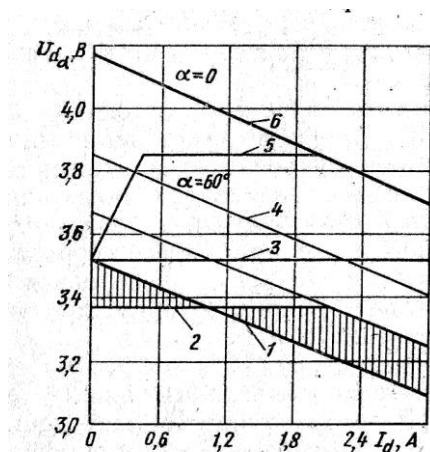


Рисунок. 1.8 – Вихідні характеристики агрегату ПВЕР

(I_d - випрямлений струм, U_d - випрямлена напруга, 1 - природна некерованою частини; 2 - в інверторному режимі регульованої частини; 3 - стабілізована; 4, 5 - регульовані; 6 - сумарна некерованою і керованою частин)

Недоліки використання ПВЕР:

1. Використання шунтуючих діодів в схемі ПВЕР підвищує коефіцієнт потужності регульованої частини всього на 4%.
2. Використання додаткової регульованої частини в ПВЕР збільшує його вартість.

Перетворювальний агрегат з магніто-тиристорним регулятором випрямленої напруги (ВДУ ЛПЖТ)

Пристрій складається з основного перетворювача і магніто-тиристорного регулятора. Магніто теристорний регулятор складається з вольтододавального трансформатора (перетворювальний трансформатор типу ТМР-3200/35) і блоку тиристорів. Первинна обмотка вольтододавального трансформатора (ВДТ) підключена до вторинної обмоти основного перетворювального трансформатора, а також через групу тиристорів до його нульового виводу. Кінці вторинних обмоток ВДТ з'єднані з випрямлячем.

Тиристорами здійснюється амплітудно-фазне регулювання напруги, що живить первинну обмотку ВДТ. Залежно від кута регулювання тиристорів напруга вторинних обмоток ВДТ змінюється в діапазоні 0...600 В [18]. Таким чином, діапазон регулювання фазної напруги вторинної обмотки ВДТ становить $U_{2\phi} \div 1,17 U_{2\phi}$.

Недоліки агрегату:

1. Наявність зустрічно включених тиристорів не забезпечує постійної підтримки магнітної рівноваги в стрижнях ВДТ, внаслідок цього виникають перенапруги, що представляють загрозу для працюючих тиристорів і ізоляції ВДТ.
2. Напруга, що формується на компенсаційній обмотці, не здатна забезпечити підйом напруги на шинах живильної підстанції до необхідного рівня.
3. Включення ВДТ різко знижує коефіцієнт потужності всієї системи в цілому [9,18].

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Випрямно-побутовий перетворювач (ВІП) з регульованою напругою.

Використовується для централізованого регулювання напруги на електрифікованій ділянці. До складу входять: керовані реактори УР1-УР2 кожної фази трифазної системи, ШАУНТ (шафа автоматичного управління напругою на тиристорах), трансформатор ТДП-16000/10Ж, випрямно-побутовий блок, вимірювальні трансформатори, система управління, система датчиків гармонійного складу випрямленої напруги і імпульсний трансформатор.

Регулювання напруги тягової підстанції здійснюється шляхом зміни напруги вторинної обмотки трансформатора за рахунок регулювання коефіцієнта трансформації керованими реакторами [9].

Переваги ВІП:

1. Регулювання випрямленої напруги в широкому діапазоні, як в режимі випрямлення, так і в режимі інвертування.
2. Перехід з режиму випрямлення (а також при стабілізації напруги) в режим інвертування здійснюється автоматично на основі даних про рівень напруги в тяговій мережі і гармонійного складу випрямленої напруги.

Недоліки ВІП:

1. В процесі стабілізації напруги беруть участь керовані реактори з підмагнічуванням, що знижують коефіцієнт потужності ВІП.
2. Ступенева зміна напруги на вторинній обмотці трансформатора призводить до виникнення небезпечних перехідних процесів, що протікають в його первинній та вторинній обмотках, тим самим знижується надійність всієї системи живлення.

Вольтододаткові пристрої.

Схема ВДУ містить трансформатор, некерований випрямляч і керований випрямляч з шунтуючими діодами і тиристорами (рис. 1.9).

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

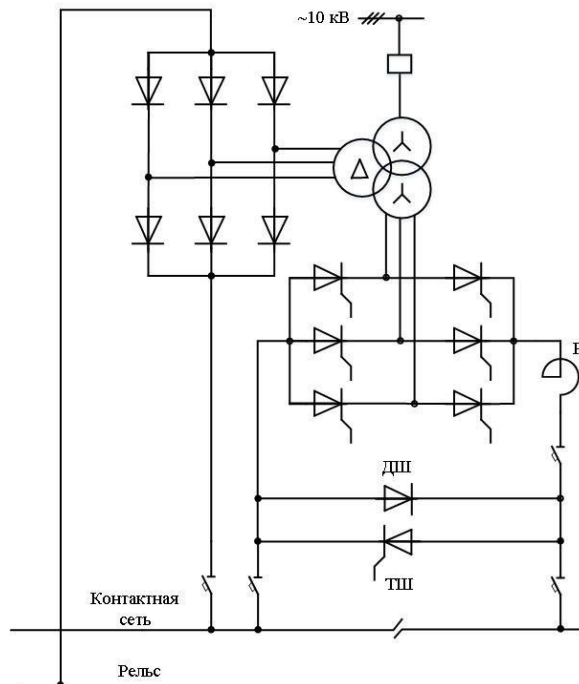


Рисунок. 1.9 – Схема підсилювального пункту з ВДУ

Керований випрямляч ВДУ підключається до контактної мережі. Номінальна випрямлена напруга керованого випрямляча становить 540 В, номінальний випрямлений струм випрямляча - 3 кА. Така схема дозволяє підвищити напругу в мережі на 540 В [18].

Вольтододатковий пристрій, містить перетворювальний трансформатор, крім того тут використовується вольтододатковий трансформатор і регулюючий орган (РО) - керований і некеровані реактори (НР-УР). Пристрій здатний стабілізувати зовнішні характеристики в діапазоні від 3,5 до 3,8 кВ [18,19].

1.2.2 Використання надпровідникових індуктивних накопичувачів енергії

З [20] відома схема тягової підстанції зі надпровідниковим індуктивним накопичувачем енергії (СПИН) (рис. 1.10).

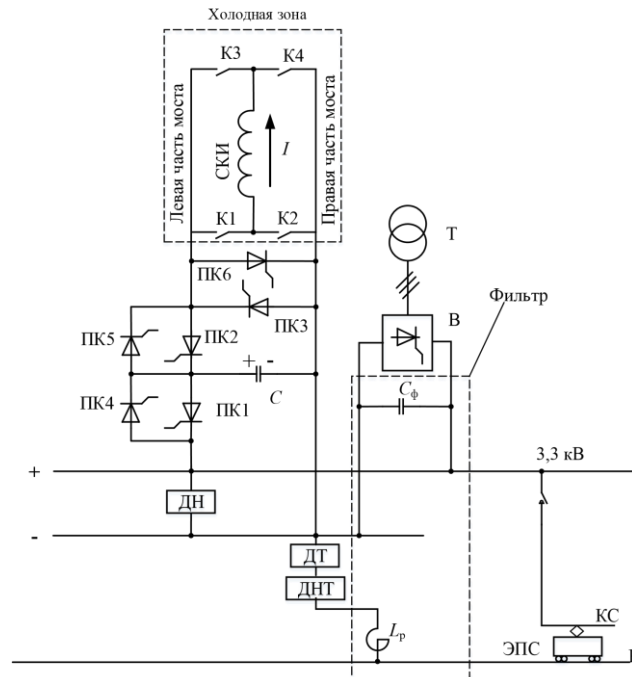


Рисунок 1.10 – Схема тягової підстанції постійного струму зі СПИН

До складу СПИН входять наступні компоненти: надпровідна котушка індуктивності (СКИ), обмотка якої виконана з надпровідників другого роду (NbTi, Nb3Sn, V3Ga), фільтр, що згладжує (складається з конденсатора C_ϕ і реактора L_p), Блок конденсаторів С, Кріотрони К1-К4, напівпровідникові керовані ключі ПК1-ПК6, блок управління БУ, датчик струму ДТ, датчик напрямку струму ДНТ і датчик напруги ДН. У СПИН кріотрони К1-К4, напівпровідникові керовані ключі ПК1-ПК6 і блок конденсаторів є блок сполучення СКИ з системою тягового електропостачання. Такий блок дозволяє уникнути прямого підключення СПИН до системи електропостачання, не допускаючи збільшення струмів I в обмотках двигунів і не викликаючи аварійної перенапруги в мережі тягового електропостачання [20].

В [21] відзначається, що при 25-кратному кидку струму тягового фідера напруга фідера знижується на 375 В. При середньодобовому струмі (100 А) напруга тягового фідера не падає нижче 3375 В. Номінальне значення напруги тягового фідера становить 3500 В [22].

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Необхідність забезпечення кріогенних температур, обмеження по швидкості введення і виведення енергії з СПИН, залежність поведінки надпровідних обмотувальних проводів від зовнішніх умов (наприклад, від зовнішніх і власних магнітних полів) поки роблять використання СПИН вельми проблематичним.

1.3 Стабілізація напруги контактної мережі за допомогою тягового трансформатора з модифікованою конструктивною схемою

Відомий трансформатор з коефіцієнтом трансформації, що змінюються без застосування комутуючих апаратів. Вторинна обмотка цього трансформатора виконана у вигляді двох послідовно з'єднаних секцій. Управління коефіцієнтом трансформації здійснюється за рахунок зміни величин магнітних потоків, зчіпних з першою і другою секціями вторинної обмотки. У трансформаторі між цими секціями розташований магнітний шунт з обмоткою підмагнічування [17].

Схема трансформатора представлена на рис. 1.11.

Пристрій працює наступним чином. Основний магнітний потік, створюваний первинною обмоткою, через магнітний шунт розділяється на дві частини. Одна з них замикається по магнітному шунту, розташованому в середній частині магнітопровіда, інша - по нижньому ярму. Якщо сталь шунта знаходиться в ненасиченому стані, в нижнє ярмо відгалужується лише невелика частка потоку, і коефіцієнт трансформації визначається (в основному) тільки числом витків верхньої секції вторинної обмотки. При насиченні магнітний опір шунта зростає, і велика частина основного магнітного потоку починає замикатися по нижньому ярму. Число витків вторинної обмотки, охоплених магнітним потоком, зростає за рахунок витків, розташованих нижче магнітного шунта, і коефіцієнт трансформації зменшується.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

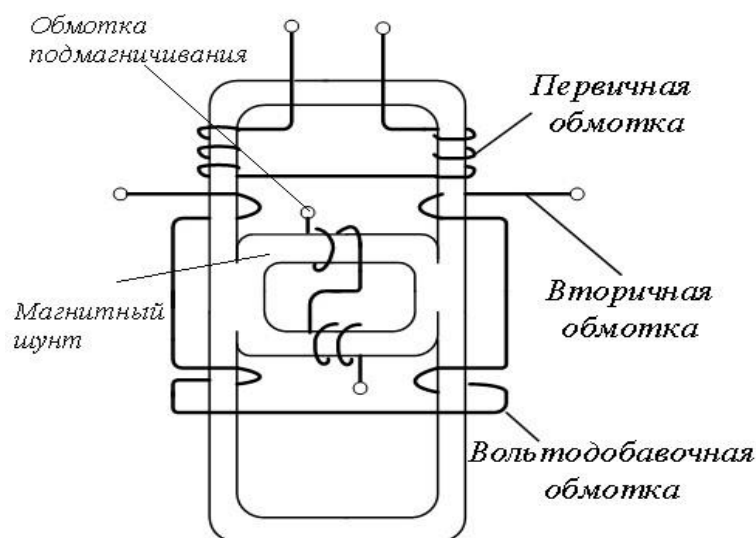


Рисунок 1.11 – Схема розміщення обмоток на осерді трансформатора з магнітним шунтом

Пристрій працює наступним чином. Основний магнітний потік, створений первинною обмоткою, через магнітний шунт розділяється на дві частини. Одна з них замикається по магнітному шунту, розташованому в середній частині магнітопроводу, інша - по нижньому ярму. Якщо сталь шунта знаходиться в ненасиченому стані, в нижнє ярмо відгалужується лише невелика частка потоку, і коефіцієнт трансформації визначається (в основному) тільки числом витків верхньої секції вторинної обмотки. При насиченні магнітний опір шунта зростає, і велика частина основного магнітного потоку починає замикатися по нижньому ярму. Число витків вторинної обмотки, охоплених магнітним потоком, зростає за рахунок витків, розташованих нижче магнітного шунта, і коефіцієнт трансформації зменшується.

Вторинна обмотка з числом витків w_2 з'єднана послідовно з додатковими витками w_3 , розташованими нижче магнітного шунта. Число цих витків вибирається таким, щоб напруга, подана на них при насиченому магнітному шунті, компенсувало б падіння напруги в мережі живлення при максимальних навантаженнях.

При значному збільшенні тягового струму, коли матеріал магнітного шунта переходить в стан насичення, напруга вторинної обмотки наближається до значення:

$$U_{23} = 314w_2\Phi_1 - 314 \frac{I_2w_3}{R_{M2} + R_{M3}}, \quad (1.3)$$

де Φ_1 - змінний магнітний потік, створюваний струмом первинної обмотки;

I_2 - змінний електричний струм вторинної обмотки трансформатора;

R_{M2} - активний магнітний опір шунта;

R_{M3} - активний магнітний опір нижньої частини магнітопроводу трансформатора.

При зменшенні тягового струму матеріал магнітного шунта виходить зі стану насичення, активний магнітний опір шунта R_{M2} збільшується, змінна напруга вторинної обмотки трансформатора наближається до значення $U_{23} = 314w_2\Phi_1 \left(1 + \frac{w_3}{w_2}\right)$, що дорівнює напрузі холостого ходу вторинної обмотки при числі її витків, рівному $w_2 + w_3$.

Таким чином, значення змінної напруги на вторинній обмотці трансформатора визначається ступенем намагнічування матеріалу магнітного шунта.

В роботі [17] показано, що стабілізація напруги зберігається до значення випрямленого струму $I_d = 3000$ А. При цьому $\frac{U_{23}}{U_{23ном}}$ змінюється в діапазоні від: 1,1 до 0,9. При подальшому збільшенні I_d стабілізуючий ефект пропадає. Ефективність запропонованого способу регулювання напруги живильної підстанції визначається наявністю в схемах лінійних підстанцій випрямного агрегату, який живить контактну мережу залізниці.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Слід зазначити, що розглянутий пристрій характеризується ускладненою конструкцією магнітопроводу, труднощами намотування обмоток, наявністю обмотки підмагнічування і необхідністю джерела для її живлення.

Висновки по 1 розділу

1. Стабілізація напруги контактної мережі постійного струму може бути здійснена різними способами, які можуть бути умовно розбиті на три групи:

- способи, в яких стабілізація здійснюється з боку первинної обмотки тягового трифазного трансформатора, що входить до складу трансформаторно-випрямного агрегату тягової підстанції;
- способи стабілізації з боку вторинної обмотки тягового трифазного трансформатора;
- способи, пов'язані зі зміною конструкції тягового трифазного трансформатора.

2. Способи всіх трьох груп, розглянуті в цьому розділі, в тій чи іншій мірі характеризуються як певними перевагами, так і суттєвими недоліками (наприклад, необхідністю використання додаткових регулюючих пристроїв, зниженою надійністю, значним ускладненням конструкції, високою вартістю і т.п.).

3. Назріла необхідність в розробці агрегату, органічно поєднує в собі функції електроживлення контактної мережі і функції стабілізації рівня її напруги.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗМІНИ СТУПЕННЯ НАМАГНІЧУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ПІДСТЕРЖНІВ ЛІНІЇ ПО ПЕРЕРОБЦІ ТРАНСФОРМАТОРА

Силовий трифазний трансформатор є головним елементом системи тягового електропостачання (СТЕ) і базою для засобів регулювання напруги на тягових підстанціях постійного струму.

У даній главі наведено результати розробки способу стабілізації напруги, в основі якого лежить ефект перерозподілу магнітних потоків магнітопровода в залежності від ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора і деякі варіанти його конструктивної реалізації.

Досліджуються електромагнітні процеси, що протікають в конструкції трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями. На основі результатів цих досліджень визначені умови прояву стабілізуючого ефекту і зроблена оцінка ступеня намагнічування матеріалу підстержней.

2.1 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора без короткозамкнутих витків на підстержнях (варіант 1)

Магнітопровід розробленого трифазного трансформатора виконаний з шихтованих сталевих пластин [23] і складається з двох ярем 1 і трьох стрижнів 2 (рис. 2.1, рис. 2.2). Кожен стрижень 2 розщеплений на два паралельних підстержня 3 і 4. Фаза вторинної обмотки трансформатора розділена на дві послідовно з'єднані секції. Перша секція 5 намотана на перший підстержень, друга секція 6 - на другий. Поверх двох секцій намотана фаза первинної обмотки 7 [24-36]. У трифазному трансформаторі фази первинної обмотки з'єднані за схемою «зірка», а фази вторинної - за схемою «Трикутник».

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

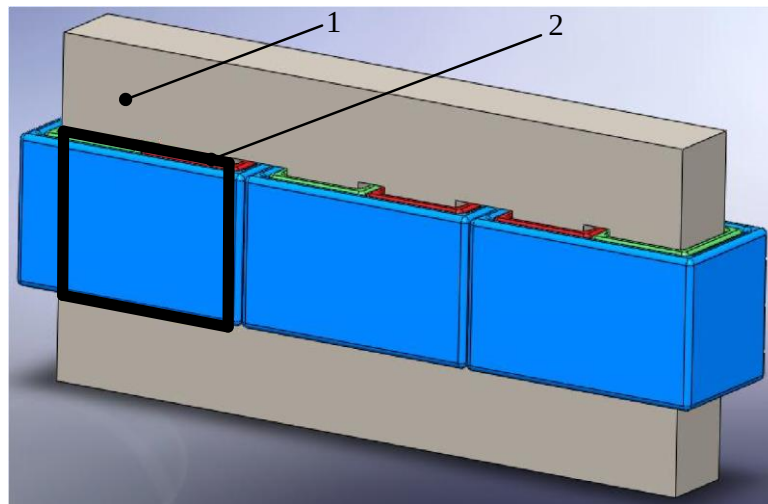


Рисунок 2.1 – Трифазний трансформатор із стабілізуючим ефектом

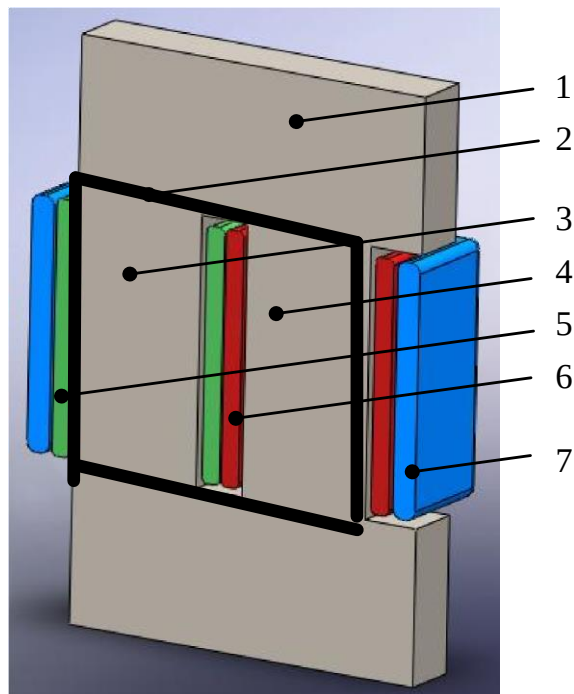


Рисунок 2.2 – Фаза «А» трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями (варіант 1)

Припускаємо, що напруги первинних обмоток трансформатора представлені тільки своїми першими гармонійними складовими. Однак, так як характеристика феромагнітного матеріалу (основна крива намагнічування $B_m(H_m)$) - нелінійна, фазні струми первинної і вторинної обмоток крім основної

гармонійної складової будуть містити гармоніки, кратні $3, 5, 7, \dots, 2n-1$, де n - натуральне число [37].

Лінійні електричні струми первинних обмоток трансформатора, з'єднаних за схемою «зірка», будуть містити в своєму складі непарні гармоніки (1, 5, 7, 11, ...). Значення 5-ої, 7-ої, 11-ої і т.д. гармонік мало, ними можна знехтувати. Гармоніки, кратні трьом (3, 9, 15, ...), збігаються по фазі, і їх сума буде дорівнює 0, тобто лінійні електричні струми первинних обмоток будуть синусоїдальними.

Оскільки характеристика намагнічування матеріалу трансформатора є нелінійною, то при синусоїдальних лінійних струмах магнітні потоки, створені струмами первинних обмоток фаз, будуть несинусоїдальними (до їх складу входять непарні гармоніки, проте 5-а, 7-а, 11-а і т.д. гармоніки малі, ними можна знехтувати). Гармоніки магнітних потоків, кратні трьом, будуть наводити в секції вторинних обмоток трансформатора ЕРС (електрорушійні сили), що змінюються в часі з потроєною частотою 3. Під дією цих ЕРС в «трикутнику» вторинних обмоток буде протікати електричний струм тієї ж частоти, що створює магнітні потоки, що знаходяться в протифазі з потоками первинних обмоток. Результуючі магнітні потоки підстержней міститимуть лише першу гармонійну складову і коефіцієнт форми магнітних потоків $k_f = 1,11$ [38]. Напруги секцій вторинних обмоток також будуть синусоїдальними.

Залишковим намагнічуванням матеріалу підстержней B_r нехтуємо.

Для дослідження магнітних кіл використовуємо комплексний метод. Для цього несинусоїдальні магніторушійні сили первинної і вторинної обмоток замінюються еквівалентними синусоїдами, а ділянки намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода в еквівалентній схемі представляються їх повними комплексними магнітними опорами [39], через нерівномірний розподіл магнітних потоків при переході їх з підстержней в ярма (рис. 2.3) згідно [40] можна знехтувати.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

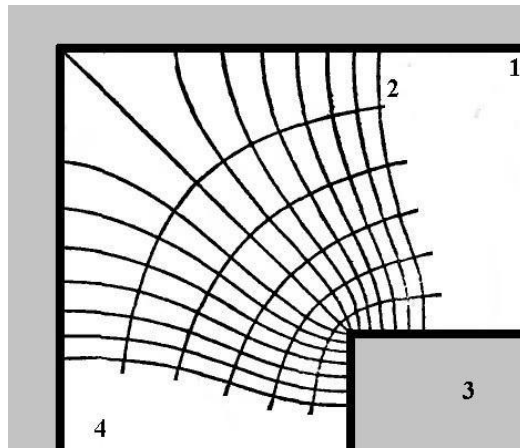


Рисунок 2.3 – Розподіл магнітної індукції в площині шихтованого листа (1- частина ярма, 2-лінії магнітної індукції, 3-повітряне середовище, 4-частина підстержня)

Трансформатору на рис. 2.1 відповідає схема магнітного ланцюга, показана на рис. 2.4.

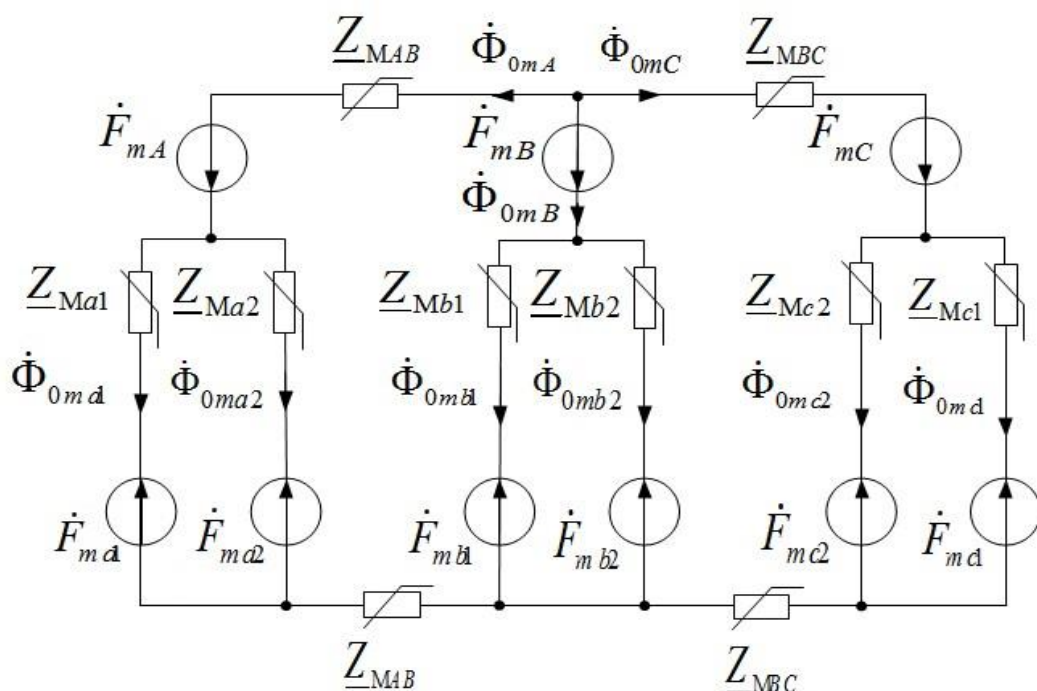


Рисунок 2.4 - Схема заміщення магнітного кола трифазного трансформатора з стабілізуючими властивостями

На рисунку використані наступні позначення:

де $\dot{\Phi}_{0mA}, \dot{\Phi}_{0mB}, \dot{\Phi}_{0mC}$ - комплексні амплітудні значення основних результируючих магнітних потоків, що протікають в розщеплених стрижнях фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{\Phi}_{0ma1}, \dot{\Phi}_{0mb1}, \dot{\Phi}_{0mc1}$ - комплексні амплітудні значення основних результируючих магнітних потоків, що протікають в перших підстержнях розщеплених стрижнів фаз «А», «В» і «С» відповідно.

$\dot{\Phi}_{0ma2}, \dot{\Phi}_{0mb2}, \dot{\Phi}_{0mc2}$ - комплексні амплітудні значення основних результируючих магнітних потоків, що протікають в других підстержнях розщеплених стрижнів фаз «А», «В» і «С» відповідно;

$\underline{Z}_{MAB}$ - повний комплексний магнітний опір ярма між розщепленими стрижнями фаз «А» і «В»;

$\underline{Z}_{MBC}$ - повний комплексний магнітний опір ярма між розщепленими стрижнями фаз «В» і «С»;

$\underline{Z}_{Ma1}, \underline{Z}_{Mb1}, \underline{Z}_{Mc1}$ - повні комплексні магнітні опори перших підстержней фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\underline{Z}_{Ma2}, \underline{Z}_{Mb2}, \underline{Z}_{Mc2}$ - повні комплексні магнітні опори других підстержней фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{F}_{mA}, \dot{F}_{mB}, \dot{F}_{mC}$ - комплексні амплітудні значення магніторушійних сил первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{F}_{ma1}, \dot{F}_{mb1}, \dot{F}_{mc1}$ - комплексні амплітудні значення магніторушійних сил перших секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{F}_{ma2}, \dot{F}_{mb2}, \dot{F}_{mc2}$ - комплексні амплітудні значення магніторушійних сил других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно.

Повні комплексні магнітні опору визначаються через комплексну магнітну проникність ферромагнітного матеріалу [41]:

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\underline{Z}_M = \frac{\dot{H}_m}{\dot{B}_m} \frac{l}{S} = \frac{l}{\dot{\mu} S}, \quad (2.1)$$

де $\dot{H}_m$ - комплексне амплітудне значення напруженості магнітного поля матеріалу феромагнетика;

$\dot{B}_m$ - комплексне амплітудне значення індукції магнітного поля матеріалу феромагнетика;

l - довжина ділянки магнітопровода трансформатора;

S - площа поперечного перерізу ділянки магнітопровода трансформатора;

$\dot{\mu}$ - комплексна магнітна проникність феромагнетика.

Введення комплексної магнітної проникності обумовлено необхідністю враховувати втрати на гістерезис і вихрові струми [42]. Напруженість магнітного поля в певній точці кривої намагнічування матеріалу визначається з [43]:

$$H = H_m e^{-\lambda \sqrt{\frac{\omega}{2}} z} \cos \omega \left(t - \frac{z}{\frac{1}{\lambda} \sqrt{2\omega}} \right), \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{1}{c} \sqrt{4\pi\sigma\mu}, \quad (2.3)$$

де ω - циклічна частота;

σ - питома провідність металу;

$\frac{1}{\lambda} \sqrt{2\omega}$ - фазова швидкість поширення амплітуди напруженості;

μ - амплітудна магнітна проникність речовини;

z - глибина проникнення магнітного поля в тіла феромагнітного матеріалу.

Комплексна магнітна проникність складається з двох компонент [44]:

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\dot{\mu} = \mu_1 - j\mu_2, \quad (2.4)$$

де μ_1 - консервативна магнітна проникність;

μ_2 - консумптивна магнітна проникність.

Консумптивна магнітна проникність визначається через втрати на гістерезис:

$$\mu_2 = \frac{P'_0}{\omega \mu_0 H_{1m}^2}, \quad (2.5)$$

де P'_0 - втрати на гістерезис; μ_0 - магнітна постійна; H_{1m} - амплітудне значення першої гармоніки напруженості магнітного поля.

Для магнітного ланцюга на рис. 2.4 складемо систему нелінійних диференціальних рівнянь за законами Кірхгофа, яка буде вирішена чисельним способом [45]. В системі рівнянь використовуються амплітудні значення змінних індукції магнітного поля і напруженості. Змінні магнітні потоки розсіювання, що залежать від ступеня намагнічування матеріалу підстержней, не враховуються. Остаточно отримуємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{0mA} = \dot{\Phi}_{0ma1} + \dot{\Phi}_{0ma2} \\ \dot{\Phi}_{0mB} = \dot{\Phi}_{0mb1} + \dot{\Phi}_{0mb2} \\ \dot{\Phi}_{0mC} = \dot{\Phi}_{0mc1} + \dot{\Phi}_{0mc2} \\ \dot{\Phi}_{0mA} + \dot{\Phi}_{0mB} + \dot{\Phi}_{0mC} = 0 \\ \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0ma1} \underline{Z}_{Ma1} = \dot{F}_{ma1} - \dot{F}_{ma2} \\ \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} - \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} = \dot{F}_{mb1} - \dot{F}_{mb2} \\ \dot{\Phi}_{0mc1} \underline{Z}_{Mc1} - \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} = \dot{F}_{mc2} - \dot{F}_{mc1} \\ \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} - \dot{\Phi}_{0mA} \underline{Z}_{MAB} - \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0mA} \underline{Z}_{MAB} = \dot{F}_{mB} - \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{ma2} - \dot{F}_{mA} \\ \dot{\Phi}_{0mC} \underline{Z}_{MBC} + \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} + \dot{\Phi}_{0mC} \underline{Z}_{MBC} - \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} = \dot{F}_{mC} - \dot{F}_{mc2} + \dot{F}_{mb2} - \dot{F}_{mB} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Напруги на секціях вторинних обмоток трансформатора визначаються з рівнянь, складених за II закону Кірхгофа для комплексних амплітуд. Нехтуючи магнітним розсіюванням, як і в системі (2.6), остаточно одержуємо:

$$\begin{cases} j\omega w_{21}\dot{\Phi}_{0ma1} = R_{a1}\dot{I}_{ma} + \dot{U}_{ma1} \\ j\omega w_{22}\dot{\Phi}_{0ma2} = R_{a2}\dot{I}_{ma} + \dot{U}_{ma2} \\ j\omega w_{21}\dot{\Phi}_{0mb1} = R_{b1}\dot{I}_{mb} + \dot{U}_{mb1} \\ j\omega w_{22}\dot{\Phi}_{0mb2} = R_{b2}\dot{I}_{mb} + \dot{U}_{mb2} \\ j\omega w_{21}\dot{\Phi}_{0mc1} = R_{c1}\dot{I}_{mc} + \dot{U}_{mc1} \\ j\omega w_{22}\dot{\Phi}_{0mc2} = R_{c2}\dot{I}_{mc} + \dot{U}_{mc2} \end{cases} \quad (2.7)$$

де $\dot{U}_{ma1}, \dot{U}_{ma2}, \dot{U}_{mb1}, \dot{U}_{mb2}, \dot{U}_{mc1}, \dot{U}_{mc2}$ - комплексні амплітудні значення напруг, що формуються на перших і других секціях вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{I}_{ma}, \dot{I}_{mb}, \dot{I}_{mc}$ - комплексні амплітудні значення струмів, що протікають по вторинних обмотках фаз «А», «В», «С» відповідно;

$R_{a1}, R_{a2}, R_{b1}, R_{b2}, R_{c1}, R_{c2}$ - активні опори перших і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

w_{21}, w_{22} - число витків першої та другої секцій вторинних обмоток фаз трансформатора відповідно.

Результуюча МДС (магніторушійна сила) другої секції вторинної обмотки більше, ніж МДС першої секції, тому при збільшенні струму вторинної обмотки відносна магнітна проникність матеріалу другого підстержня (позиція 4 на рис. 2.2) зменшується з більшою швидкістю, ніж магнітна проникність матеріалу першого підстержня (позиція 3). Згідно (2.1) повний комплексний магнітний опір другого підстержня $\underline{Z}_{M2}$ збільшується швидше, ніж першого з $\underline{Z}_{M1}$, і частина магнітного потоку, створеного первинною обмоткою, перетікає в перший

підстержень. Сказане веде до збільшення магнітного потоку першого підстержня і ЕРС, індукованого в першій секції вторинної обмотки.

Результуючі комплексні амплітудні значення напружень на вторинних обмотках трансформатора визначаються з рівнянь:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ma} &= \dot{U}_{ma1} + \dot{U}_{ma2}, \\ \dot{U}_{mb} &= \dot{U}_{mb1} + \dot{U}_{mb2}, \\ \dot{U}_{mc} &= \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2}.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Таким чином, ступінь насичення матеріалу підстержей впливає на перерозподіл магнітних потоків по підстержням, а значить і на результуючу напругу вторинної обмотки.

Як феромагнітний матеріал магнітопроводу передбачається використовувати сталь марки 1513 [46]. Її основна крива намагнічування приведена на рис. 2.5. Розрахунок змінних магнітних потоків при нелінійній залежності індукції магнітного поля від його напруженості проводився чисельним способом в пакеті програми Elcut 6.0 (розрахунок магнітних потоків методом кінцевих елементів) [47], [48].

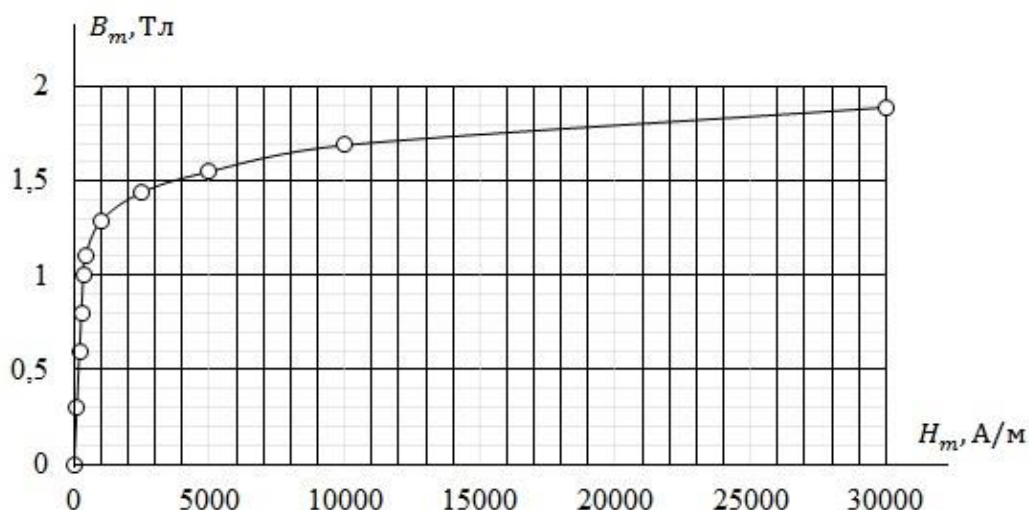


Рисунок 2.5 – Основна крива намагнічування електротехнічної сталі марки 1513

З виразу (2.1) знайдемо $\dot{\mu} = \frac{\dot{B}_m}{\dot{H}_m}$. Комплексне амплітудне значення змінного

магнітного потоку визначається виразом $\dot{\Phi}_m = \dot{B}_m S$, де S - площа поперечного перерізу підстержня.

Якщо прийняти, що $\dot{H}_m l = \dot{I}_m w$, де l - довжина підстержня розщепленого стрижня, w - число витків обмотки, намотаною на підстержень, тоді $\frac{\dot{B}_m}{\dot{H}_m} = \frac{\dot{\Phi}_m l}{S \dot{I}_m w} = \frac{\dot{\Phi}_m}{\dot{I}_m} k$, де $k = \frac{l}{Sw}$ - коефіцієнт пропорційності.

Для випадку нескінченно малих змін магнітної індукції, магнітного потоку, напруженості магнітного поля і електричного струму отримуємо рівність:

$$\lim_{\Delta H_m \rightarrow 0} \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m} = k \lim_{\Delta I_m \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta I_m}, \quad (2.9)$$

або

$$k \frac{d\Phi_m}{dI_m} = \frac{dB_m}{dH_m} = \mu_d, \quad k \frac{d\Phi_m}{dI_m} = \frac{dB_m}{dH_m} = \mu_d, \quad (2.10)$$

де μ_d - диференціальна магнітна проникність.

Надалі поняття диференціальної магнітної проникності буде використано для визначення умов прояву стабілізуючого ефекту трифазного трансформатора [49].

Можливі три варіанти конструктивного виконання трансформатора з розщепленими стрижнями (для конкретизації чисельних оцінок в якості базисних будуть прийматися параметри і характеристики типового тягового трансформатора, наведені в Додатку 1):

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

1. Число витків першої секції вторинної обмотки дорівнює числу витків її другої секції ($w_{21} = w_{22}$), площі поперечних перерізів підстержней нерівні ($S_1 \neq S_2$).

2. Число витків першої секції вторинної обмотки не дорівнює числу витків її другої секції ($w_{21} \neq w_{22}$), площі поперечних перерізів підстержней рівні ($S_1 = S_2$).

3. Число витків першої секції вторинної обмотки не дорівнює числу витків її другої секції ($w_{21} \neq w_{22}$), Площі поперечних перерізів підстержней нерівні ($S_1 \neq S_2$).

При $w_{21} = w_{22}$ та $S_1 \neq S_2$ ($\frac{S_1}{S_2} > 1$) магніторушійні сили перших і других секцій вторинних обмоток трансформатора рівні, тобто $\dot{F}_{ma1} - \dot{F}_{ma2} = 0$, $\dot{F}_{b21} - \dot{F}_{b22} = 0$, $\dot{F}_{mc2} - \dot{F}_{mc1} = 0$.

$$\text{В системі (2.2) } \underline{Z}_{Ma1} = \frac{l_{sa1} + 2l_{ya1a2}}{S_{a1}\mu_{a1}}, \quad \underline{Z}_{Mb1} = \frac{l_{sb1}}{S_{b1}\mu_{b1}}, \quad \underline{Z}_{Mc1} = \frac{l_{sc1} + 2l_{yc1c2}}{S_{c1}\mu_{c1}},$$

де l_{sa1} , l_{sb1} , l_{sc1} - довжини середніх ліній перших підстержней фаз «А», «В» і «С» відповідно, l_{ya1a2} , l_{yc1c2} - довжини середніх ліній ділянок ярем між першими і другими підстержнями фаз «А» і «С» відповідно. тоді при $l_{sa1} = l_{sb1} = l_{sc1}$ і $l_{ya1a2} = l_{yc1c2}$ $Z_{Ma1} = Z_{Mc1} > Z_{Mb1}$.

Магнітний ланцюг трифазного трансформатора несиметричний і $\Phi_{0ma1} = \Phi_{0mc1} \neq \Phi_{0mb1}$ - магнітні потоки розподіляються по підстержням не в рівних частках.

Було виконано чисельний розрахунок магнітного поля трифазного трансформатора. Результати розрахунків для фази «А» наведено в табл. 2.1.

Згідно з даними табл. 2.1, в цьому випадку (при збільшеної площі поперечного перерізу одного з підстержней) намагнічування матеріалу підстержней - незначне - ступінь намагнічування матеріалу підстержней

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практично не змінюється при збільшенні струму вторинної обмотки, а значить стабілізуючий ефект не проявляється.

Таблиця 2.1 – Магнітні проникності матеріалу підстержней фази «А»

$S_2 = 1,5S_1$			$S_2 = 2S_1$		
I_{ma}, A	μ_{ra1}	μ_{ra2}	I_{ma}, A	μ_{ra1}	μ_{ra2}
0	2385,5	2373	0	2378,2	2374,8
250,09	2385,4	2373	250,1	2377,6	2375,2
535,35	2385,4	2373	535,36	2377,4	2375
1861,4	2385,4	2373,3	1864,4	2377,8	2375,9

2. При $w_{21} \neq w_{22}$ і $S_1 = S_2 \left(\frac{w_{21}}{w_{22}} \geq 1 \right)$ в системі рівнянь (2.2) $\dot{F}_{ma1} - \dot{F}_{ma2} \neq 0$, $\dot{F}_{mb1} - \dot{F}_{mb2} \neq 0$, $\dot{F}_{mc1} - \dot{F}_{mc2} \neq 0$, змінні магнітні потоки підстержней, створені результируючими МДС секцій обмоток, не рівні один одному.

Використовуючи $\lim_{\Delta I_m \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi_{0m}}{\Delta I_m} = \frac{d\Phi_{0m}}{dI_m}$ і розрахувавши $\Phi_{0ma}(I_{ma})$, можна визначити амплітудні значення струмів вторинних обмоток, при яких:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}} \\ \frac{d\Phi_{0mb1}}{dI_{mb}} = \frac{d\Phi_{0mb2}}{dI_{mb}} \\ \frac{d\Phi_{0mc1}}{dI_{mc}} = \frac{d\Phi_{0mc2}}{dI_{mc}} \end{cases} \quad (2.11)$$

Скористаємося зв'язком між повним комплексним магнітним опором підстержня і повним електричним опором секції обмотки, намотаної на нього. Останні для першої і другої секцій вторинної обмотки фази «А» рівні:

$$\underline{Z}_{a1} = \frac{j\omega w_{21}^2 \dot{\Phi}_{0ma1}}{w_{21} \dot{I}_{ma}}; \underline{Z}_{a2} = \frac{j\omega w_{22}^2 \dot{\Phi}_{0ma2}}{w_{22} \dot{I}_{ma}}. \quad (2.12)$$

Напруги секцій вторинної обмотки трансформатора фази «А» представимо у вигляді (активними електричними опорами секцій нехтуємо):

$$\dot{U}_{ma1} = j\omega w_{21} \dot{\Phi}_{0ma1}; \dot{U}_{ma2} = j\omega w_{22} \dot{\Phi}_{0ma2}. \quad (2.13)$$

Продифференціював вираз (2.13) по току отримаємо для першої секції:

$$\frac{d\dot{U}_{ma1}}{d\dot{I}_{ma}} = j\omega w_{21} \frac{d\dot{\Phi}_{0ma1}}{d\dot{I}_{ma}}, \quad (2.14)$$

і для другої секції:

$$\frac{d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}} = j\omega w_{22} \frac{d\dot{\Phi}_{0ma2}}{d\dot{I}_{ma}}. \quad (2.15)$$

Вважаємо, що функції комплексної змінної $\dot{\Phi}_{0ma1}(\dot{I}_{ma})$ і $\dot{\Phi}_{0ma2}(\dot{I}_{ma})$ голоморфні в даній області зміни струму вторинної обмотки, тоді згідно [50-52] вони мають похідні у всіх точках розглянутої області та для них виконуються умови Даламбера-Ейлера.

Так як властивості функції дійсної змінної поширюються і на випадок функції комплексної змінної, то з урахуванням (2.14) і (2.15) вираз для похідної результуючої напруги вторинної обмотки набуває вигляду:

$$\frac{d(\dot{U}_{ma1} + \dot{U}_{ma2})}{d\dot{I}_{ma}} = j\omega \frac{w_{21}d\dot{\Phi}_{0ma1}}{d\dot{I}_{ma}} + j\omega \frac{w_{22}d\dot{\Phi}_{0ma2}}{d\dot{I}_{ma}}. \quad (2.16)$$

Доведемо, що в точці перетину графіків залежностей $\left| \frac{d\dot{\Phi}_{0ma1}}{d\dot{I}_{ma}} \right| = f_1(\dot{I}_{ma})$ і

$\left| \frac{d\dot{\Phi}_{0ma2}}{d\dot{I}_{ma}} \right| = f_2(\dot{I}_{ma})$, при $|\dot{\Phi}_{0ma1}| \neq |\dot{\Phi}_{0ma2}|$, результуюча напруга вторинної обмотки

досягає максимального значення.

Екстремуми функції $U_{ma}(I_{ma})$ визначаються з рівняння:

$$\frac{dU_{ma}}{dI_{ma}} = 0. \quad (2.17)$$

Повний комплексний електричний опір вторинної обмотки виразимо через повні комплексні магнітні опори підстержней, на які намотані секції:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_{a1} + \underline{Z}_{a2} = \frac{j\omega w_{21}^2}{\underline{Z}_{Ma1}} + \frac{j\omega w_{22}^2}{\underline{Z}_{Ma2}}. \quad (2.18)$$

Повні комплексні магнітні опору підстержней представимо у вигляді суми активного і реактивного магнітного опорів:

$$\underline{Z}_{Ma1} = R_{Ma1} + jX_{Ma1}, \quad (2.19)$$

$$\underline{Z}_{Ma2} = R_{Ma2} + jX_{Ma2}, \quad (2.20)$$

де R_{Ma1}, X_{Ma1} і R_{Ma2}, X_{Ma2} - активні і реактивні магнітні опори першого і другого підстержней фази «А» відповідно.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставимо (2.19) і (2.20) в (2.18), і після перетворення отримаємо вираз для повного комплексного електричного опору вторинної обмотки:

$$\underline{Z}_a = \left(\frac{\omega w_{21}^2 X_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2} + \frac{\omega w_{22}^2 X_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2} \right) + j \left(\frac{\omega w_{21}^2 R_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2} + \frac{\omega w_{22}^2 R_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2} \right). \quad (2.21)$$

Тоді вираз для модуля напруги вторинної обмотки набуває остаточного вигляду:

$$U_{ma} = I_{ma} \sqrt{\left(\frac{\omega w_{21}^2 X_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2} + \frac{\omega w_{22}^2 X_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega w_{21}^2 R_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2} + \frac{\omega w_{22}^2 R_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2} \right)^2}. \quad (2.22)$$

Варто врахувати, що повний електричний опір вторинної обмотки більше залежить від реактивного магнітного опору підстержней, так як $X_{Ma1} > R_{Ma1}$ і $X_{Ma2} > R_{Ma2}$.

Реактивний магнітний опір може бути виражений через величину магнітних втрат відомою формулою:

$$X_{Ma} = \frac{2P_\phi}{\omega^2 \Phi_{0ma}}, \quad (2.23)$$

де P_ϕ - втрати в феромагнітному матеріалі підстержня.

Втрати в підстержні представляють собою суму втрат на гістерезис і вихрові струми:

$$P_\phi = \eta f B_m^2 V + \xi f^2 B_m^2 V, \quad (2.24)$$

де η - коефіцієнт, що залежить від властивостей електротехнічної сталі;

ξ - коефіцієнт, що залежить від параметрів елементарних ділянок, на які розбита шихтована сталева пластина;

f - частота напруги первинної обмотки;

V - об'єм тіла підстержня;

B_m - амплітудне значення магнітної індукції.

На рис. 2.6 представлені залежності $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma})$ і $\frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma})$ при

$\frac{w_{21}}{w_{22}} = 1,36$. Видно що $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$ в двох точках.

Перша точка спостерігається при $0 < I_{ma} < 100$ А, друга - при $100 < I_{ma} < 500$ А. При $I_{ma} > 500$ А матеріали обох підстержней насичені.

Необхідно вибрати значення струму вторинної обмотки I_{ma} , при якому U_{ma} досягає максимального значення.

В (2.12) $Z_a = \sqrt{(R_{a1} + R_{a2})^2 + (X_{a1} + X_{a2})^2}$, де $R_{a1} = \frac{\omega w_{21}^2 X_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2}$ і

$R_{a2} = \frac{\omega w_{22}^2 X_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2}$, $X_{a1} = \frac{\omega w_{21}^2 R_{Ma1}}{R_{Ma1}^2 + X_{Ma1}^2}$ і $X_{a2} = \frac{\omega w_{22}^2 R_{Ma2}}{R_{Ma2}^2 + X_{Ma2}^2}$.

При збільшенні струму вторинної обмотки напруженість магнітного поля в обох підстержнях збільшується, при цьому зменшується відносна магнітна проникність матеріалу підстержней, що призводить до збільшення їх повних магнітних опорів. Зменшуються реактивні електричні опори секцій вторинної обмотки X_{a1}, X_{a2} . Якщо вважати, що $R_a \rightarrow 0$, то $Z_a = (X_{a1} + X_{a2})$. Повний електричний опір вторинної обмотки також зменшується. Так як $|\dot{F}_A - \dot{F}_{a1}| < |\dot{F}_A - \dot{F}_{a2}|$, матеріал першого підстержня менш насичений, тоді $X_{a2} \rightarrow X_{\min}$ (Індуктивний електричний опір другої секції вторинної обмотки при насиченні матеріалу другого підстержня ($\mu_{a1} \gg \mu_{a2}$)).

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

У діапазоні від 0 до 100 А $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$ при $I_{ma} = 60$ А, однак матеріал обох підстержней не насичений (рис. 2.6 і рис. 2.7), тобто $\mu_{ra1} \cong \mu_{ra2}$.

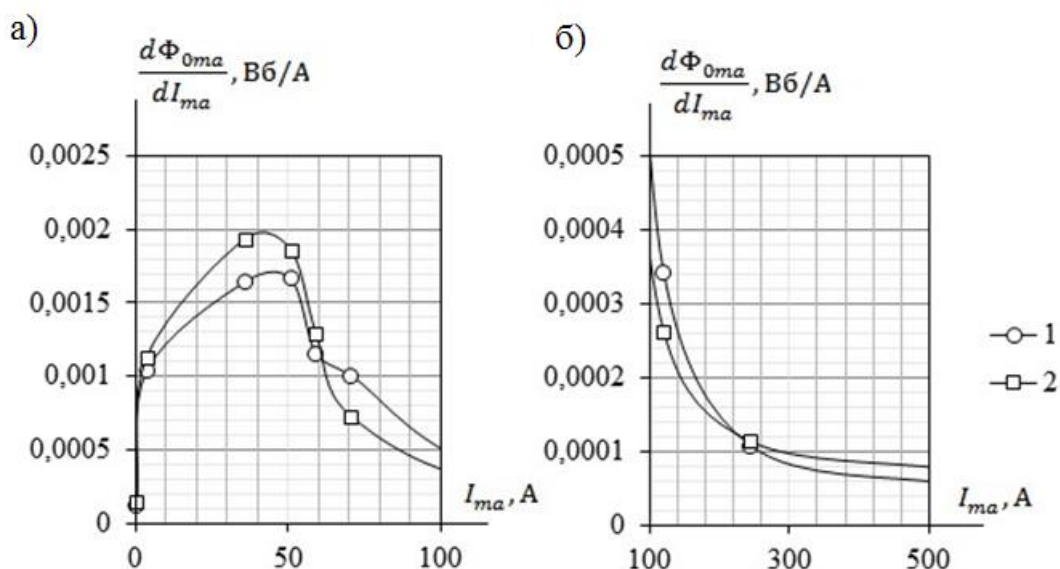


Рисунок 2.6 – Залежності зміни основних результуючих магнітних

потоків підстержней (крива 1 – $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}}$, крива 2 – $\frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$)

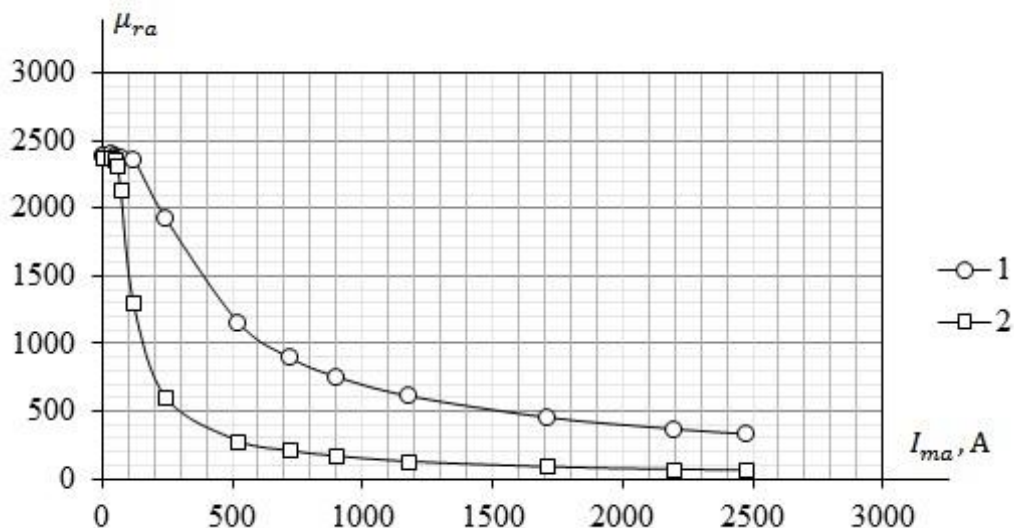


Рисунок 2.7 – Струмові залежності відносних магнітних проникностей

матеріалу підстержней (крива 1- $\mu_{ra1}(I_{ma})$, крива 2- $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

У діапазоні від 100 до 500 А $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$ при $I_{ma} = 250$ А.

У зазначеному діапазоні матеріал другого підстержня прагне до стану магнітного насичення швидше, ніж матеріал першого підстержня і $\mu_{ra1} \cong 2000 < \mu_{ra2}$ (див.рис. 2.7).

На рисунку 2.8,а напруга вторинної обмотки досягає максимального значення при $I_{ma} = 250$ А. На рис. 2.8,б напруга вторинної обмотки зменшується зі збільшенням струму вторинної обмотки.

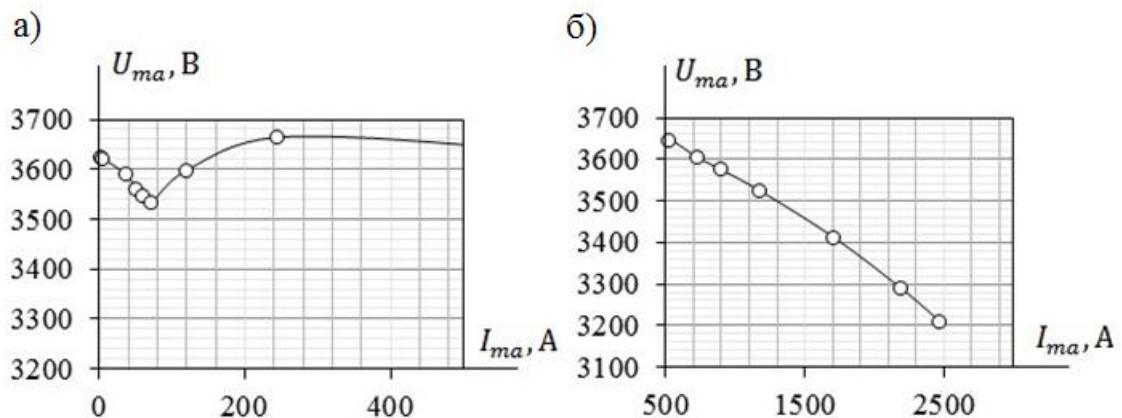


Рисунок 2.8 – Зовнішня характеристика трансформатора

При намагнічуванні матеріалу підстержней змінюються індуктивності секцій вторинних обмоток, внаслідок цього змінюються фази магнітних потоків (рис. 2.9), а значить, і фази напруг секцій.

Таким чином, вибираємо другу точку, в якій $I_{ma} = 250$ А, $U_{ma} = 2598$ В. При $240 < I_{ma} < 450$ А відхилення напруги вторинної обмотки від свого номінального значення не перевищує 0,5% (проявляється стабілізуючий ефект).

При $w_1 = 392$ витків і $\frac{w_{21}}{w_{22}} = 1,36$, $\Phi_{0ma1} = 0,26$ Вб, $\Phi_{0ma1} = 0,315$ Вб (дані

для стандартного силового трансформатора: $w_1 = 350$ витків, $w_2 = 46$ витків, $\Phi_{0ma} = 0,28$ Вб).

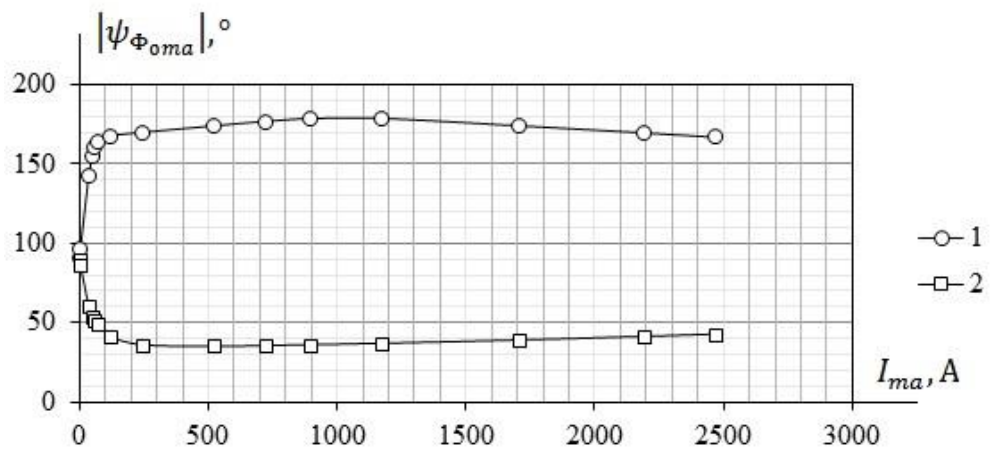


Рисунок 2.9 – Залежність початкової фази результуючих магнітних потоків підстержней від струму (крива 1- $|\psi_{\Phi_{0ma1}}|(I_{ma})$, крива 2- $|\psi_{\Phi_{0ma2}}|(I_{ma})$)

На підставі вищевикладеного впливає висновок, що ефект стабілізації напруги вторинної обмотки трансформатора виявляється в околиці точки кривої $U_{ma}(I_{ma})$, в якій:

- $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}$ при $\Phi_{0ma1} \neq \Phi_{0ma2}$;
- $\mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}$.

При $w_{21} \neq w_{22}$ і $S_1 \neq S_2$ ($\frac{w_{21}}{w_{22}} > 1$ і $\frac{S_1}{S_2} > 1$), так само як і в попередньому

випадку, частина магнітного потоку перетікає в перший підстержень при збільшенні струму вторинної обмотки. Результати розрахунку магнітного поля підстержней наведені на рис. 2.10 і рис. 2.11.

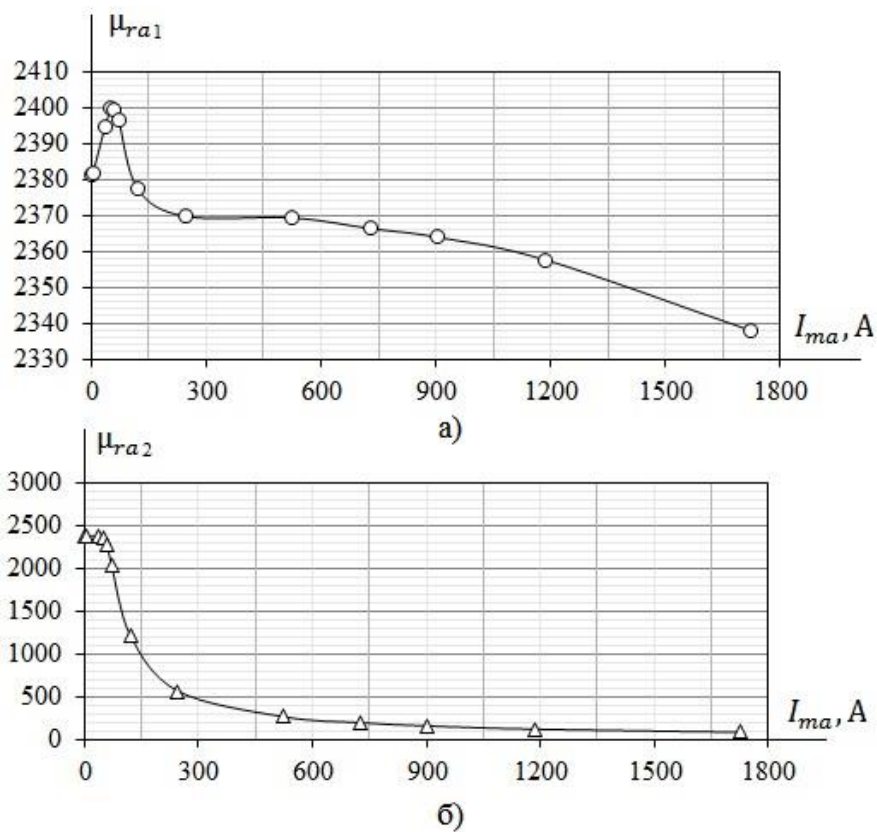


Рисунок 2.10 – Струмові залежності зміни відносних магнітних проникностей матеріалу підстержней

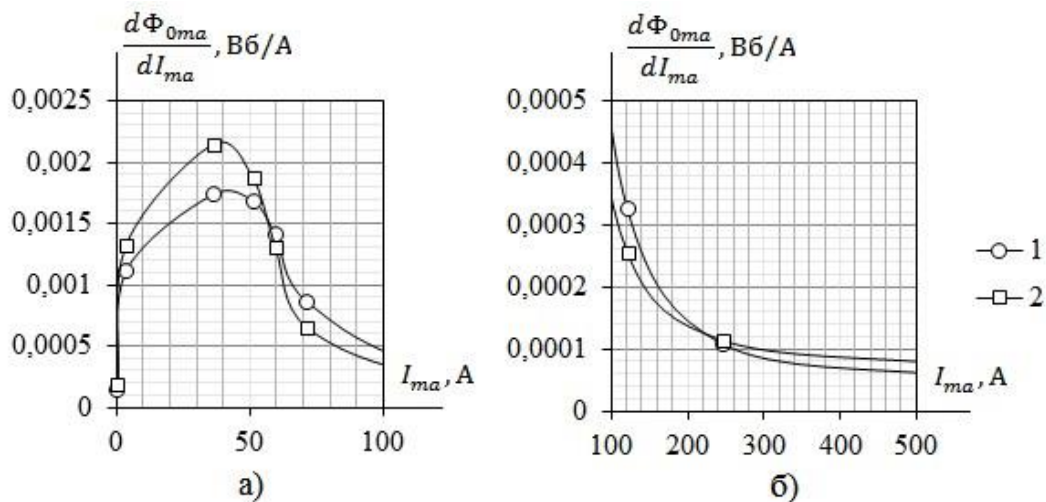


Рисунок 2.11 – Струмові залежності зміни основних результуючих магнітних потоків підстержней (крива 1- $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma})$, крива 2- $\frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma})$)

При збільшенні площі поперечного перерізу першого підстержня S_{a1} його повний комплексний магнітний опір відповідно до виразу $\underline{Z}_{Ma1} = \frac{l_{sa1} + 2l_{ya1a2}}{S_{a1}\dot{\mu}_{a1}}$

зменшується, зменшуються напруженість магнітного поля $\dot{H}_{ma1} = \frac{\underline{Z}_{Ma1}\dot{\Phi}_{ma1}}{l_{sa1} + 2l_{ya1a2}}$ при незмінному змінному магнітного потоці і комплексна магнітна проникність матеріалу цього підстержня $\mu_{ra1} = \frac{\dot{H}_{ma1}}{\dot{B}_{ma1}}$.

З рис. 2.10 видно, що відносна магнітна проникність матеріалу першого підстержня досягає максимального значення 2400 при $I_{ma} \cong 70$ А.

При подальшому збільшенні струму вторинної обмотки μ_{ra1} зменшується, і при $I_{ma} = 1650$ А вона досягає 2340, що в 7 разів більше μ_{ra1} для випадку з рівними поперечними перетинами підстержней. Відносна магнітна проникність матеріалу другого підстержня μ_{ra2} при збільшенні струму вторинної обмотки від 0 до максимально допустимого значення знижується до 83, що в 1,3 рази більше μ_{ra2} , ніж у випадку з $w_{21} \neq w_{22}$ і $S_1 = S_2$.

Як і на рис. 2.6 графіки функцій $\frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma})$ та $\frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma})$ на рис. 2.11 перетинаються в двох точках, форма кривої $U_{ma}(I_{ma})$ не змінилася (рис. 2.12 а і б), U_{ma} досягає максимального значення при $I_{ma} = 250$ А (рис.2.12 а), як у випадку з $w_{21} \neq w_{22}$ і $S_1 = S_2$.

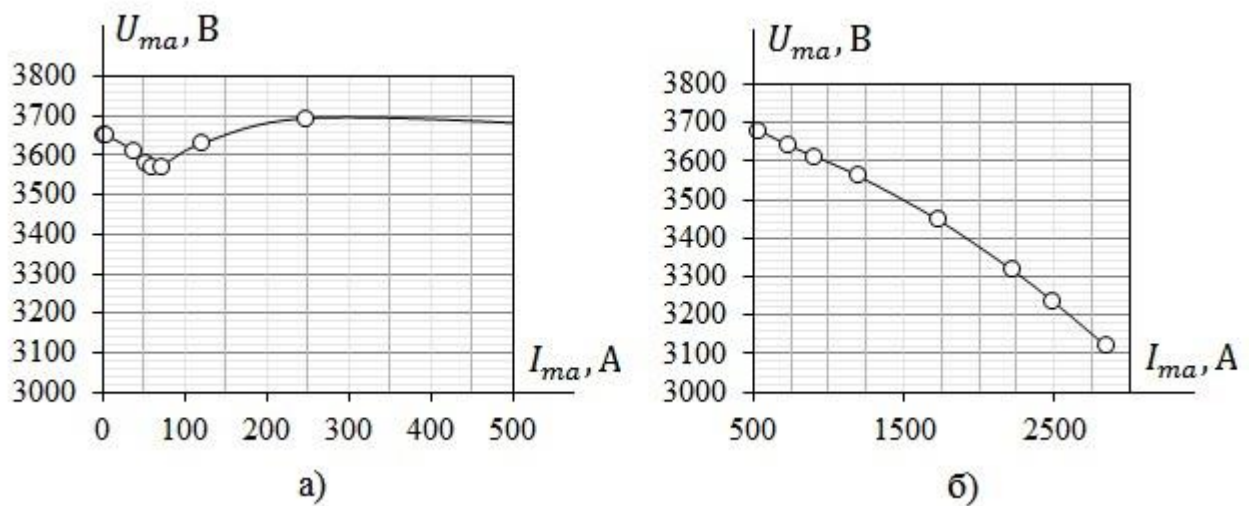


Рисунок 2.12 – Зовнішня характеристика трансформатора при $S_1 = 1.5S_2$

Можна говорити, що збільшення площі поперечного перерізу першого підстержня розширює робочий струмовий діапазон, однак це одночасно веде до збільшення габаритних розмірів трансформатора, а значить до його підорожчання і зниження ККД.

2.2 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора з короткозамкненими витками (варіант 2)

Щоб усунути недоліки попередньої конструкції трансформатора, пропонується використовувати додаткову короткозамкненим обмотку [52], намотану на перший підстержень і розмагнічувати його матеріал.

На рис. 2.13 показана фаза «А» трифазного трансформатора з короткозамкненою обмоткою [53].

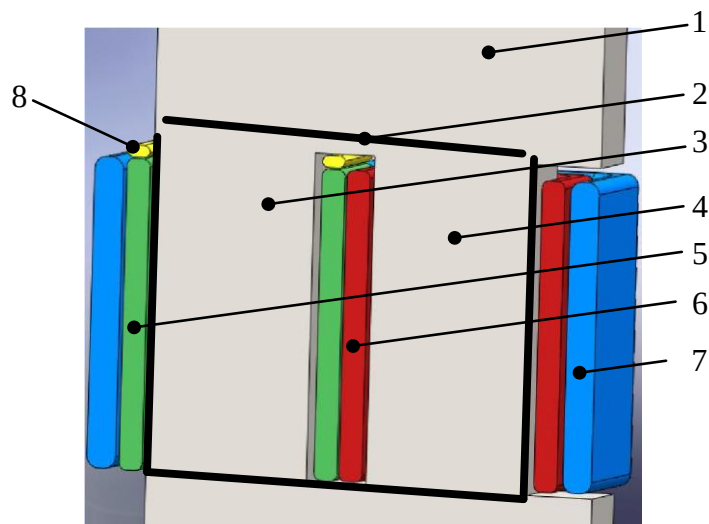


Рисунок 2.13 – Конструкція фази «А» трансформатора з короткозамкненою обмоткою (варіант 2)

Аналогічно п. 2.1 складемо схему заміщення магнітного кола трифазного трансформатора (рис. 2.14).

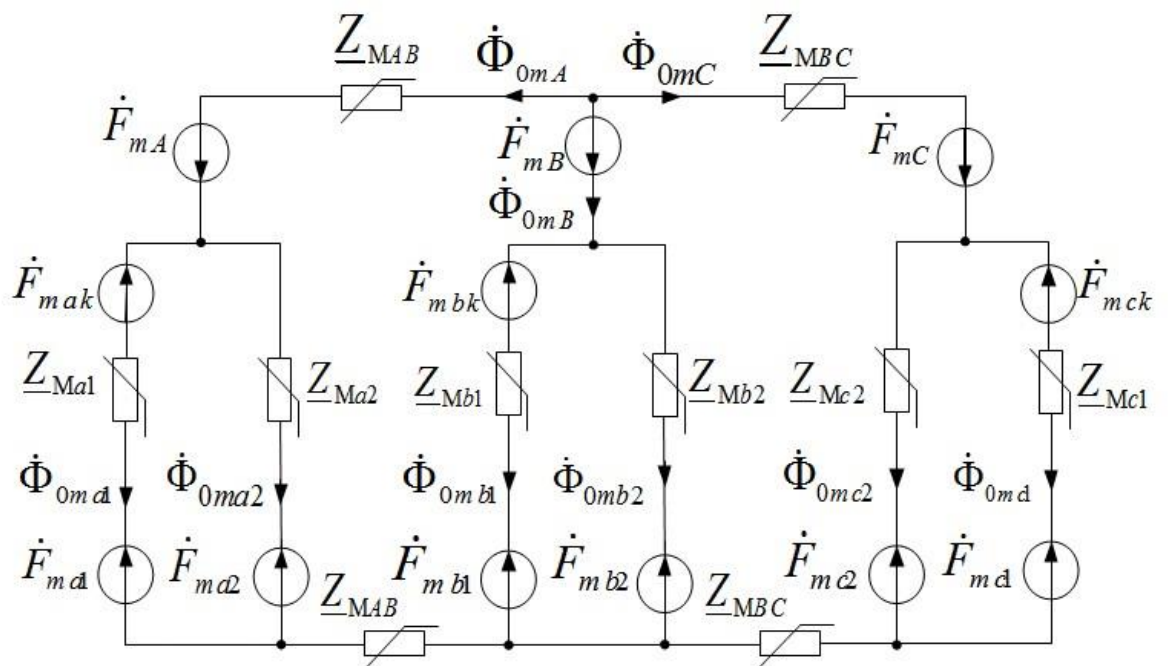


Рис. 2.14 – Схема заміщення магнітного кола трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом.

На рис. 2.13 використані наступні позиції: 1 - ярмо, 2 - розщеплений стрижень, 3 і 4 - підстержні, 5 і 6 - перша і друга секція вторинної обмотки, 7 первинна обмотка, 8 - короткозамкнута обмотка.

Нехтуючи потоками розсіювання і використовуючи метод еквівалентних синусоїд, складемо систему нелінійних диференціальних рівнянь в комплексному вигляді для схеми заміщення магнітного кола, наведеною на рис. 2.14 (сенси графічних символів такої ж, як і на рис. 2.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Phi}_{0mA} = \dot{\Phi}_{0ma1} + \dot{\Phi}_{0ma2} \\ \dot{\Phi}_{0mB} = \dot{\Phi}_{0mb1} + \dot{\Phi}_{0mb2} \\ \dot{\Phi}_{0mC} = \dot{\Phi}_{0mc1} + \dot{\Phi}_{0mc2} \\ \dot{\Phi}_{0mA} + \dot{\Phi}_{0mB} + \dot{\Phi}_{0mC} = 0 \\ \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0ma1} \underline{Z}_{Ma1} = -\dot{F}_{ma2} + \dot{F}_{ma1} + \dot{F}_{mak} \\ \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} - \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} = -\dot{F}_{mb2} + \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{mbk} \\ \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} - \dot{\Phi}_{0mc1} \underline{Z}_{Mc1} = -\dot{F}_{mc2} + \dot{F}_{mc1} + \dot{F}_{mck} \\ -2\dot{\Phi}_{0mA} \underline{Z}_{MAB} + \dot{\Phi}_{0mb1} \underline{Z}_{Mb1} - \dot{\Phi}_{0ma2} \underline{Z}_{Ma2} = \dot{F}_{ma2} - \dot{F}_{mA} + \dot{F}_{mB} - \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mb1} \\ 2\dot{\Phi}_{0mC} \underline{Z}_{MBC} + \dot{\Phi}_{0mc2} \underline{Z}_{Mc2} - \dot{\Phi}_{0mb2} \underline{Z}_{Mb2} = \dot{F}_{mb2} - \dot{F}_{mB} + \dot{F}_{mC} - \dot{F}_{mck} - \dot{F}_{mc1} \end{array} \right. , (2.25)$$

де $\dot{F}_{mak}, \dot{F}_{mbk}, \dot{F}_{mck}$ - комплексні амплітудні значення змінних магніторушійних сил, створюваних короткозамкненими обмотками фаз «А», «В» і «С» відповідно.

На перший підстержень намотана короткозамкнута обмотка з числом витків w_k . Це означає, що змінний магнітний потік першого підстержня $\dot{\Phi}_{0ma1}$ зчіплюється не тільки з витками першої секції вторинної обмотки, а й з витками короткозамкненою обмотки w_k , та індукує в ній електрорушійну силу $\dot{E}_{0mk}$.

Під дією $\dot{E}_{0mk}$ в короткозамкнених витках протікає змінний електричний струм $\dot{I}_{mk}$, що створює змінний магнітний потік $\dot{\Phi}_{0mak}$, протилежний $\dot{\Phi}_{0ma1}$. $\dot{\Phi}_{0mak}$ частково компенсує $\dot{\Phi}_{0ma1}$, внаслідок чого матеріал першого підстержня розмагнічується. Це технічне рішення дозволяє, не змінюючи площі поперечного

перерізу першого підстержня, збільшити відносну магнітну проникність його матеріалу, скоротити магнітні втрати трансформатора.

Для того щоб знизити джоулеві втрати в короткозамкненій обмотці, пропонується її виконати секціонованою (або проводом великого поперечного перерізу). При чому на відміну від вторинної обмотки, секції в короткозамкненій обмотці матимуть однакову кількість витків w_k , з'єднані будуть паралельно.

Визначимо умови прояву стабілізуючого ефекту як в п. 2.1. використовуючи вираз (2.12) отримаємо:

$$\dot{\Phi}_{0ma1} = \frac{\dot{F}_{mak}}{\underline{Z}_{Ma1}} = \frac{w_{ak} \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1}}{jw_{21}^2 \omega}. \quad (2.26)$$

Напруга першої секції вторинної обмотки с урахуванням (2.26) визначається у вигляді:

$$\dot{U}_{ma1} = \frac{w_{ak}}{w_{a21}} \dot{I}_{mak} \underline{Z}_{a1}. \quad (2.27)$$

З урахуванням виразів (2.15 - 2.28) отримуємо нелінійне диференціальне рівняння:

$$\frac{w_{ak}}{w_{a21}} \left(\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} \underline{Z}_{a1} + \frac{d\underline{Z}_{a1}}{d\dot{I}_{ma}} \dot{I}_{mak} \right) + \underline{Z}_{a2} + \dot{I}_{ma} \frac{d\underline{Z}_{a2}}{d\dot{I}_{ma}} = 0, \quad (2.28)$$

якщо $\underline{Z}_{a1}(\dot{I}_a) = \frac{\dot{U}_{a1}(\dot{I}_a)}{\dot{I}_a}$ і $\underline{Z}_{a2}(\dot{I}_a) = \frac{\dot{U}_{a2}(\dot{I}_a)}{\dot{I}_a}$ [55], рівняння (2.28) набуває

вигляду:

$$\frac{w_{ak}}{w_{a21}} \left(\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} \frac{\dot{U}_{ma1}}{\dot{I}_{ma}} + \frac{\dot{I}_{mak}}{\dot{I}_{ma}} \frac{d\dot{U}_{ma1}}{d\dot{I}_{ma}} - \frac{\dot{U}_{ma1}\dot{I}_{mak}}{\dot{I}_{ma}^2} \right) + \frac{d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}} = 0. \quad (2.29)$$

В отримане рівняння (2.29) входять не тільки вирази $\frac{d\dot{U}_{ma1}}{d\dot{I}_{ma}}$ і $\frac{d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}}$ як в (2.16), але також і $\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}}$, що відповідає за швидкість наростання струму в короткозамкненій обмотці, тобто стабілізуючі властивості будуть визначатися не тільки магнітним «розбалансуванням» матеріалів підстержней, але і характером зміни амплітудного значення струму в короткозамкнених витках.

Рішення рівняння (2.29) для модулів напруг вторинних обмоток ілюструється на рис. 2.15, для початкових фаз напруг секцій вторинної обмотки - на рис. 2.16.

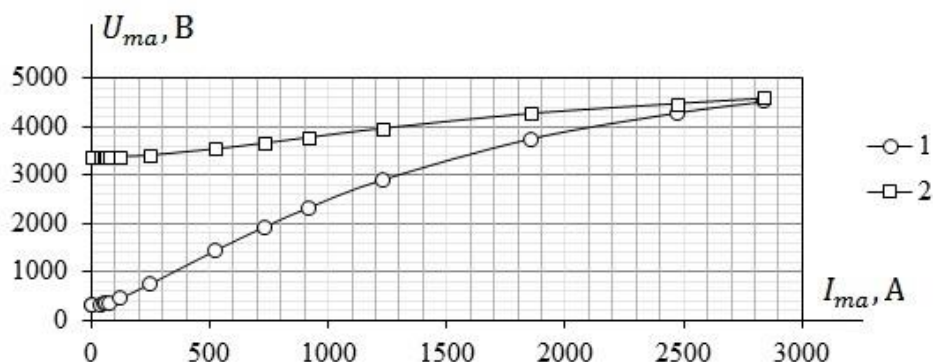


Рисунок 2.15 – Струмова залежність напруги секцій вторинної обмотки трансформатора (крива 1 - $U_{ma1}(I_{ma})$, крива 2 - $U_{ma2}(I_{ma})$)

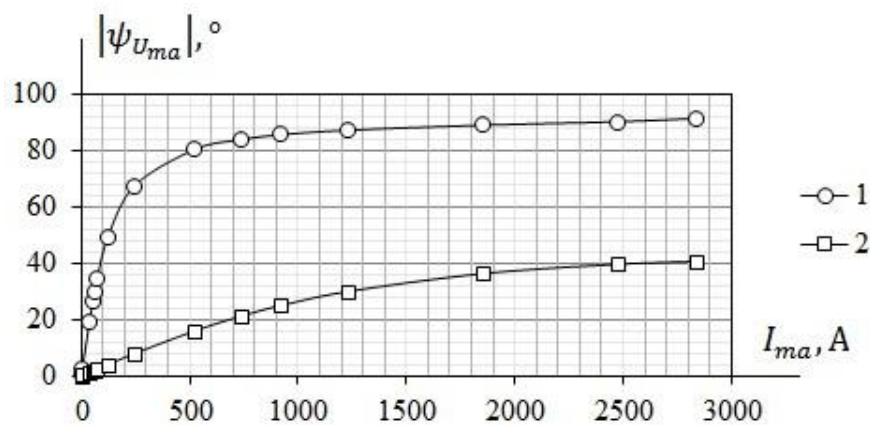


Рисунок 2.16 – Струмова залежність початкової фази напруги секцій вторинної обмотки (крива 1- $|\psi_{U_{ma1}}|(I_{ma})$, крива 2 - $|\psi_{U_{ma2}}|(I_{ma})$)

На рис. 2.15 при $I_{ma} = 0$ А $U_{ma1} < U_{ma2}$, причому різниця між амплітудними значеннями напруг секцій становить $\Delta U_{ma12} = 3071$ В.

Це обумовлено тим, що струм короткозамкненою обмотки розмагнічує матеріал першого підстержня, отже, індуктивність першої секції більше, ніж другий, а значить і $|\psi_{U_{ma1}}| > |\psi_{U_{ma2}}|$ (рис. 2.16).

Зі збільшення струму вторинної обмотки ΔU_{ma12} зменшується, при $I_{ma} = 2800$ А, коли матеріал першого підстержня наближається до стану магнітного насичення, а матеріал другого підстержня вже насичений, $\Delta U_{ma12} \rightarrow 0$ В (рис. 2.15).

Тобто при $I_{ma} \geq 2800$ А, струм короткозамкненої обмотки не робить помітної розмагнічуючої дії на магнітне поле першого підстержня, тобто трансформатор втрачає свої стабілізуючі властивості.

На рис. 2.17 наведені графіки функцій $I_{mak}(I_{ma})$ і $|\psi_{I_{mak}}|(I_{ma})$.

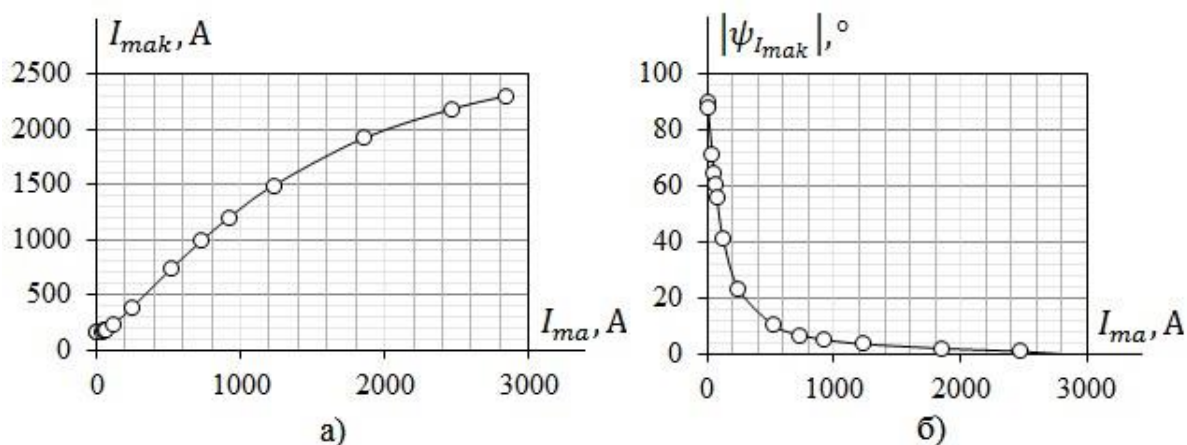


Рисунок 2.17 – Залежність струму короткозамкненої обмотки а) і його початкової фази б) від струму вторинної обмотки

На рис. 2.17,а видно, що залежність $I_{mak}(I_{ma})$ - нелінійна. Висловивши I_{mak} через магнітний потік першого підстержня і проникність його матеріалу, отримуємо, що $\dot{I}_{mak} = \dot{\Phi}_{ma1} \frac{l_{sa1} + 2l_{ya1a2}}{w_k \dot{\mu}_{a1} S_{a1}}$ або $\dot{I}_{mak} \sim \frac{\dot{U}_{ma1}}{\dot{\mu}_{a1}}$. Якщо знехтувати малим $\dot{\mu}_{a1}$, тоді для комплексів отримуємо вираз $\dot{I}_{mak} \sim \dot{U}_{ma1}$, А для модулів - $I_{mak} \sim U_{ma1}$, що підтверджується на графіках рис. 2.15 і рис. 2.17,а.

Так як збільшення амплітудного значення струму короткозамкненої обмотки пов'язано зі збільшенням магнітного потоку першого підстержня, індуктивність цієї обмотки відповідно до виразу $\dot{\psi}_{mak} = L_{ak} \dot{I}_{mak}$ в цьому випадку буде зменшуватися ($\dot{\psi}_{mak}$ - комплексне амплітудне значення потокозчеплення короткозамкненої обмотки, L_{ak} - індуктивність короткозамкненої обмотки). Зменшуватиметься і початкова фаза $\dot{I}_{mak}$ (рис. 2.17) відповідно до виразу $\psi_{I_{mak}} = \arctg \frac{\omega L_{ak}}{R'}$, (R - еквівалентний активний опір короткозамкненої обмотки, обумовлений магнітними втратами в тілі першого підстержня, втратами в проводах обмотки нехтуємо) [41].

Таким чином, при $I_{ma} > 2500$ А початкова фаза струму короткозамкненої обмотки не змінюється, матеріал другого підстержня насичений і стабілізуючі властивості трифазного трансформатора погіршуються, а при $I_{ma} \geq 2800$ А ефект стабілізації взагалі зникає і напруга вторинної обмотки відхиляється від свого номінального значення (3705 В) більш ніж на 0,5%.

Якщо в рівнянні (2.17) $\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} = 1$, Отримуємо рівняння аналогічне (2.16) і (2.17):

$$\frac{\frac{w_{ak}}{w_{a21}} d\dot{U}_{ma1} + d\dot{U}_{ma2}}{d\dot{I}_{ma}} = 0, \quad (2.30)$$

Таким чином, до умови максимального прояву стабілізуючого ефекту з п.2.1 додається умова рівності струмів вторинної і короткозамкнених обмоток. На рис. 2.18 графік залежності $I_{mak}(I_{mA})$ перетинається з графіком $I_{ma}(I_{mA})$ в точці, яка має координати $I_{ma} = 300$ А, $I_m = 2000$ А.

На рис. 2.19 криві 1 і 2 перетинаються в точки з $I_{ma} = 2000$ А (номінальне значення), при цьому повинно виконуватися рівність $\frac{w_{ak}}{w_{a21}} = 0,4$.

Дійсно, при $w_{ak}=24$ і $w_{a21}=60$ (згідно конструкції базового трансформатора) отримуємо $\frac{w_{ak}}{w_{a21}} = \frac{24}{60} = 0,4$.

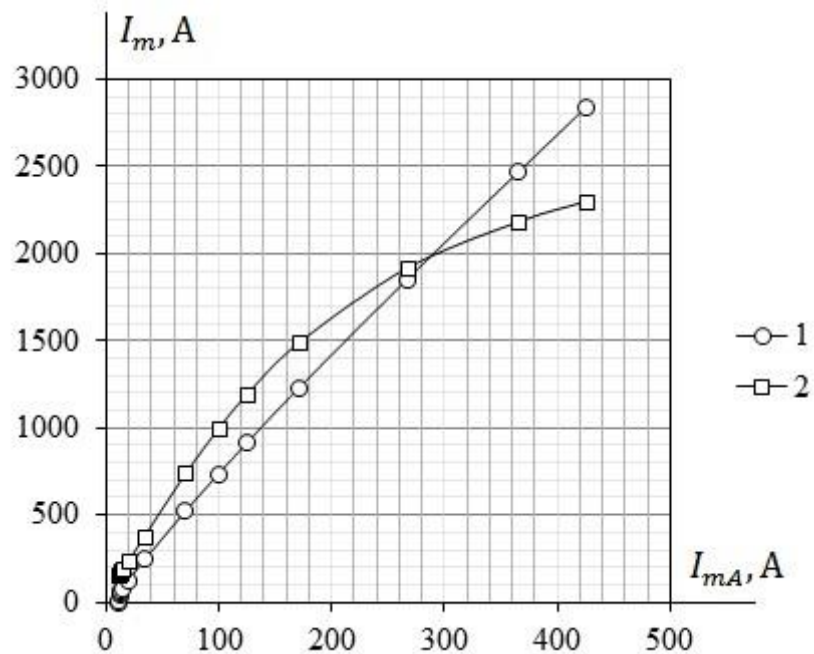


Рисунок 2.18 – Залежності струмів вторинної і короткозамкненою обмоток від струму в первинній обмотці трансформатора (крива 1 - $I_{m1}(I_{mA})$, крива 2 - $I_{m2}(I_{mA})$)

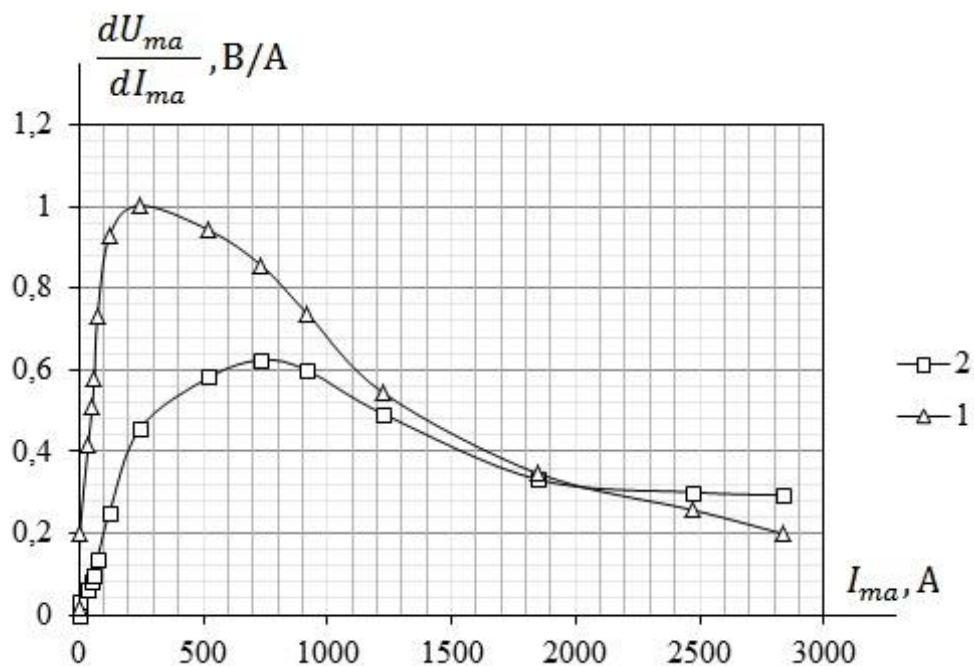


Рисунок 2.19 – Залежності зміни напружень секцій вторинної обмотки від струму вторинної обмотки (крива 1- $\frac{w_{ak}}{w_{a21}} \frac{dU_{ma1}}{dI_{ma}}(I_{ma})$, крива 2- $\frac{dU_{ma2}}{dI_{ma}}(I_{ma})$)

При збільшенні струму вторинної обмотки трансформатора напруженість магнітного поля підстержней відповідно до закону повного струму $\oint Hdl = i$, буде збільшуватися, а магнітна проникність сталі зменшуватиметься (рис. 2.20).

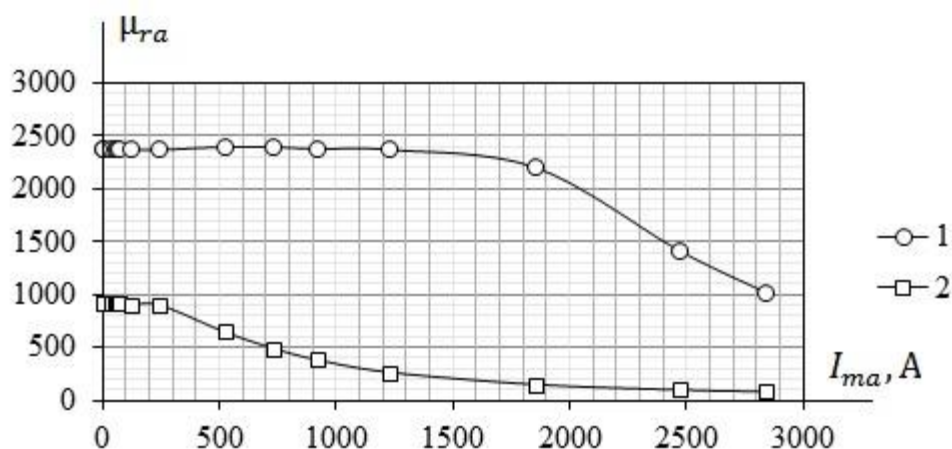


Рисунок 2.20 – Залежності зміни відносної магнітної проникності матеріалу підстержней фази «А» трансформатора (крива 1 - $\mu_{ra1}(I_{ma})$, крива 2- $\mu_{ra2}(I_{ma})$)

При $I_{ma} \geq 2000$ А, відносна магнітна проникність $\mu_{ra1} \gg \mu_{ra2}$. На рис. 2.21 представлена зовнішня характеристика трансформатора (фаза «А»), з якої видно, що при $1400 \leq I_{ma} \leq 2800$ А відхилення напруги вторинної обмотки від свого номінального значення не перевищує 0,5% (проявляється стабілізуючий ефект).

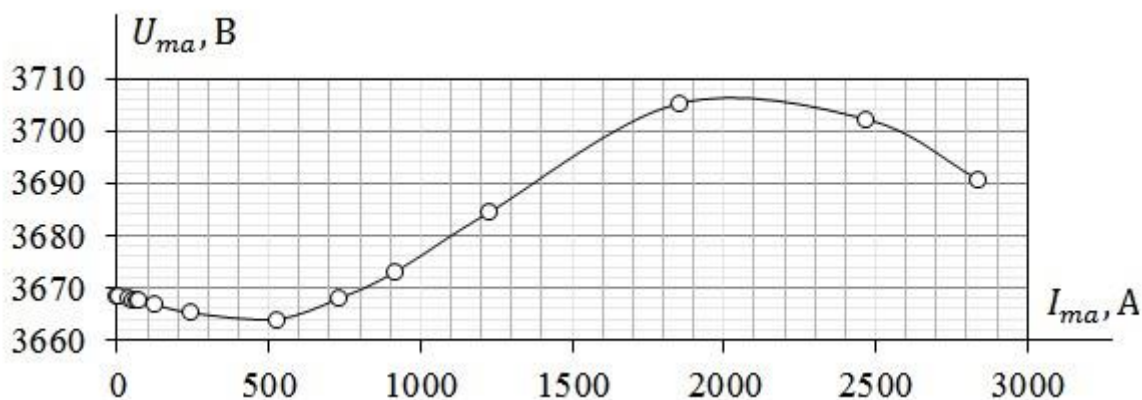


Рисунок 2.21 – Зовнішня характеристика трансформатора

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що ефект стабілізації напруги вторинної обмотки трансформатора виявляється в околиці точки кривої $U_{ma}(I_{ma})$, в якій:

$$1. \frac{d\Phi_{0ma1}}{dI_{ma}} = k \frac{d\Phi_{0ma2}}{dI_{ma}}, \text{ де } k < 1 - \text{ коефіцієнт пропорційності при}$$

$\Phi_{0ma1} \neq \Phi_{0ma2}$ (відповідає п.2.1);

$$2. \mu_{a1} \gg \mu_{a2} \text{ (відповідає п.2.1);}$$

$$3. I_{ma} = I_{mak}.$$

2.3 Спосіб стабілізації напруги за допомогою зміни ступеня намагнічування матеріалу підстержней магнітопровода трансформатора з короткозамкненими витками і секціонованою первинною обмоткою (варіант 3)

Основним недоліком конструкції трансформатора, описаної в п.2.2 є ослаблення магнітного зв'язку між первинною обмоткою і секціями вторинної обмотки. У зв'язку з цим збільшуються змінні магнітні потоки розсіювання, що замикаються по повітрю і металевим елементам корпусу трансформатора і зчеплені тільки з частиною витків обмоток трансформатора. Посилити магнітний зв'язок між первинною і вторинною обмотками можна, секціонуючи первинну обмотку (рис. 2.22, рис. 2.23).

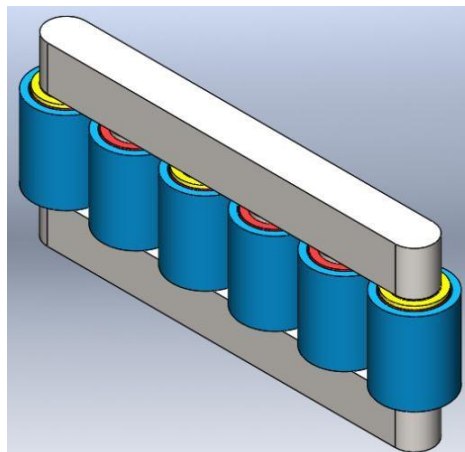


Рисунок 2.22 – Трифазний трансформатор з секціонованими обмотками і короткозамкненими обмотками (варіант 3)

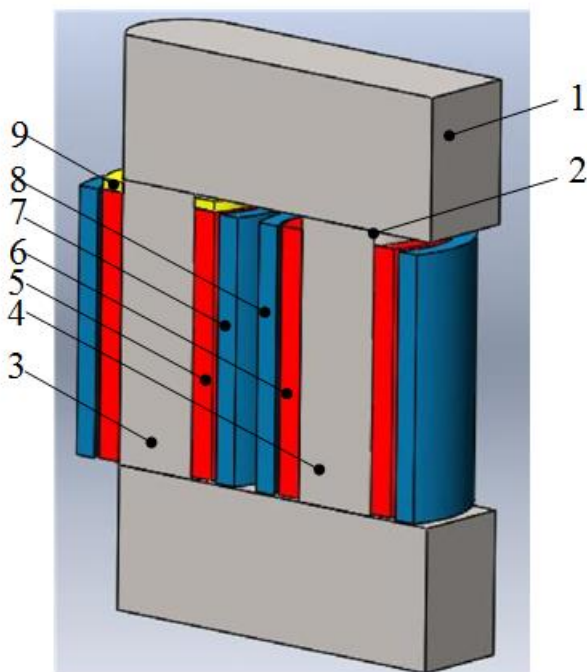


Рисунок 2.23 – Конструкція фази «А» трансформатора (варіант 3)

На рис. 2.23: 1 - ярмо, 2 - розщеплений стрижень, 3 - перший підстержень, 4 - другий підстержень, 5 - перша секція вторинної обмотки, 6-друга секція вторинної обмотки, 7 - перша секція первинної обмотки, 8 - друга секція первинної обмотки, 9 - короткозамкнута обмотка.

За аналогією з п.2.2 і при використанні методу еквівалентних синусоїд, складемо систему рівнянь по I і II законам Кірхгофа для амплітудних значень (без урахування магнітного розсіювання) в комплексній формі - система (2.31). Дана система складалася для схеми заміщення магнітного кола трифазного трансформатора з секціонованими обмотками і короткозамкненими обмотками, показаної на рис. 2.24. Сенс графічних символів, використаних на цій схемі, такий же, що і на рис. 2.4.

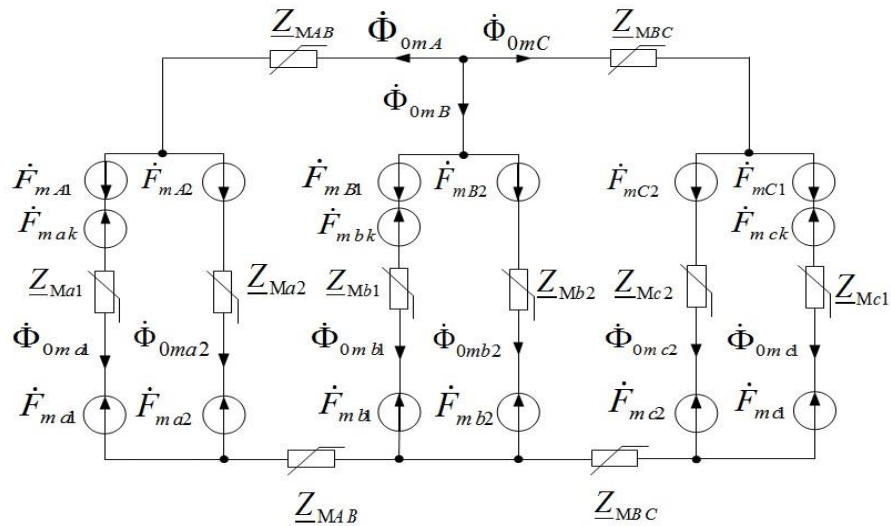


Рисунок 2.24 – Схема заміщення магнітного кола трифазного трансформатора з секціонованими обмотками і короткозамкненими обмотками.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{\Phi}_{0mA} = \dot{\Phi}_{0ma1} + \dot{\Phi}_{0ma2} \\
 \dot{\Phi}_{0mB} = \dot{\Phi}_{0mb1} + \dot{\Phi}_{0mb2} \\
 \dot{\Phi}_{0mC} = \dot{\Phi}_{0mc1} + \dot{\Phi}_{0mc2} \\
 \dot{\Phi}_{0mA} + \dot{\Phi}_{0mB} + \dot{\Phi}_{0mC} = 0 \\
 \dot{\Phi}_{0ma2} Z_{Ma2} - \dot{\Phi}_{0ma1} Z_{Ma1} = \dot{F}_{mA2} - \dot{F}_{ma2} + \dot{F}_{ma1} + \dot{F}_{mak} - \dot{F}_{mA1} \\
 \dot{\Phi}_{0mb2} Z_{Mb2} - \dot{\Phi}_{0mb1} Z_{Mb1} = \dot{F}_{mB2} - \dot{F}_{mb2} + \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mB1} \\
 \dot{\Phi}_{0mc1} Z_{Mc1} - \dot{\Phi}_{0mc2} Z_{Mc2} = \dot{F}_{mC1} - \dot{F}_{mck} - \dot{F}_{mc1} + \dot{F}_{mc2} - \dot{F}_{mC2} \\
 - 2\dot{\Phi}_{0mA} Z_{MAB} + \dot{\Phi}_{0mb1} Z_{Mb1} - \dot{\Phi}_{0ma2} Z_{Ma2} = \dot{F}_{mB1} - \dot{F}_{mbk} - \dot{F}_{mb1} + \dot{F}_{ma2} \\
 2\dot{\Phi}_{0mC} Z_{MBC} + \dot{\Phi}_{0mc2} Z_{Mc2} - \dot{\Phi}_{0mb2} Z_{Mb2} = \dot{F}_{mC2} - \dot{F}_{mc2} + \dot{F}_{mb2} - \dot{F}_{mB2}
 \end{array} \right. , \quad (2.31)$$

де $\dot{F}_{mA1}, \dot{F}_{mB1}, \dot{F}_{mC1}$ - комплексні амплітудні значення магніторушійних сил перших секцій первинних обмоток фаз «А», «В» і «С» відповідно;

$\dot{F}_{mA2}, \dot{F}_{mB2}, \dot{F}_{mC2}$ - комплексні амплітудні значення магніторушійних сил других секцій первинних обмоток фаз «А», «В» і «С» відповідно.

Необхідно встановити, секціонування первинної обмотки накладає обмеження на умови прояву стабілізуючого ефекту трансформатора.

Припустимо, що трансформатор підключений до джерела нескінченної потужності, і складемо рівняння виду:

$$\frac{w_{ak}}{w_{a21}} \left(\frac{d\dot{I}_{mak}}{d\dot{I}_{ma}} \frac{\dot{U}_{mA1}}{\dot{I}_{mA}} + \frac{\dot{I}_{mak}}{\dot{I}_{ma}} \frac{d\dot{U}_{mA1}}{d\dot{I}_{mA}} - \frac{\dot{U}_{mA1}\dot{I}_{mak}}{\dot{I}_{mA}^2} \right) + \frac{d\dot{U}_{mA2}}{d\dot{I}_{mA}} = 0, \quad (2.32)$$

де $\dot{U}_{mA1}$ - комплексне амплітудне значення напруги першої секції первинної обмотки;

$\dot{U}_{mA2}$ - комплексне амплітудне значення напруги другої секції первинної обмотки.

Результати рішення рівняння (2.32) для модулів напруг секцій первинної обмотки фази «А» наведено на рис. 2.25.

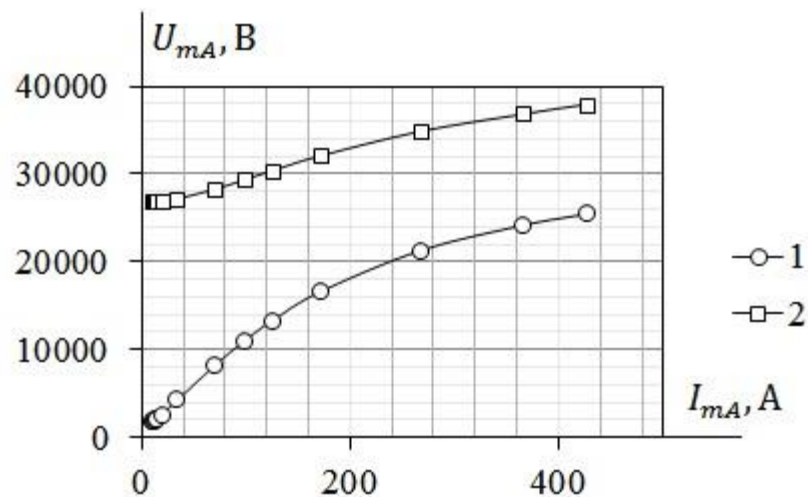


Рисунок 2.25 – Криві зміни напружень секцій первинної обмотки
(1- $U_{mA1}(I_{mA})$, 2- $U_{mA2}(I_{mA})$)

При збільшенні струму первинної обмотки напруги секцій збільшуються, при цьому $\dot{U}_{mA1} \neq \dot{U}_{mA2} \left(\frac{U_{mA1}}{U_{mA2}} \approx 0,6 \right)$. Нехай $\frac{dI_{mak}}{dI_{mA}} = 1$, тоді:

$$\frac{w_{ak}}{w_{A11}} \frac{d\dot{U}_{mA1}}{d\dot{I}_{mA}} + \frac{d\dot{U}_{mA2}}{d\dot{I}_{mA}} = 0. \quad (2.33)$$

На рис. 2.26 наведені криві залежностей зміни похідної напруги секцій первинної обмотки від струму в первинній обмотці.

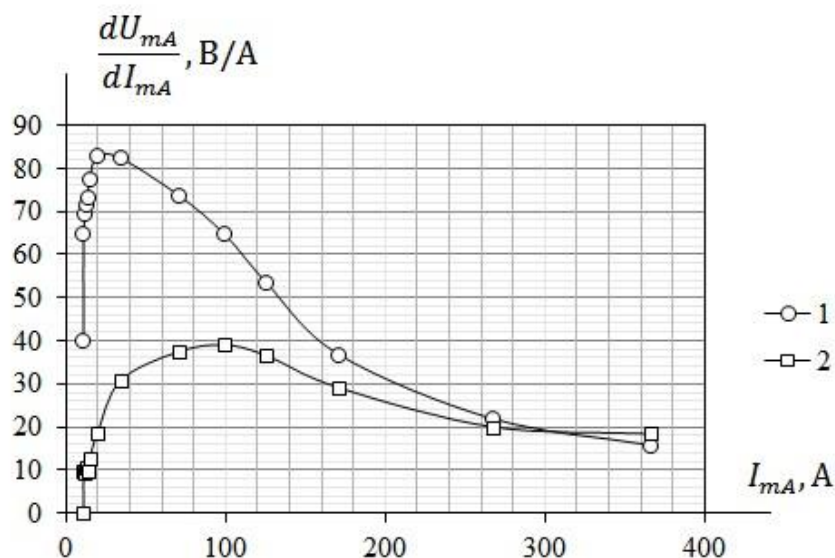


Рисунок 2.26 – Криві зміни напружень секцій первинної обмотки

(крива 1 – $\frac{w_{ak}}{w_{A11}} \frac{dU_{mA1}}{dI_{mA}}(I_{mA})$, крива 2 – $\frac{dU_{mA2}}{dI_{mA}}(I_{mA})$)

На рис. 2.26 криві 1 і 2, що відповідають різним секціям, перетинаються в точці з $I_{mA} = 300$ А (номінальне значення).

Рівність $\frac{w_{ak}}{w_{A11}} \frac{dU_{mA1}}{dI_{mA}} = \frac{dU_{mA2}}{dI_{mA}}$ при $\dot{U}_{mA1} \neq \dot{U}_{mA2}$ виконується, якщо

$\frac{w_{ak}}{w_{A11}} = 0,75$. Так як число витків короткозамкненою обмотки фіксоване і

становить $w_{ak} = 24$ шт. При $\frac{w_{ak}}{w_{A11}} = 0,75$ число витків секцій первинної обмотки

має скласти $\frac{w_{ak}}{0,75} = 32$ шт. У досліджуваному варіанті трансформатора

$w_{A11} = w_{A12} = 350$ шт. Таким чином, секціонування первинної обмотки не накладає ніяких обмежень на значення струму I_{mA} .

В ході чисельного розрахунку електромагнітного поля трифазного трансформатора отримані характеристики аналогічні характеристикам, наведеним в п.2.2. У разі секціонованої первинної обмотки максимальне значення результуючої напруги на вторинній обмотці більше на 0,1% напруги вторинної обмотки в п.2.2. Це підтверджує припущення, що секціонуванням первинної обмотки можна домогтися зменшення потоків розсіювання за рахунок збільшення коефіцієнта магнітного зв'язку між обмотками.

В результаті розрахункових досліджень встановлено основні параметри базового трансформатора (див. Додаток 1), що відповідають за ступінь прояву стабілізуючого ефекту.

2.4 Порівняльний аналіз розроблених способів стабілізації напруги

Запропоновано і проаналізовано 3 варіанти конструкції трехстержневого трифазного трансформатора з метою виявлення оптимального варіанту, який володіє додатковою функцією стабілізації вихідної напруги.

1. Трифазний трансформатор з розщепленими стрижнями з вторинною обмоткою, що складається з двох послідовно з'єднаних секцій:

1.1.3 рівним числом витків секцій ($w_{21} = w_{22}$), площі поперечних перерізів підстержней не рівні один одному ($S_1 \neq S_2$). В даному випадку стабілізуючий ефект не проявляється.

1.2. З нерівним числом витків секцій ($w_{21} \neq w_{22}$). Площі поперечних перерізів підстержней рівні один одному ($S_1 = S_2$). Ефект стабілізації напруги вторинної обмотки проявляється. Однак, щоб матеріал підстержней не переходив в область насичення при струмових перевантаженнях, необхідно збільшувати поперечний переріз підстержней, це, в свою чергу, веде до додаткових витрат стали і міді. Конструкції характерні великі магнітні потоки розсіювання, трансформатор складний з точки зору технології виготовлення і збірки.

1.3. З нерівним числом витків секцій ($w_{21} \neq w_{22}$), площі поперечних перерізів підстержней не рівні ($S_1 \neq S_2$). Ефект стабілізації напруги вторинної

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

обмотки проявляється, але необхідність у збільшенні площ поперечних перерізів підстержнів веде до додаткових витрат стали і міді. Конструкції характерні великі магнітні потоки розсіювання, трансформатор складний з точки зору технології виготовлення і збірки.

1.4 Трифазний трансформатор з розщепленими стрижнями з вторинною обмоткою, що складається з двох послідовно з'єднаних секцій ($w_{21} > w_{22}$), площі поперечних перерізів підстержней рівні один одному $S_1 = S_2$. На першому підстержні розташована короткозамкнута обмотка. Ефект стабілізації напруги вторинної обмотки проявляється. Але цьому виду притаманні всі недоліки раніше описаних конструкцій.

1.5 Трифазний трансформатор з розщепленими стрижнями, вторинна обмотка складається з двох послідовно з'єднаних секцій ($w_{21} > w_{22}$). Первинна обмотка складається з двох послідовно з'єднаних секцій ($w_{11} = w_{12}$). Площі поперечних перерізів підстержней рівні один одному $S_1 = S_2$. На перший підстержень намотана короткозамкнута обмотка. Ефект стабілізації напруги вторинної обмотки проявляється. Через більш щільне укладання секцій первинної і вторинної обмоток на підстержнях збільшується коефіцієнт магнітного зв'язку між ними, також спрощується операція намотування секцій і виконання головної ізоляції.

Висновки по 2 розділу

1. Розщеплення стрижнів магнітопровода на два паралельних підстержня з рівними площами поперечних перерізів, а також поділ фаз вторинної обмотки на секції з різними числом витків, намотаних на підстержні, призводить до намагнічування матеріалу підстержней з різною швидкістю при зміні струму вторинної обмотки, а, отже, до появи стабілізуючих властивостей трансформатора.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

2. Для підвищення коефіцієнта магнітного зв'язку між обмотками доцільно поділ первинної обмотки на секції, намотаної поверх секцій вторинної обмотки, при цьому стабілізуючі властивості зберігаються.

3. Розміщення додаткової короткозамкненої обмотки на одному з підстержней кожної фази трансформатора дозволяє посилити стабілізуючий ефект при критичних струмових перевантаженнях, оскільки в цих умовах струми в короткозамкненій обмотці надають розмагнічуючу дію на матеріал першого підстержня, на якому вона розташована, знижуючи його магнітний потік до робочого значення.

4. В ході розробки і дослідження варіантів конструкції трансформатора, встановлено, що оптимальним є варіант конструктивної схеми з підстержнями, що мають рівні площі поперечних перерізів, і вторинною обмоткою, розділеною на дві послідовно з'єднані секції з різним числом витків, і первинною обмоткою, розділеною на дві послідовно з'єднані секції з рівним числом витків, причому секції первинної обмотки намотані поверх секцій вторинної обмотки.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

З РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРНИХ-ВИПРЯМЛЯЧІВ ТА СТАБІЛІЗУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ

У цій главі представлені результати розрахункових досліджень магнітного поля трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями в трьох основних режимах його роботи (в номінальному режимі, режимі холостого ходу і короткого замикання) за допомогою пакета програми ELCUT, також дано спрощений аналіз схем заміщення трансформатора в згаданих режимах, наведені отримані основні характеристики трансформатора.

3.1 Дослідження номінального режиму роботи трансформатора

Для номінального режиму роботи трансформатора (для перших гармонік) побудована схема заміщення трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями (рисунок 3.1).

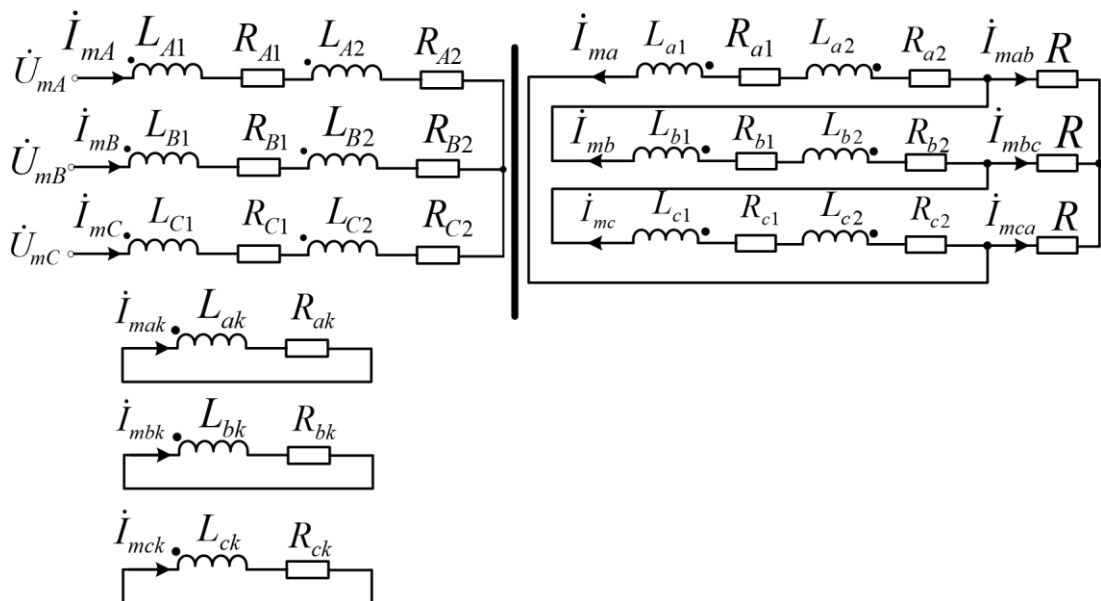


Рисунок 3.1 – Схема заміщення трифазного трансформатора з стабілізуючим ефектом в номінальному режимі роботи

Тут використовуються такі позначення:

$\dot{I}_{mab}, \dot{I}_{mbc}, \dot{I}_{mca}$ - комплексні амплітудні значення лінійних струмів вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$\dot{U}_{mA}, \dot{U}_{mB}, \dot{U}_{mC}$ - комплексні амплітудні значення напруг первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$R_{A1}, R_{A2}, R_{B1}, R_{B2}, R_{C1}, R_{C2}$ - активні опори перших і других секцій первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$R_{a1}, R_{a2}, R_{b1}, R_{b2}, R_{c1}, R_{c2}$ - активні опори перших і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

R_{ak}, R_{bk}, R_{ck} - активні опори короткозамкнених обмоток фази «А», «В», «С» відповідно;

$L_{A1}, L_{A2}, L_{B1}, L_{B2}, L_{C1}, L_{C2}$ - власні індуктивності перших і других секцій первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$L_{a1}, L_{a2}, L_{b1}, L_{b2}, L_{c1}, L_{c2}$ - власні індуктивності перших і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

L_{ak}, L_{bk}, L_{ck} - власні індуктивності короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно.

Згідно I-ому і II-ому законам Кірхгофа складена система рівнянь (3.1).

$$\begin{aligned}
& \dot{I}_{mA} + \dot{I}_{mA} + \dot{I}_{mA} = 0, \\
& \dot{I}_{ma} = \dot{I}_{mab} + \dot{I}_{mb}, \\
& \dot{I}_{mb} = \dot{I}_{mbc} + \dot{I}_{mc}, \\
& \dot{I}_{mc} = \dot{I}_{mca} + \dot{I}_{ma}, \\
& \dot{U}_{mA} - \dot{U}_{mB} = \dot{I}_{mA} jX_{A1} + \dot{I}_{mA} R_{A1} + 2\dot{I}_{mA} jX_{A1A2} + \dot{I}_{mA} jX_{A2} + \\
& \dot{I}_{mA} R_{A2} + \dot{I}_{ma} jX_{a1A1} + \dot{I}_{ma} jX_{a2A1} + \dot{I}_{ma} jX_{a1A2} + \dot{I}_{ma} jX_{a2A2} + \\
& \dot{I}_{mak} jX_{akA1} + \dot{I}_{mak} jX_{akA2} - (\dot{I}_{mB} jX_{B1} + \dot{I}_{mB} R_{B1} + 2\dot{I}_{mB} jX_{B1B2} + \\
& \dot{I}_{mB} jX_{B2} + \dot{I}_{mB} R_{B2} + \dot{I}_{mb} jX_{b1B1} + \dot{I}_{mb} jX_{b2B1} + \dot{I}_{mb} jX_{b1B2} + \\
& \dot{I}_{mb} jX_{b2B2} + \dot{I}_{mbk} jX_{bkB1} + \dot{I}_{mbk} jX_{bkB2}), \\
& \dot{U}_{mB} - \dot{U}_{mC} = \dot{I}_{mB} jX_{B1} + \dot{I}_{mB} R_{B1} + 2\dot{I}_{mB} jX_{B1B2} + \dot{I}_{mB} jX_{B2} \\
& + \dot{I}_{mB} R_{B2} + \dot{I}_{mb} jX_{b1B1} + \dot{I}_{mb} jX_{b2B1} + \dot{I}_{mb} jX_{b1B2} + \dot{I}_{mb} jX_{b2B2} \\
& + \dot{I}_{mbk} jX_{bkB1} + \dot{I}_{mbk} jX_{bkB2} - (\dot{I}_{mC} jX_{C1} + \dot{I}_{mC} R_{C1} + 2\dot{I}_{mC} jX_{C1C2} + \\
& + \dot{I}_{mC} jX_{C2} + \dot{I}_{mC} R_{C2} + \dot{I}_{mc} jX_{c1C1} + \dot{I}_{mc} jX_{c2C1} + \dot{I}_{mc} jX_{c1C2} + \\
& + \dot{I}_{mc} jX_{c2C2} + \dot{I}_{mck} jX_{ckC1} + \dot{I}_{mck} jX_{ckC2}), \\
& (\dot{I}_{ma} jX_{a1} + \dot{I}_{ma} R_{a1} + 2\dot{I}_{ma} jX_{a1a2} + \dot{I}_{ma} jX_{a2} + \dot{I}_{ma} R_{a2} + \\
& \dot{I}_{mA} jX_{A1a1} + \dot{I}_{mA} jX_{A2a1} + \dot{I}_{mA} jX_{A1a2} + \dot{I}_{mA} jX_{A2a2} + \dot{I}_{mak} jX_{akA1} + \\
& \dot{I}_{mak} jX_{akA2}) + (\dot{I}_{mb} jX_{b1} + \dot{I}_{mb} R_{b1} + 2\dot{I}_{mb} jX_{b1b2} + \dot{I}_{mb} jX_{b2} + \\
& \dot{I}_{mb} R_{b2} + \dot{I}_{mB} jX_{B1b1} + \dot{I}_{mB} jX_{B2b1} + \dot{I}_{mB} jX_{B1b2} + \dot{I}_{mB} jX_{B2b2} + \\
& \dot{I}_{mbk} jX_{bkB1} + \dot{I}_{mbk} jX_{bkB2}) + (\dot{I}_{mc} jX_{c1} + \dot{I}_{mc} R_{c1} + 2\dot{I}_{mc} jX_{c1c2} + \\
& + \dot{I}_{mc} jX_{c2} + \dot{I}_{mc} R_{c2} + \dot{I}_{mC} jX_{C1c1} + \dot{I}_{mC} jX_{C2c1} + \dot{I}_{mC} jX_{C1c2} \\
& + \dot{I}_{mC} jX_{C2c2} + \dot{I}_{mck} jX_{ckC1} + \dot{I}_{mck} jX_{ckC2}), \\
& \dot{I}_{mak} jX_{ak} + \dot{I}_{mak} R_{ak} + \dot{I}_{mA} jX_{A1ak} + \dot{I}_{mA} jX_{A2ak} + \dot{I}_{ma} jX_{a1ak} + \dot{I}_{ma} jX_{a2ak} = 0, \\
& \dot{I}_{mbk} jX_{bk} + \dot{I}_{mbk} R_{bk} + \dot{I}_{mB} jX_{B1bk} + \dot{I}_{mB} jX_{B2bk} + \dot{I}_{mb} jX_{b1bk} + \dot{I}_{mb} jX_{b2bk} = 0, \\
& \dot{I}_{mck} jX_{ck} + \dot{I}_{mck} R_{ck} + \dot{I}_{mC} jX_{C1ck} + \dot{I}_{mC} jX_{C2ck} + \dot{I}_{mc} jX_{c1ck} + \dot{I}_{mc} jX_{c2ck} = 0.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

де $X_{A1}, X_{A2}, X_{B1}, X_{B2}, X_{C1}, X_{C2}$ - власні індуктивні опори перших і других секцій первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{a1}, X_{a2}, X_{b1}, X_{b2}, X_{c1}, X_{c2}$ - власні індуктивні опори перших і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

X_{ak}, X_{bk}, X_{ck} - власні індуктивні опори короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{A1A2} = X_{A2A1} = \omega M_{A1A2}$, $X_{B1B2} = X_{B2B1} = \omega M_{B1B2}$, $X_{C1C2} = \omega M_{C1C2}$, -
взаємні індуктивні опори перших і других секцій первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{a1A1} = X_{A1a1} = \omega M_{A1a1}$, $X_{b1B1} = X_{B1b1} = \omega M_{B1b1}$, $X_{c1C1} = X_{C1c1} = \omega M_{C1c1}$ -
взаємні індуктивні опори перших секцій первинних і вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{a2A2} = X_{A2a2} = \omega M_{A2a2}$, $X_{b2B2} = X_{B2b2} = \omega M_{B2b2}$, $X_{c2C2} = \omega M_{C2c2}$ -
взаємні індуктивні опори других секцій первинних і вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{a2A1} = X_{A1a2} = \omega M_{A1a2}$, $X_{b2B1} = X_{B1b2} = \omega M_{B1b2}$, $X_{c2C1} = X_{C1c2} = \omega M_{C1c2}$ -
взаємні індуктивні опори перших секцій первинних обмоток і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{a1A2} = X_{A2a1} = \omega M_{A2a1}$, $X_{b1B2} = X_{B2b1} = \omega M_{B2b1}$, $X_{c1C2} = X_{C2c1} = \omega M_{C2c1}$ -
взаємні індуктивні опори других секцій первинних обмоток і перших секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{akA1} = X_{A1ak} = \omega M_{A1ak}$, $X_{bkB1} = X_{B1bk} = \omega M_{B1bk}$, $X_{ckC1} = X_{C1ck} = \omega M_{C1ck}$ -
взаємні індуктивні опори перших секцій первинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{akA2} = X_{A2ak} = \omega M_{A2ak}$, $X_{bkB2} = X_{B2bk} = \omega M_{B2bk}$, $X_{ckC2} = \omega M_{C2ck}$ -
взаємні індуктивні опори других секцій первинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{aka1} = X_{a1ak} = \omega M_{a1ak}$, $X_{bkb1} = X_{b1bk} = \omega M_{b1bk}$, $X_{ckc1} = X_{c1ck} = \omega M_{c1ck}$ -
взаємні індуктивні опори перших секцій вторинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$X_{aka2} = X_{a2ak} = \omega M_{a2ak}$, $X_{bkb2} = X_{b2bk} = \omega M_{b2bk}$, $X_{ckc2} = X_{c2ck} = \omega M_{c2ck}$ -
взаємні індуктивні опори других секцій вторинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A1A2}, M_{B1B2}, M_{C1C2}$ - взаємні індуктивності перших і других секцій первинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A1a1}, M_{B1b1}, M_{C1c1}$, - взаємні індуктивності перших секцій первинних і вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A2a2}, M_{B2b2}, M_{C2c2}$ - взаємні індуктивності других секцій первинних і вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A1a2}, M_{B1b2}, M_{C1c2}$ - взаємні індуктивності перших секцій первинних обмоток і других секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A2a1}, M_{B2b1}, M_{C2c1}$ - взаємні індуктивності других секцій первинних обмоток і перших секцій вторинних обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A1ak}, M_{B1bk}, M_{C1ck}$ - взаємні індуктивності перших секцій первинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{A2ak}, M_{B2bk}, M_{C2ck}$, - взаємні індуктивності других секцій первинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{a1ak}, M_{b1bk}, M_{c1ck}$ - взаємні індуктивності перших секцій вторинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно;

$M_{a2ak}, M_{b2bk}, M_{c2ck}$ - взаємні індуктивності других секцій вторинних обмоток і короткозамкнених обмоток фаз «А», «В», «С» відповідно.

Так як розглядається симетричний режим (фази навантажені однакові) і фази трансформатора мають однакову конструкцію, електромагнітні процеси в обмотках трансформатора розглядаються на прикладі фази «А».

Для фази «А» складемо систему рівнянь на основі системи (3.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{mA} = \dot{I}_{mA} jX_{A1} + \dot{I}_{mA} R_{A1} + 2\dot{I}_{mA} jX_{A1A2} + \dot{I}_{mA} jX_{A2} + \\ \dot{I}_{mA} R_{A2} + \dot{I}_{ma} jX_{a1A1} + \dot{I}_{ma} jX_{a2A1} + \dot{I}_{ma} jX_{a1A2} + \dot{I}_{ma} jX_{a2A2} + \\ \dot{I}_{mak} jX_{akA1} + \dot{I}_{mak} jX_{akA2}, \\ -\dot{U}_{ma} = \dot{I}_{ma} jX_{a1} + \dot{I}_{ma} R_{a1} + 2\dot{I}_{ma} jX_{a1a2} + \dot{I}_{ma} jX_{a2} + \dot{I}_{ma} R_{a2} + \\ \dot{I}_{mA} jX_{A1a1} + \dot{I}_{mA} jX_{A2a1} + \dot{I}_{mA} jX_{A1a2} + \dot{I}_{mA} jX_{A2a2} + \dot{I}_{mak} jX_{aka1} + \\ \dot{I}_{mak} jX_{aka2}, \\ 0 = \dot{I}_{mak} jX_{ak} + \dot{I}_{mak} R_{ak} + \dot{I}_{mA} jX_{A1ak} + \dot{I}_{mA} jX_{A2ak} + \dot{I}_{ma} jX_{a1ak} + \dot{I}_{ma} jX_{a2ak}, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Для спрощення аналізу побудуємо єдину електричну схему заміщення трансформатора зі стабілізуючими властивостями. Для цього необхідно привести вторинну і короткозамкненою обмотки до первинної.

Коефіцієнти приведення короткозамкненою обмотки до первинної і вторинної обмотки до первинної даються наступними виразами:

$$k_{1k} = \frac{w_{11} + w_{12}}{w_k}, \quad (3.3)$$

$$k_{12} = \frac{w_{11} + w_{12}}{w_{21} + w_{22}}. \quad (3.4)$$

Встановивши коефіцієнти приведення для обмоток, отримаємо вирази для наведених величин єдиної схеми заміщення. Комплексне амплітудне значення наведеної електрорушійної сили короткозамкнутою обмотки фази «А» визначається як $\dot{E}'_{mak} = k_{1k} \dot{E}_{mak}$ де $\dot{E}_{mak}$ - комплексне амплітудне значення електрорушійної сили короткозамкненої обмотки фази «А». Комплексне амплітудне значення наведеної результуючої напруги вторинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як $\dot{U}'_{ma} = k_{12} \dot{U}_{ma}$.

Водночас повні електричні потужності реальної і наведеної вторинної обмоток повинні бути рівні $\dot{U}'_{ma} \dot{I}'_{ma} = \dot{U}_{ma} \dot{I}_{ma}$. Тоді комплексне амплітудне

значення струму вторинної обмотки фази «А» визначається як $\dot{I}'_{ma} = \frac{\dot{I}_{ma}}{k_{12}}$.

Комплексне амплітудне значення струму короткозамкненої обмотки фази «А» визначається як $\dot{I}'_{ma} = \frac{\dot{I}_{mak}}{k_{1k}}$. З урахуванням отриманих виразів система рівнянь

(3.2) має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{mA} = \dot{I}_{mA} jX_{A1} + \dot{I}_{mA} R_{A1} + 2\dot{I}_{mA} jX_{A1A2} + \dot{I}_{mA} jX_{A2} + \\ \dot{I}_{mA} R_{A2} + \dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a1A1} + \dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a2A1} + \dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a1A2} + \dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a2A2} + \\ \dot{I}'_{mak} k_{1k} jX_{akA1} + \dot{I}'_{mak} k_{1k} jX_{akA2}, \\ -\dot{U}'_{ma} = I'_{ma} k_{12}^2 jX_{a1} + I'_{ma} k_{12}^2 R_{a1} + 2I'_{ma} k_{12}^2 jX_{a1a2} + I'_{ma} k_{12}^2 jX_{a2} + I'_{ma} k_{12}^2 R_{a2} + \\ \dot{I}_{ma} k_{12} jX_{A1a1} + \dot{I}_{ma} k_{12} jX_{A2a1} + \dot{I}_{ma} k_{12} jX_{A1a2} + \dot{I}_{ma} k_{12} jX_{A2a2} + \\ + \dot{I}'_{mak} k_{1k} k_{12} jX_{aka1} + \dot{I}'_{mak} k_{1k} k_{12} jX_{aka2}, \\ 0 = \dot{I}'_{mak} k_{1k}^2 jX_{ak} + \dot{I}'_{mak} k_{1k}^2 R_{ak} + \dot{I}_{mA} jk_{1k} X_{A1ak} + \dot{I}_{mA} jk_{1k} X_{A2ak} + \\ + \dot{I}'_{ma} k_{1k} k_{12} jX_{a1ak} + \dot{I}'_{ma} k_{1k} k_{12} jX_{a2ak}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

У схемі заміщення трансформатора зі стабілізуючими властивостями повинні бути загальні гілки з струмами $(\dot{I}'_{ma} + \dot{I}_{mA})$, $(\dot{I}'_{mak} + \dot{I}_{mA})$ та $(\dot{I}'_{ma} + \dot{I}'_{mak})$.

Для цього в першому рівнянні віднімемо і додамо вираз: $\dot{I}_{mA} k_{12} jX_{A1a1}$, $\dot{I}_{mA} k_{12} jX_{A1a2}$, $\dot{I}_{mA} k_{12} jX_{A2a1}$, $\dot{I}_{mA} k_{12} jX_{A2a2}$, $\dot{I}_{mA} k_{1k} jX_{A1ak}$, $\dot{I}_{mA} k_{1k} jX_{A2ak}$.

У другому рівнянні віднімемо і додамо вираження: $\dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a1A1}$, $\dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a2A1}$, $\dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a1A2}$, $\dot{I}'_{ma} k_{12} jX_{a2A2}$, $\dot{I}'_{ma} k_{1k} k_{12} jX_{a1ak}$, $\dot{I}'_{ma} k_{1k} k_{12} jX_{a2ak}$.

В третьому рівнянні віднімемо і додамо вираження: $\dot{I}'_{mak} k_{1k} jX_{akA1}$, $\dot{I}'_{mak} k_{1k} jX_{akA2}$, $\dot{I}'_{mak} k_{1k} k_{12} jX_{aka1}$, $\dot{I}'_{mak} k_{1k} k_{12} jX_{aka2}$.

Крім того, третє рівняння системи (3.5) представимо двома рівняннями, в результаті отримаємо нову систему (3.6) з чотирьох рівнянь для чотирьох незалежних контурів схеми заміщення фази «А» трансформатора (рис. 3.2).

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

$$\begin{aligned}
& \dot{U}_{mA} = \dot{I}_{mA} j(X_{A1} - k_{12} X_{A1a1} - k_{12} jX_{A1a2} - X_{A1ak} + X_{A1A2}) + \dot{I}_{mA} R_{A1} + \\
& \dot{I}_{mA} j(X_{A2} - k_{12} X_{A2a1} - k_{12} X_{A2a2} - X_{A2ak} + X_{A1A2}) + \dot{I}_{mA} R_{A2} + \\
& + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{a1A1} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{a2A1} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{a1A2} + \\
& + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{a2A2} + (I'_{mak} + \dot{I}_{mA}) k_{1k} jX_{akA1} + (I'_{mak} + \dot{I}_{mA}) k_{1k} jX_{akA2}, \\
& - \dot{U}'_{ma} = I'_{ma} j(k_{12}^2 X_{a1} - k_{12} X_{a1A1} - k_{12} X_{a1A2} - k_{1k} k_{12} X_{a1ak} + k_{12}^2 X_{a1a2}) + \\
& + I'_{ma} k_{12}^2 R_{a1} + \\
& I'_{ma} j(k_{12}^2 X_{a2} - k_{12} X_{a2A1} - k_{12} X_{a2A2} - k_{1k} k_{12} X_{a2ak} + k_{12}^2 X_{a2a2}) + \\
& I'_{ma} k_{12}^2 R_{a2} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{A1a1} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{A2a1} + \\
& + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{A1a2} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{12} jX_{A2a2} + \\
& + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{1k} k_{12} jX_{aka1} + (I'_{ma} + \dot{I}_{mA}) k_{1k} k_{12} jX_{aka2}, \\
& 0,5 \dot{I}'_{mak} j(k_{1k}^2 X_{ak} - k_{1k} X_{A1ak} - k_{1k} X_{A2ak} - k_{1k} k_{12} jX_{aka1} - k_{1k} k_{12} jX_{aka2}) + \\
& \dot{I}'_{mak} k_{1k}^2 R_{ak} + (I'_{mak} + \dot{I}'_{mA}) k_{1k} jX_{A1ak} + \\
& (I'_{mak} + \dot{I}'_{mA}) k_{1k} jX_{A2ak} = 0, \\
& 0,5 \dot{I}'_{mak} j(k_{1k}^2 X_{ak} - k_{1k} X_{A1ak} - k_{1k} X_{A2ak} - k_{1k} k_{12} jX_{aka1} - k_{1k} k_{12} jX_{aka2}) + \\
& 0,5 \dot{I}'_{mak} k_{1k}^2 R_{ak} + (I'_{mak} + \dot{I}'_{ma}) k_{1k} k_{12} jX_{a1ak} + \\
& (I'_{mak} + \dot{I}'_{ma}) k_{1k} k_{12} jX_{a2ak} = 0.
\end{aligned} \quad (3.6)$$

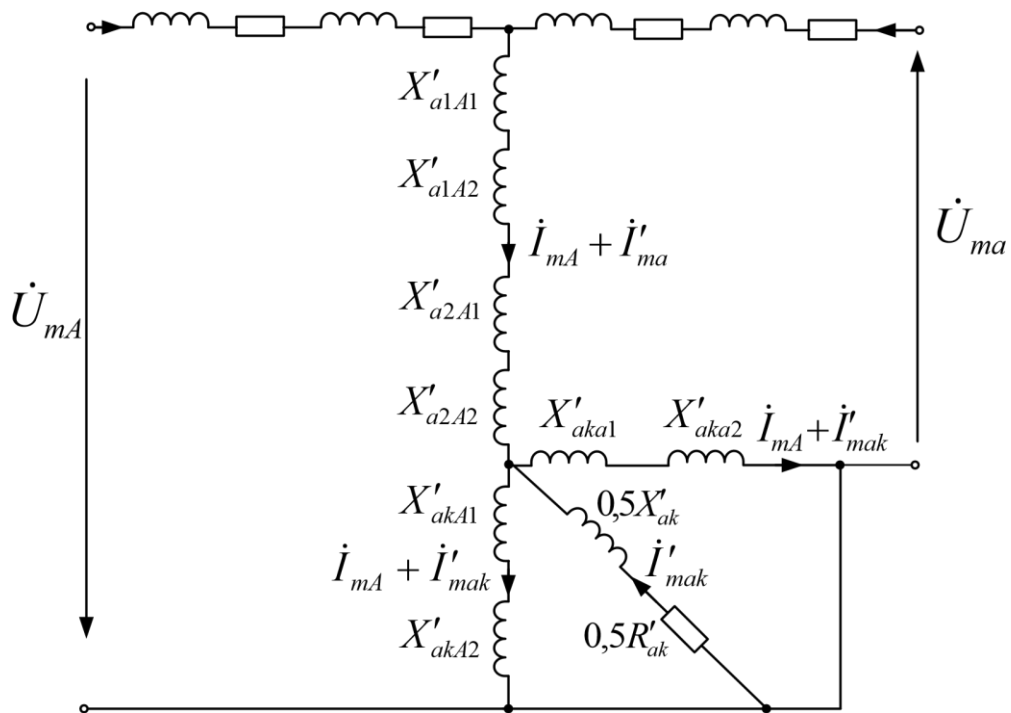


Рисунок 3.2 – Схема заміщення фази «А» трансформатора зі стабілізуючими властивостями без урахування магнітних втрат

Із системи (3.6) отримуємо вирази для опорів ланцюга. Так індуктивний опір розсіювання першої секції первинної обмотки фази «А» трансформатора визначається у вигляді:

$$X_{11} = X_{A1} - k_{12} X_{A1a1} - k_{12} X_{A1a2} - X_{A1ak} + X_{A1A2}. \quad (3.7)$$

Індуктивний опір розсіювання другої секції первинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X_{12} = X_{A2} - k_{12} X_{A2a1} - k_{12} X_{A2a2} - X_{A2ak} + X_{A1A2}. \quad (3.8)$$

Наведений взаємний індуктивний опір перших секцій первинної і вторинної обмоток фази «А» трансформатора знаходиться наступним чином:

$$X'_{a1A1} = k_{12} X_{a1A1}. \quad (3.9)$$

Наведений взаємний індуктивний опір другої секцій первинної і вторинної обмоток фази «А» трансформатора розраховується за формулою:

$$X'_{a2A2} = k_{12} X_{a2A2}. \quad (3.10)$$

Наведений взаємний індуктивний опір першої секції первинної обмотки і другої секції вторинної обмотки фази «А» визначається як:

$$X'_{a2A1} = k_{12} X_{a2A1}. \quad (3.11)$$

Наведений взаємний індуктивний опір другої секції первинної обмотки і першої секції вторинної обмотки фази «А» визначається як:

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

$$X'_{a1A2} = k_{12} X_{a1A2}. \quad (3.12)$$

Наведений взаємний індуктивний опір першої секції первинної обмотки і короткозамкненої обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X'_{akA1} = k_{1k} X_{akA1}. \quad (3.13)$$

Наведений взаємний індуктивний опір другої секції вторинної обмотки і короткозамкненої обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X'_{a1A2} = k_{1k} X_{akA2}. \quad (3.14)$$

Наведений індуктивний опір розсіювання першої секції вторинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X'_{21} = k_{12}^2 X_{a1} - k_{12} X_{a1A1} - k_{12} X_{a1A2} - k_{1k} k_{12} X_{akA1} + k_{12}^2 X_{a1a2}. \quad (3.15)$$

Наведений індуктивний опір розсіювання другої секції вторинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X'_{22} = k_{12}^2 X_{a1} - k_{12} X_{a1A1} - k_{12} X_{a1A2} - k_{1k} k_{12} X_{akA1} + k_{12}^2 X_{a1a2}. \quad (3.16)$$

Наведений активний опір першої секції вторинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$R'_{a1} = k_{12}^2 R_{a1}. \quad (3.17)$$

Наведений активний опір другої секції вторинної обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$R'_{a2} = k_{12}^2 R_{a2}. \quad (3.18)$$

Наведений індуктивний опір розсіювання короткозамкненою обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$X'_k = k_{1k}^2 X_{ak} - k_{1k} X_{akA1} - k_{1k} X_{akA2} - k_{1k} k_{12} X_{akA1} - k_{1k} k_{12} X_{akA2}. \quad (3.19)$$

Наведений активний опір короткозамкненою обмотки фази «А» трансформатора визначається як:

$$R'_{ak} = k_{1k}^2 R_{ak}. \quad (3.20)$$

Єдина схема заміщення фази «А» трансформатора з урахуванням магнітних втрат приведена на рис. 3.3. Гілки з активними результуючими струмами $(I'_{maa} + I_{mAa})$, $(I'_{maka} + I_{mAa})$ та $(I'_{maa} + I'_{maka})$ і опорами R_{aAa} , R_{akAa} і R_{akaa} відповідно відповідають за втрати в магнітопроводі фази «А» трансформатора. Гілки з реактивними результуючими струмами $(I'_{mar} + I_{mAa})$, $(I'_{makr} + I_{mAa})$ та $(I'_{mar} + I'_{makr})$ в гілках схеми відповідають за створення магнітних потоків підстержней фази «А» трансформатора.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

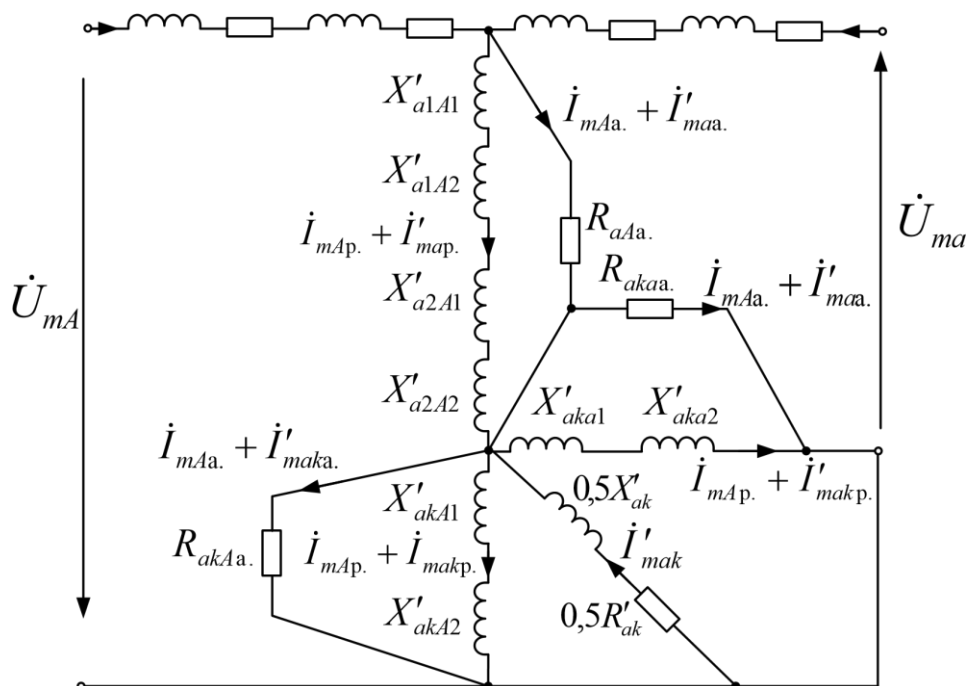


Рисунок 3.3 – Єдина схема заміщення фази «А» трансформатора зі стабілізуючими властивостями з урахуванням магнітних втрат

Спростимо єдину схему заміщення (рис. 3.3), замінивши паралельні гілки з результуючими струмами однієї, як це показано на рис. 3.4.

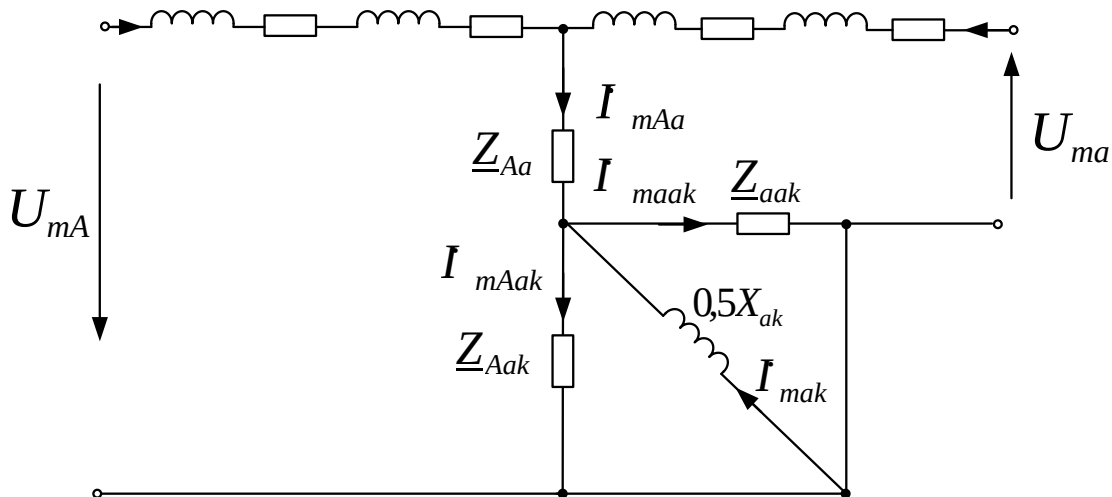


Рисунок 3.4 – Розрахункова єдина схема заміщення фази «А» трансформатора зі стабілізуючими властивостями

Так як активний опір проводів короткозамкненої обмотки багато менше, ніж активні опори проводів первинної та вторинної обмоток, то величиною R'_{ak} в єдиній схемі заміщення можна знехтувати, тоді

$$(I'_{maa} + I_{mAa}) + (I'_{map} + I_{mAp}) = I_{\Sigma mAa}, \quad (I'_{maka} + I_{mAa}) + (I'_{makp} + I_{mAp}) = I_{\Sigma mAak}, \quad (3.21)$$

та

$$(I'_{maa} + I'_{maka}) + (I'_{map} + I'_{makp}) = I_{\Sigma maak}. \quad (3.22)$$

Загальний опір гілки з струмом $I_{\Sigma mAa}$ визначається виразом:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Aa} &= \frac{j(X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})R_{aAa}}{j(X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2}) + R_{aAa}} = \\ &= \frac{R_{aAa}(X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})}{R_{aAa}^2 + (X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2} + j \frac{R_{aAa}(X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})}{R_{aAa}^2 + (X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Загальний опір гілки з струмом $I_{\Sigma mAak}$ розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{Aak} &= \frac{j(X'_{akA1} + X'_{akA2})R_{akAa}}{j(X'_{akA1} + X'_{akA2}) + R_{akAa}} = \\ &= \frac{R_{akAa}(X'_{akA1} + X'_{akA2})^2}{R_{akAa}^2 + (X'_{akA1} + X'_{akA2})^2} + j \frac{R_{akAa}^2(X'_{akA1} + X'_{akA2})}{R_{akAa}^2 + (X'_{akA1} + X'_{akA2})^2}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

а загальний опір гілки з струмом $I_{\Sigma maka}$ за формулою:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{aak} &= \frac{j(X'_{aka1} + X'_{aka2})R_{akaa}}{j(X'_{aka1} + X'_{aka2}) + R_{akaa}} = \\ &= \frac{R_{akaa}(X'_{aka1} + X'_{aka2})^2}{R_{akaa}^2 + (X'_{aka1} + X'_{aka2})^2} + j \frac{R_{akaa}^2(X'_{aka1} + X'_{aka2})}{R_{akaa}^2 + (X'_{aka1} + X'_{aka2})^2}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Результати розрахунків по визначенню додаткових властивостей розглянутого трансформатора наведені на рис. 3.5 - 3.7.

На рис. 3.5 показана картина розподілу індукції магнітного поля фази «А» трансформатора.

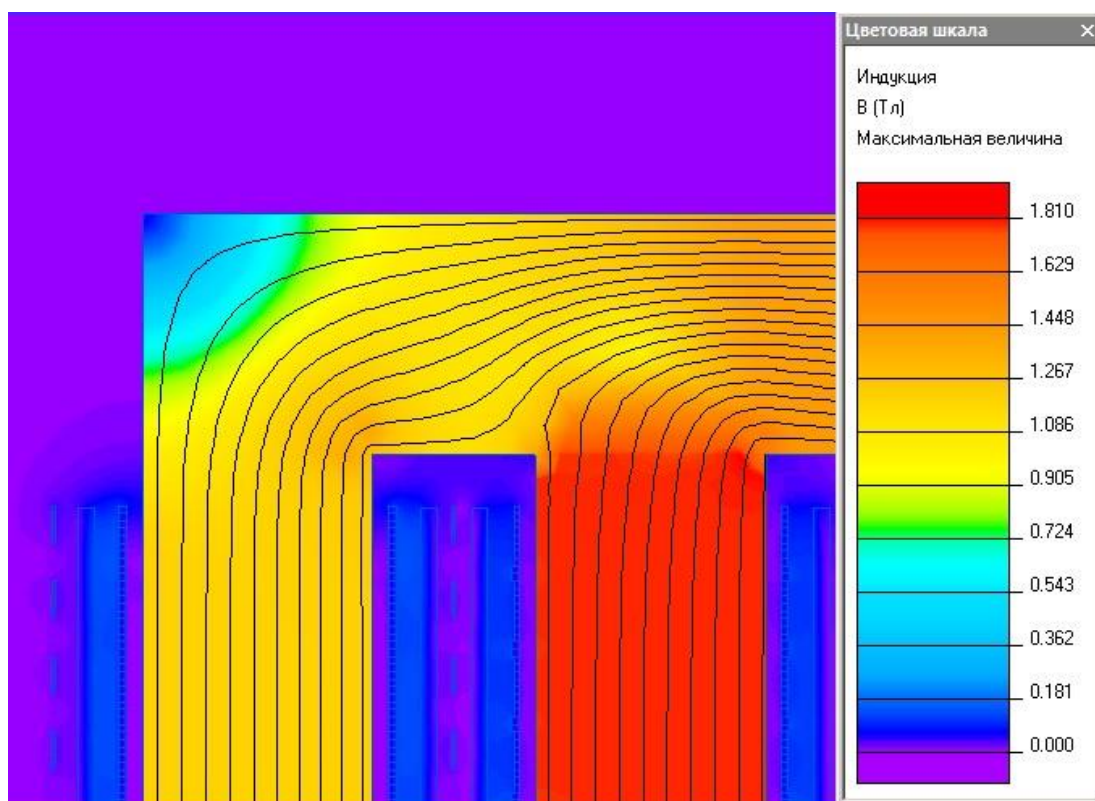


Рисунок 3.5 – Розподіл індукції магнітного поля фази «А» трансформатора зі стабілізуючими властивостями при номінальному режимі роботи.

Видно, що максимальне амплітудне значення індукції магнітного поля фази «А» спостерігається в тілі другого підстержня $B_{ma2} \approx 1,77 \div 1,8$ Тл. Амплітудне значення індукції магнітного поля першого підстержня становить всього лише $B_{ma2} \approx 1,14 \div 1,16$ Тл при амплітудном значенні індукції насичення магнітного поля для даного матеріалу $B_{ms} \approx 1,89$ Тл.

На рис. 4.6 представлена картина розподілу відносної магнітної проникності матеріалу магніторовода фази «А». Можна помітити, що відносна

магнітна проникність матеріалу першого підстержня μ_{ra1} багато більше відносної магнітної проникності матеріалу другого підстержня μ_{ra2} ($\mu_{ra1} = 2000$, $\mu_{ra2} = 220$).

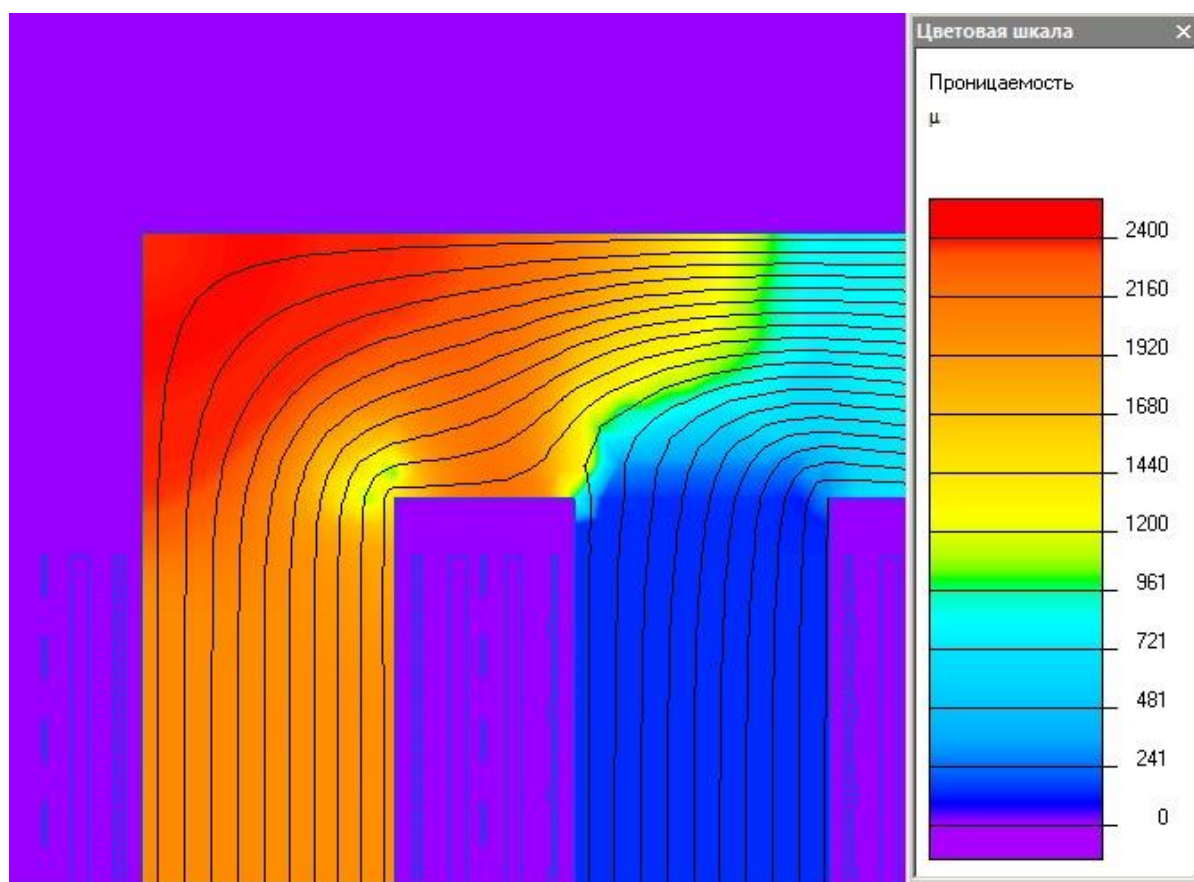


Рисунок 3.6 – Розподіл відносної магнітної проникності матеріалу магнітопровода фази «А» трансформатора зі стабілізуючими властивостями при номінальному режимі роботи

Тобто матеріал другого підстержня знаходиться ближче до стану магнітного насичення, ніж матеріал першого підстержня, що підтверджує раніше зроблені висновки по прояву стабілізуючого ефекту.

Тепер зупинимося на важливої експлуатаційної характеристики трансформатора - зміні напруги трансформатора (ΔU_a). Зміна напруги трансформатора - це арифметична різниця між вторинною напругою трансформатора при холостому ході і при номінальному струмі навантаження,

коли первинна напруга постійна і дорівнює номінальній, а частота також є сталою і дорівнює номінальній.

В результаті чисельного розрахунку отримано графік залежності $\Delta U_a(\varphi_a)$, Наведений на рис. 3.7, де φ_a - зсув по фазі між першими гармоніками напруги і струму вторинної обмотки фази «А» трансформатора.

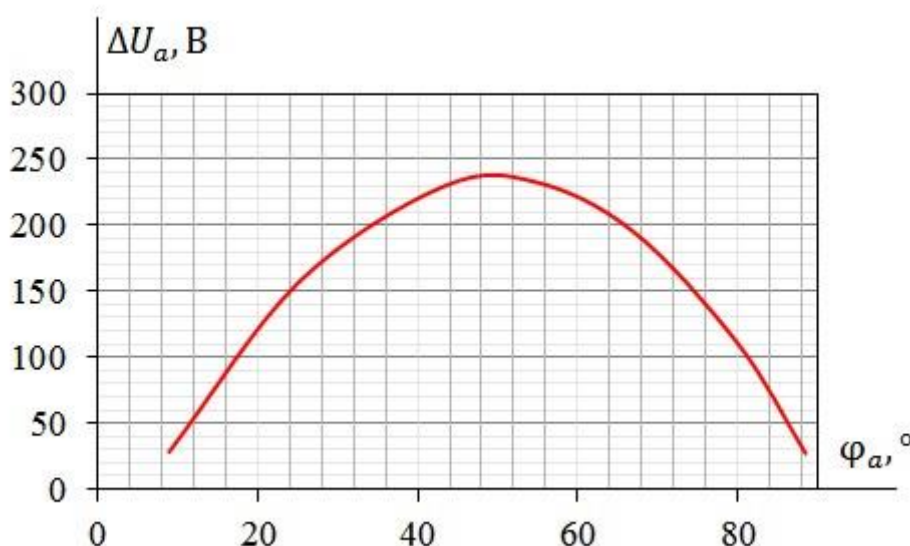


Рисунок 3.7 – Залежність зміни напруги вторинної обмотки фази «А» трансформатора від характеру навантаження

Залежність має вигляд параболи, максимум якої спостерігається при $\varphi_a = 45$. Як видно при чисто активному навантаженні ($\varphi_a \rightarrow 0$) і чисто індуктивному навантаженні ($\varphi_a \rightarrow 90$) зміна падіння напруги вторинної обмотки мінімальна ($\Delta U_a < 50 \text{ В}$). Це означає, що стабілізуючий ефект максимального проявляється, якщо до вторинної обмотки трансформатора підключено або активне навантаження, або активно-індуктивне, при цьому зсув по фазі між струмом і напругою склав би не більше 6 електричних градусів.

У результаті досліджень математичної моделі трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями були отримані для активного навантаження ($\varphi_a = 0$).

3.2 Дослідження режиму холостого ходу трансформатора зі стабілізуючими властивостями

Припустимо, що до первинних обмоток трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями підключено синусоїдальна напруга.

Потужність первинної обмотки фази «А», що визначається більшою мірою магнітними втратами, що виникають в результаті перемагнічування матеріалу його магнітопровода, а також в результаті протікання вихрових струмів в тілі шихтованих пластин, в розрахунковій схемі заміщення на рис. 3.4 знаходиться за формулою:

$$P_A = I_{\sum mAa}^2 \frac{R_{aAa} (X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2}{R_{aAa}^2 + (X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2} =$$

$$+ I_{\sum mAak}^2 \frac{R_{akAa} (X'_{akA1} + X'_{akA2})^2}{R_{akAa}^2 + (X'_{akA1} + X'_{akA2})^2} +$$

$$+ I_{\sum maak}^2 \frac{R_{akaa} (X'_{aka1} + X'_{aka2})^2}{R_{akaa}^2 + (X'_{aka1} + X'_{aka2})^2}. \quad (3.26)$$

З іншого боку, в режимі холостого ходу трансформатора активна потужність первинної обмотки фази «А» трансформатора дорівнює

$$P_{A0} = U_{A0} I_{A0} \cos \varphi_{a0}, \quad (3.27)$$

де U_{A0} - діюче значення напруги первинної обмотки фази «А» трансформатора;

I_{A0} - діюче значення струму первинної обмотки трансформатора;

φ_{a0} - зсув по фазі між першими гармоніками напруги і струму первинної обмотки трансформатора.

Активна потужність короткозамкненої обмотки фази «А» трансформатора визначається за формулою:

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

$$P_{ak0} = E_{ak0} I_{ak0} \cos \varphi_{ak0}, \quad (3.28)$$

де E_{ak0} - діюче значення електрорушійної сили, індукційній в короткозамкненій обмотці фази «А» трансформатора;

I_{ak0} - діюче значення струму короткозамкненої обмотки фази «А» трансформатора;

φ_{ak0} - зсув по фазі між першими гармоніками струму і електрорушійною силою короткозамкненої обмотки фази «А» трансформатора.

Активна потужність вторинної обмотки фази «А» P_{a0} при відсутності струму, що протікає у вторинній обмотки дорівнює нулю. Було проведено чисельний розрахунок магнітного поля трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями, результати якого представлені на рис. 3.8 і 3.9.

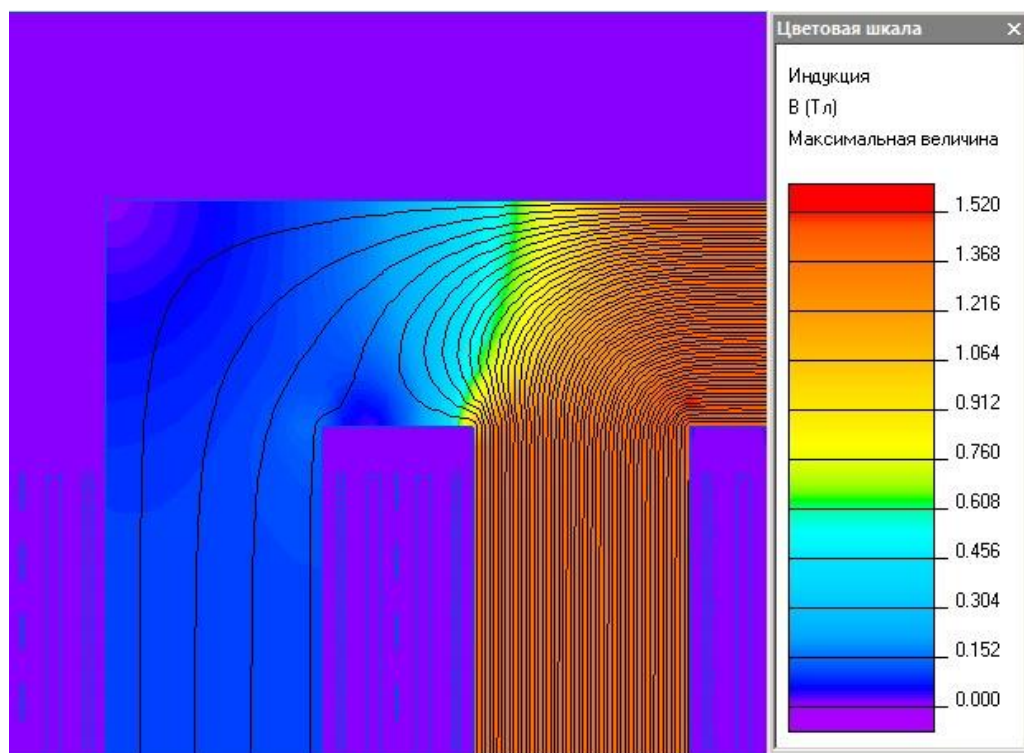


Рисунок 3.8 – Розподіл індукції магнітного поля фази «А» в режимі холостого ходу трансформатора

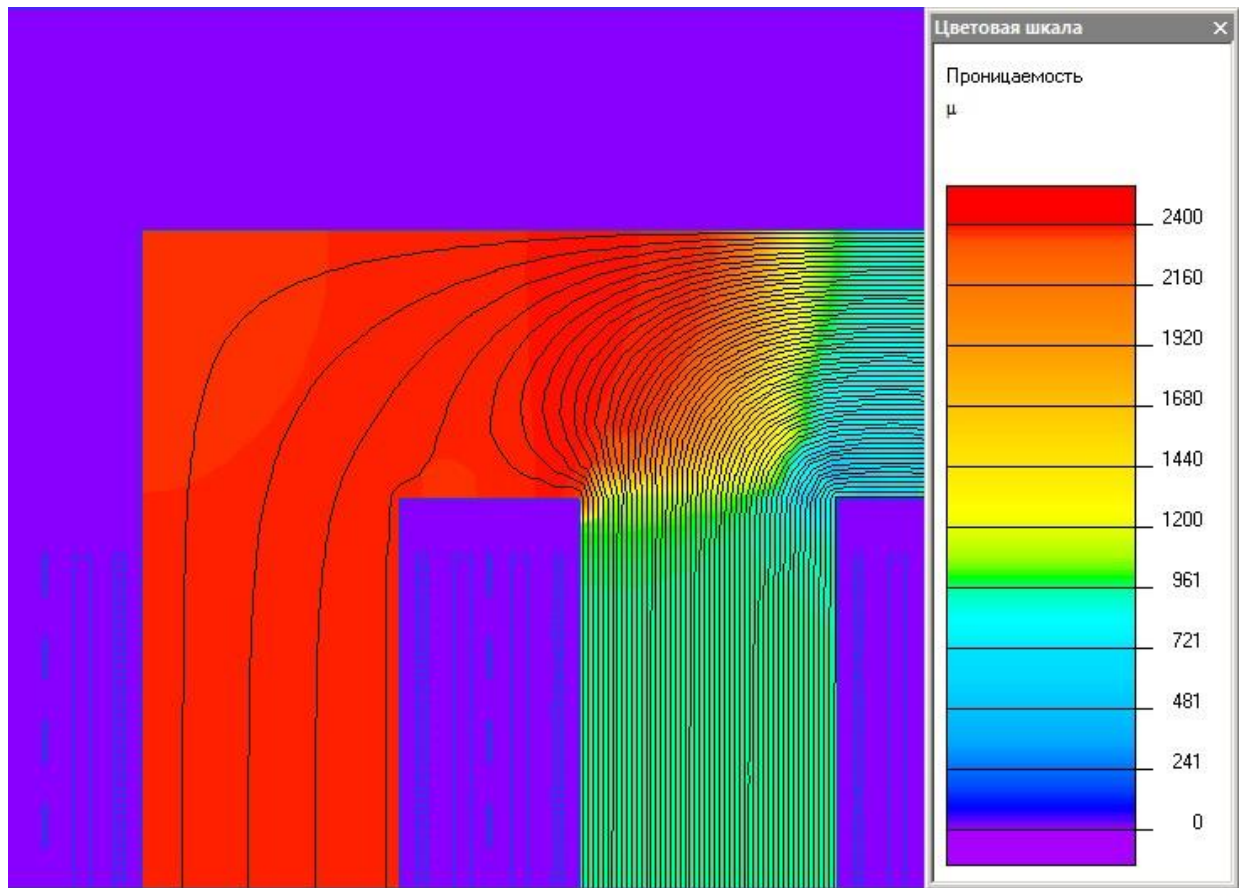


Рисунок 3.9 – Розподіл відносної магнітної проникності матеріалу магнітопровода фази «А» в режимі холостого ходу

На рис. 3.8 амплітудне значення індукції магнітного поля першого підстержня фази «А» становить $B_{ma1} = 0,1$ Тл, а другого підстержня - $B_{ma2} = 1,38$ Тл.

На рис. 3.9 значення відносної магнітної проникності матеріалу першого підстержня становить $\mu_{ra1} = 2400$, а другого підстержня - $\mu_{ra1} = 950$. Ці факти свідчать про розмагнічуючу дію короткозамкненої обмотки.

При неврахуванні потоків розсіювання, зчеплених з витками секцій первинної і вторинної обмоток, а також з витками короткозамкненої обмотки, через їх малості, значеннями $X_{11}, X_{12}, X'_{21}, X'_{22}, X'_{ak}$ можна знехтувати. Активними опорами секцій первинної обмотки R_{A1}, R_{A2} також нехтуємо.

В результаті чисельного розрахунку встановлено $E_{ak0} = 91,56$ В, $I_{ak0} = 291,45$ А і $\cos \varphi_{ak0} = 0,04$. Для цих значень $P_{ak0} = 1\,204$ Вт, що становить не більше 7% від P_{A0} , що дозволяє її не враховувати.

Таким чином, активна потужність первинної обмотки фази «А» трансформатора при холостому ході приблизно визначається як:

$$P_{A0} \approx I_{\sum mA}^2 \frac{R_{aAa} (X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2}{R_{aAa}^2 + (X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2}. \quad (3.29)$$

Так як $R_{aAa} \gg X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2}$, тоді

$$P_{A0} \approx I_{\sum mA}^2 \frac{(X'_{a1A1} + X'_{a1A2} + X'_{a2A1} + X'_{a2A2})^2}{R_{aAa}}. \quad (3.30)$$

У формулі (3.30) $I_{\sum mA}$ можна розглядати як діюче значення струму холостого ходу фази «А» трансформатора.

В ході розрахунків отримані характеристики холостого ходу трансформатора для фази «А». На рис. 3.10 представлена залежність струму первинної обмотки від напруги первинної обмотки фази «А» $I_{A0}(U_{A0})$, А на рис. 3.11 представлена залежність зсуву по фазі між першими гармоніками струму і напруги первинної обмотки від напруги первинної обмотки фази «А».

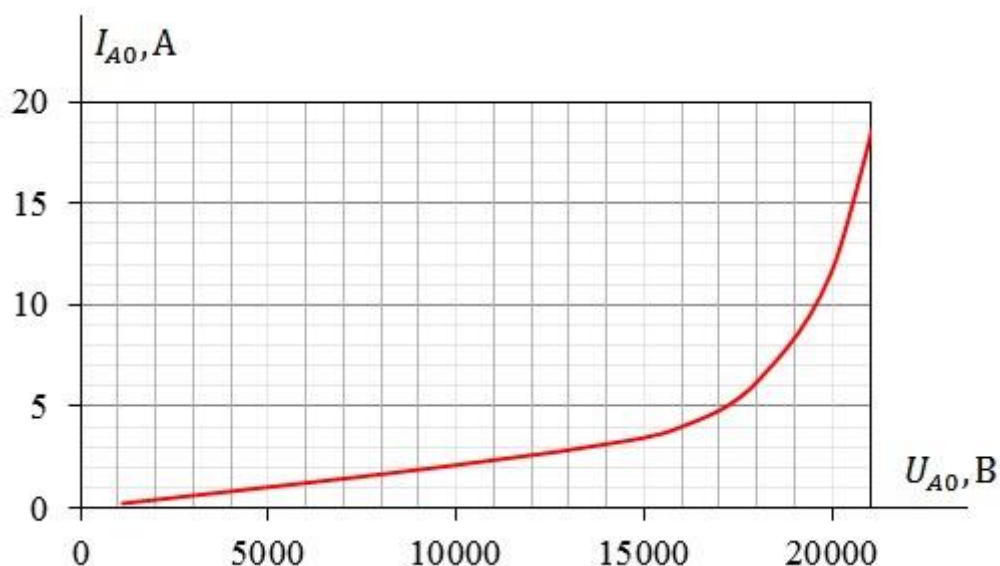


Рисунок 3.10 – Характеристика холостого ходу фази «А» трифазного трансформатора

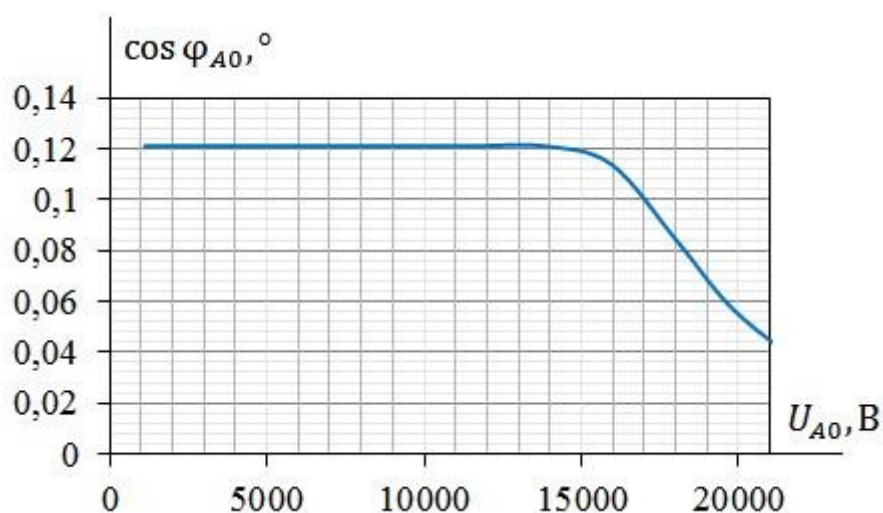


Рисунок 3.11 – Характеристика холостого ходу фази «А» трифазного трансформатора

З урахуванням отриманих згаданих кривих і формули (3.27) був отриманий графік залежності активної потужності фази «А» трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями від напруги первинної обмотки (рис. 3.12).

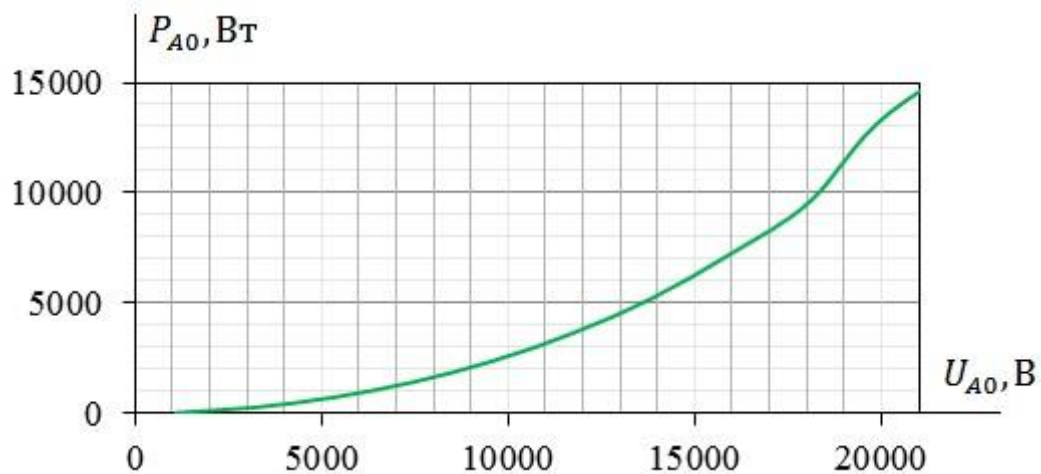


Рисунок 3.12 – Характеристика холостого ходу фази «А» трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями

При номінальному чинному значенні напруги первинної обмотки фази «А» $U_{A0} = 20207$ струм первинної обмотки становить $I_{A0} = 12,82$ А. При цьому потужність холостого ходу трансформатора дорівнює $P_0 = 3P_{A0} = 40837,67$ Вт.

Струм короткозамкненої обмотки, який надає розмагнічуючу дію, знижує магнітний потік в першому підстержні і збільшує магнітний потік в другому підстержні таким чином, що результуючий магнітний потік підстержня, викликаний струмом первинної обмотки трансформатора практично не змінюється, $\dot{\Phi}_{0m1} + \dot{\Phi}_{0m2} = \dot{\Phi}_{0mA} \approx \text{const.}$

В результаті розрахунку магнітного поля фази трансформатора без короткозамкненої обмотки отримані картини індукції магнітного поля і проникності матеріалів підстержней фази «А» (рис. 3.13 і 3.14). Крім того встановлено, що струм холостого ходу трансформатора без урахування розмагнічуючого струму короткозамкненої обмотки становить $I_{A0} \approx 11$ А.

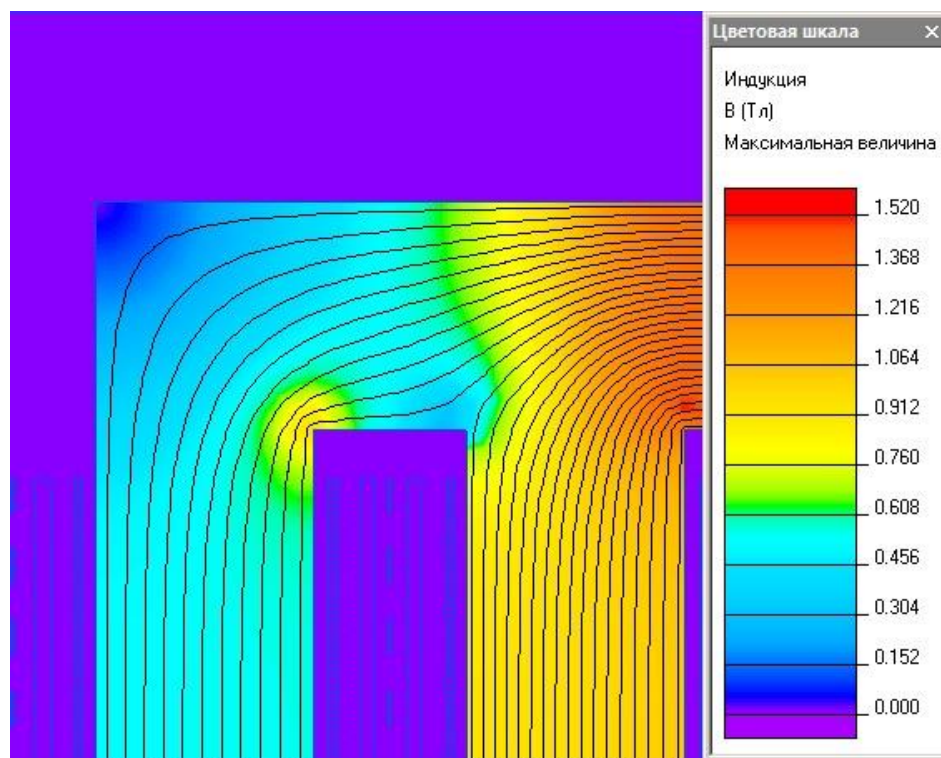


Рисунок 3.13 – Розподіл індукції магнітного поля фази «А» в режимі холостого ходу трансформатора без урахування розмагнічуючої дії струму короткозамкненої обмотки

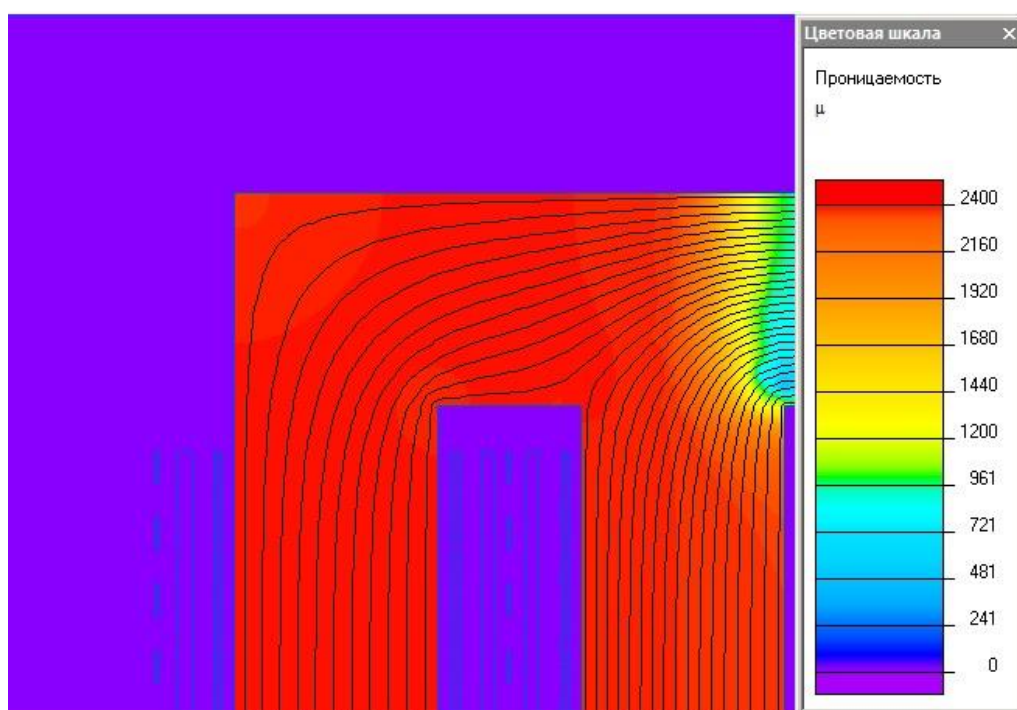


Рисунок 3.14 – Розподіл відносної магнітної проникності матеріалу магнітопровода фази «А» в режимі холостого ходу без урахування розмагнічуючої дії струму короткозамкненої обмотки

Таким чином, в режимі холостого ходу трифазний трансформатор з додатковою короткозамкненою обмоткою можна розглядати як стандартний двохобмотувальний трифазний, активна потужність первинної обмотки якого йде на компенсацію магнітних втрат в матеріалі підстержней. Це дає можливість визначати значення параметрів намагнічуючого ланцюга трансформатора з дослідження холостого ходу.

3.3 Дослідження режиму короткого замикання трансформатора зістабілізуючими властивостями

Як відомо, режим короткого замикання трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями являє собою режим його роботи, при якому його вторинні обмотки замикаються накоротко, а до первинних обмоток підводиться така знижена напруга, при якій значення струмів первинних обмоток знаходиться в межах номінальних значень.

В результаті чисельного розрахунку магнітного поля трифазного трансформатора отримана картина поля для фази «А», представлена на рис. 3.15, з якої видно, що амплітудне значення індукції магнітного поля першого підстержня становить $B_{ma1} = 1,2$ Тл, другого підстержня $B_{ma1} = 1,72$ Тл.

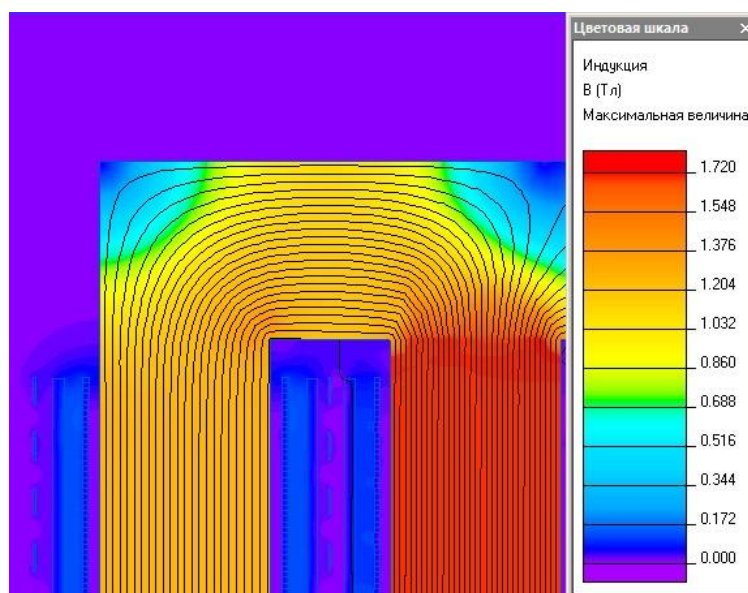


Рисунок 3.15 – Розподіл індукції магнітного поля фази «А» в режимі короткого замикання

На рис. 3.16 показана картина відносної магнітної проникності матеріалів підстержей фази «А». Видно, що відносна магнітна проникність матеріалу першого підстержня становить $\mu_{ra1} = 1920$ Тл, другого підстержня - $\mu_{ra1} = 200$. Тобто магнітне поле трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом в режимі короткого замикання незначно відрізняється від магнітного поля в номінальному режимі.

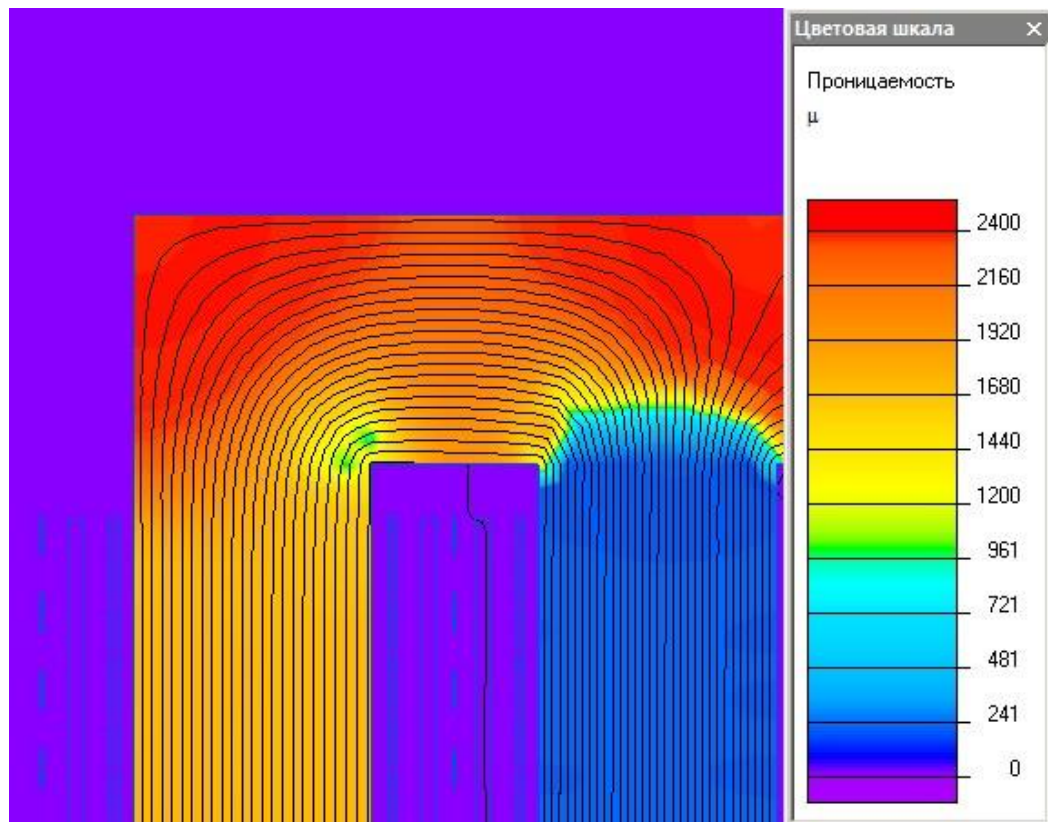


Рисунок 3.16 – Розподіл відносної магнітної проникності матеріалу магнітопровода фази «А» в режимі короткого замикання

В результаті чисельного розрахунку трифазного трансформатора отримані характеристики короткого замикання (рис. 3.17 - 3.19). На рис. 3.17 наведена залежність струму первинної обмотки від напруги первинної обмотки.

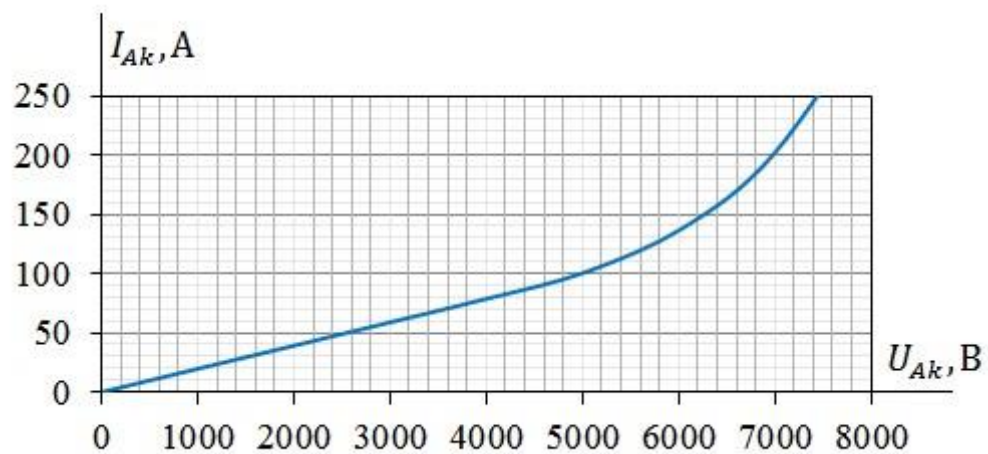


Рисунок 3.17 – Характеристика короткого замикання фази «А» трансформатора.

При номінальному значенні струму $I_{Ak} = 213 \text{ A}$, напруга первинної обмотки фази «А» $U_{Ak} = 7100 \text{ В}$, що становить $u_k = 35,1\%$ від номінального значення напруги первинної обмотки трансформатора, для силових трансформаторів подібного класу потужності напруга $u_k = 8\%$. Це означає, що потоки розсіювання в стабілізуючому трансформаторі більше, ніж в типовому трифазному.

Значення $\cos \varphi_{Ak}$ при збільшенні напруги первинної обмотки фази «А» не змінюється і становить 0,031 (рис. 3.18).

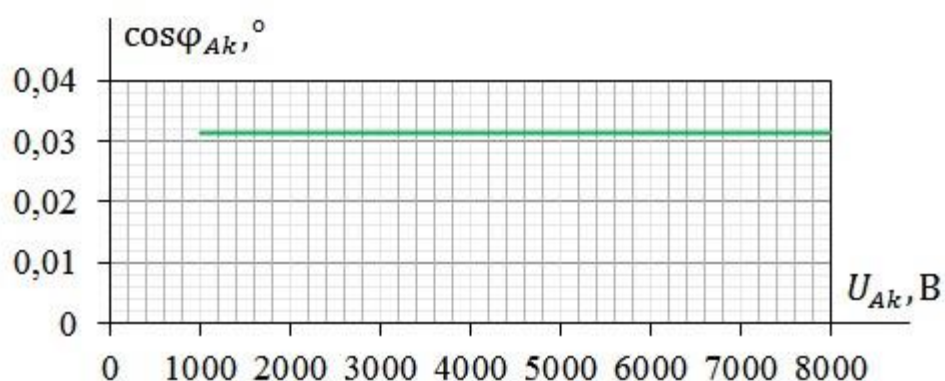


Рисунок 3.18 – Характеристика короткого замикання фази «А» трансформатора

Активна потужність первинної обмотки трансформатора в режимі короткого замикання визначається за формулою:

$$P_{Ak} = U_{Ak} I_{Ak} \cos \varphi_{Ak}, \quad (3.31)$$

де U_{Ak} - діюче значення напруги первинної обмотки фази «А» трансформатора в режимі короткого замикання;

I_{Ak} - діюче значення струму первинної обмотки первинної обмотки фази «А» трансформатора в режимі короткого замикання;

φ_{Ak} - зсув по фазі між першими гармоніками напруги і струму первинної обмотки трансформатора в режимі короткого замикання.

Результати розрахунку за формулою (3.31) дані на рис. 3.19, активна потужність первинної обмотки фази «А» трансформатора при $I_{Ak} = 213$ А становить $P_{Ak} = 46881,3$ Вт. Активна потужність короткозамкненої обмотки фази «А» P_{Akk} становить лише 2,6% від P_{Ak} , і P_{Akk} можна знехтувати.

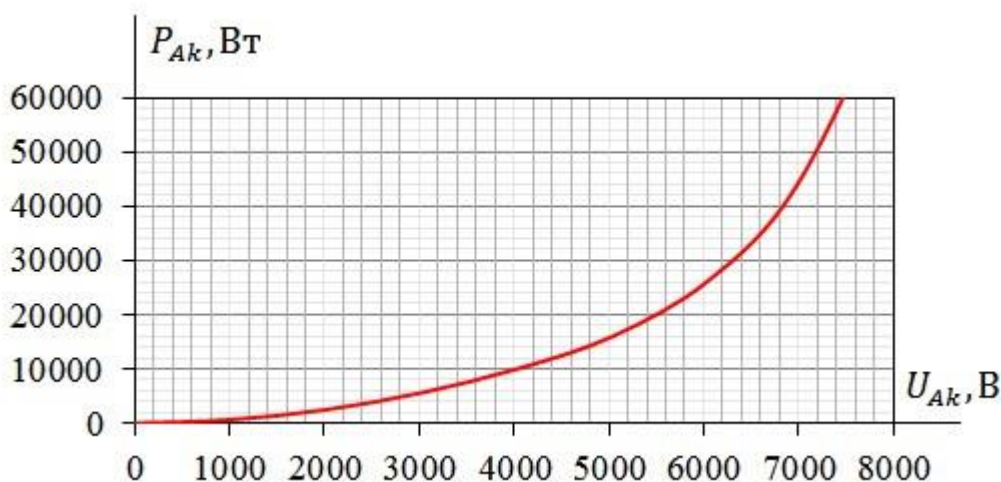


Рисунок 3.19 – Характеристика короткого замикання фази «А» трансформатора

Проаналізуємо єдину схему заміщення фази «А» в режимі короткого замикання трифазного трансформатора (рис. 3.20).

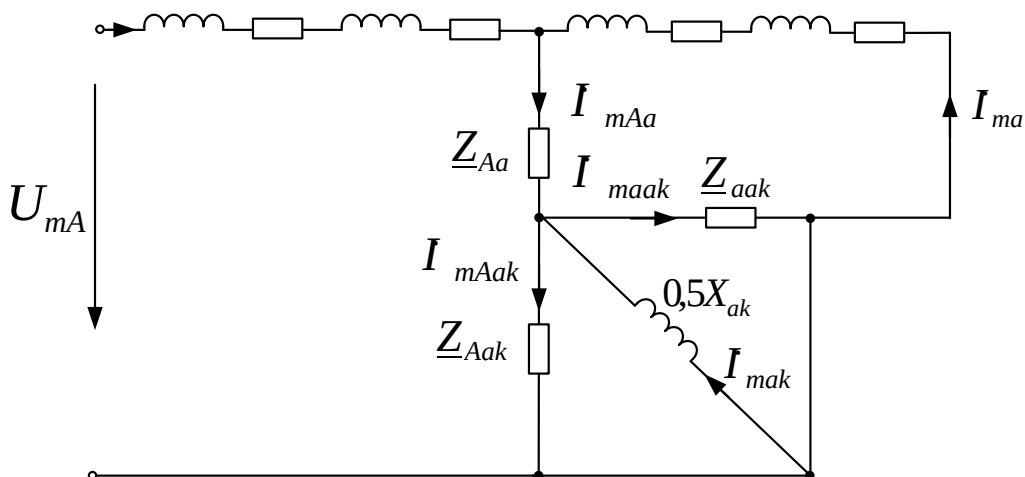


Рисунок 3.20 – Схема заміщення фази «А» трифазного трансформатора в режимі короткого замикання

Замкнув накоротко вторинну обмотку трансформатора, знайдемо повний електричний опір фази «А» трифазного трансформатора зі стабілізуючими властивостями:

$$Z_A = \frac{\underline{Z}_{Aa} + \frac{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak}\underline{Z}_{Aak}}{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak} + 0,5\underline{Z}_{Aak}jX'_{ak} + \underline{Z}_{aak}\underline{Z}_{Aak}}(R'_{a1} + R'_{a2} + j(X'_{21} + X'_{22}))}{\underline{Z}_{Aa} + \frac{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak}\underline{Z}_{Aak}}{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak} + 0,5\underline{Z}_{Aak}jX'_{ak} + \underline{Z}_{aak}\underline{Z}_{Aak}} + R'_{a1} + R'_{a2} + j(X'_{21} + X'_{22})} + \frac{R_{A1} + R_{A2} + j(X_{11} + X_{12})}{R'_{a1} + R'_{a2} + j(X'_{21} + X'_{22})}. \quad (3.32)$$

Так як магнітні потоки підстержней набагато більше потоків розсіювання, зчеплених з витками секцій первинної і вторинної обмоток, а також з витками короткозамкненої обмотки, вважаємо, що

$$\underline{Z}_{Aa} + \frac{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak}\underline{Z}_{Aak}}{0,5\underline{Z}_{aak}jX'_{ak} + 0,5\underline{Z}_{Aak}jX'_{ak} + \underline{Z}_{aak}\underline{Z}_{Aak}} \gg R'_{a1} + R'_{a2} + j(X'_{21} + X'_{22}), \quad (3.33)$$

тоді вираз для визначення $\underline{Z}_A$ має вигляд:

$$\underline{Z}_A \approx R_{A1} + R_{A2} + j(X_{11} + X_{12}) + R'_{a1} + R'_{a2} + j(X'_{21} + X'_{22}). \quad (3.34)$$

Тобто в режимі короткого замикання трифазного трансформатора активна електрична потужність, також як і в силовому двообмотковому трансформаторі визначається втратами в проводах секцій первинної і вторинної обмоток.

Результати розрахунку магнітного поля фази «А» трифазного трансформатора без додаткової короткозамкненої обмотки приведені на рис. 3.21 і 3.22.

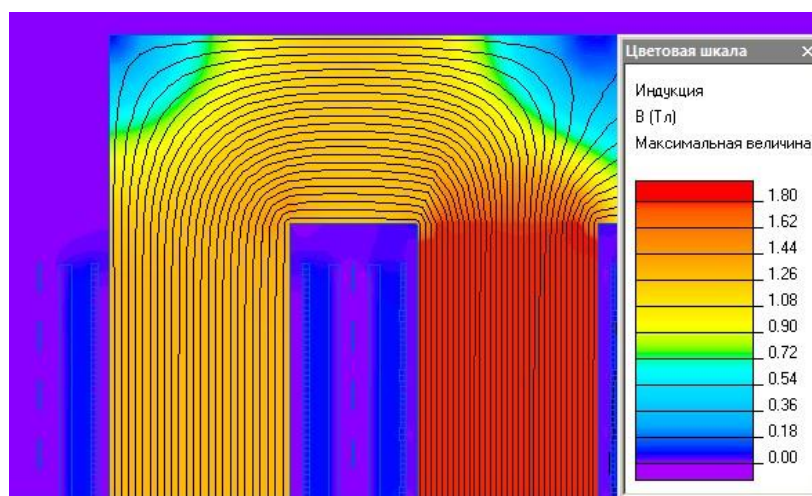


Рисунок 3.21 – Розподіл індукції магнітного поля фази «А» в режимі короткого замикання без урахування короткозамкненої обмотки

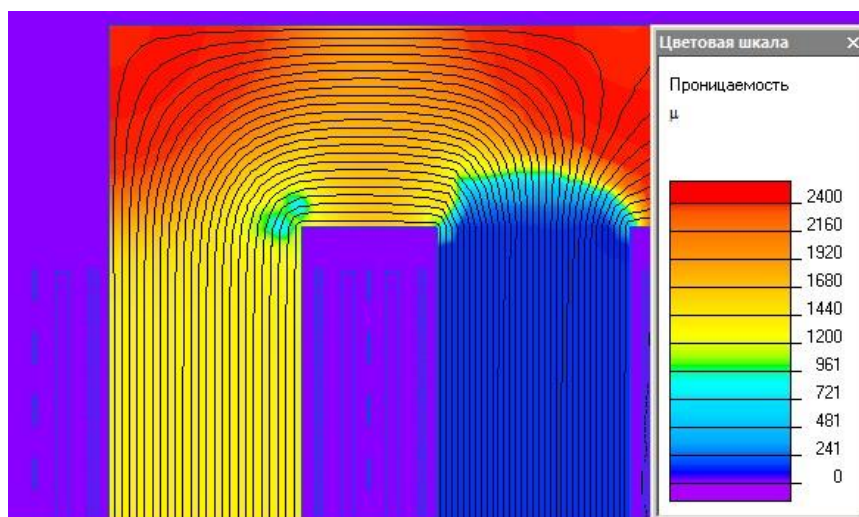


Рисунок 3.22 – Розподіл відносної магнітної проникності матеріалу магнітопровода фази «А» в режимі короткого замикання без урахування короткозамкненої обмотки

З картин поля видно, що амплітудне значення індукції магнітного поля першого підстержня становить $B_{ma1} = 1,2$ Тл, другого підстержня - $B_{ma2} = 1,8$ Тл. При таких значеннях індукції відносна магнітна проникність матеріалу першого підстержня дорівнює $\mu_{ra1} = 1200$, а другого підстержня - $\mu_{ra1} = 200$.

Таким чином, картина магнітного поля трансформатора з короткозамкненими витками в режимі короткого замикання незначно відрізняється від картини поля трансформатора без них.

Коефіцієнт навантаження трансформатора, розрахований $P_0 = P_{Fe} = 40837,65$ Вт і $P_k = P_{Cu} = 140643,9$ Вт, становить $k_{\eta} = 0,54$.

Коефіцієнт корисної дії при номінальній потужності трифазного трансформатора $S_{mp.n} = 12124200$ ВА дорівнює $\eta = 0,99$, це значення збігається зі значенням, отриманим в результаті електромагнітного розрахунку трансформатора в 3 главі.

3.4 Деякі результати досліджень випрямляча трансформаторно-випрямного агрегату

Трансформаторно-випрямний агрегат тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ повинен забезпечувати стабілізацію напруги на шинах живильної підстанції та витримувати великі струмові перевантаження.

Надійність агрегату визначається умовами його роботи (характером зміни випрямленого струму тягової підстанції, завантаженістю електрифікованої ділянки), а також параметрами, що входять до його складу пристроїв, серед яких особливе місце займає випрямна установка, причому надійність випрямляча, виконаного на діодах вище, ніж на керованих напівпровідникових приладах. Серед схем випрямлення, побудованих на діодах, найбільш ефективними вважаються 6-ти і 12ти пульсові схеми. Переваги 12-типульсових схем:

- отримання менших пульсацій випрямленої напруги;
- зниження вищих гармонік струмів первинних і вторинних обмоток трансформатора;

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- високий коефіцієнт використання трансформатора $k_p = 0,97$.

Дванадцятипульсові схеми поділяють на еквівалентні і власні схеми. Для реалізації і тих, і інших використовуються дві послідовно з'єднані 6-ти пульсові мостові схеми випрямлення, при цьому в якості перетворювача змінної напруги в змінну напругу меншого значення може виступати як один триобмотковий трансформатор, так і група з двох двообмоткових трансформаторів [9].

Шестипульсові ж випрямні схеми підключаються безпосередньо до вторинних обмоток трансформатора. До переваг таких схем також можна віднести досить високий коефіцієнт $k_p = 0,95$, але пульсації випрямленої напруги більше, ніж в 12-типульсовій схемі випрямлення.

Трансформаторно-випрямний агрегат згідно своєї конструкції містить тільки один двообмотувальний трифазний трансформатор. Це означає, що в якості випрямної частини агрегату слід використовувати 6-типульсову схему.

Відома паралельна шестипульсова схема блоку тягового випрямляча типу БЛ-В-ТПП-3,15к-3,3к УХЛ4, що виготовляється в ТОВ «НПЕФА-ЕНЕРГО». Перевага паралельної шестипульсової схеми в порівнянні зі звичайною шестипульсовою - збільшення вихідних параметрів по струму, потужності і напрузі.

Характеристики схеми:

- номінальне середнє значення випрямленої напруги - 3,3 кВ;
- номінальне середнє значення випрямленого струму - 3,15 кА;
- коефіцієнт корисної дії тягового випрямляча в номінальному режимі роботи - 99,5%.

На рис. 3.23 наведена схема трансформаторно-випрямного агрегату тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ, на схемі: 1- стабілізуючий трансформатор, 2- паралельна шестипульсова схема випрямлення, VD1-VD24 - напівпровідникові прилади, i_d - миттєве значення випрямленого струму агрегату, u_d - миттєве значення випрямленої напруги агрегату.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки в роботі мова йде про підтримку рівня напруги контактної мережі (в точці її приєднання до живильної підстанції постійного струму) на заданому рівні, тому необхідно оцінити вплив трифазного трансформатора на стабілізуючу функцію агрегату. Для цього досліджуємо зовнішню характеристику $U_d(I_d)$ трансформаторно-випрямного агрегату.

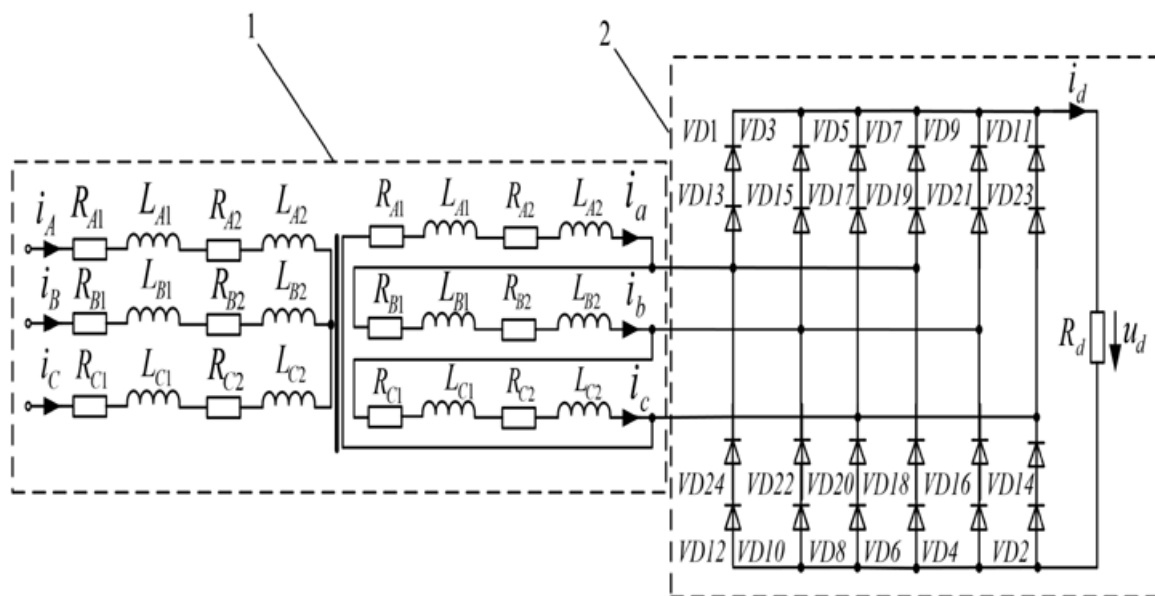


Рисунок 3.23 – Схема трансформаторно-випрямного агрегату тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ

Середнє значення випрямленої напруги шестипульсової схеми випрямлення визначається за формулою:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{+\frac{\pi}{6}} U_{ma} \cos(\omega t + \psi_{U_{ma}}) d\omega t, \quad (3.35)$$

$\psi_{U_{ma}}$ - початкова фаза напруги вторинної обмотки трансформатора.

З (3.35) отримуємо остаточний вираз для U_d в загальному вигляді:

$$U_d = U_{ma} \cos(\psi_{U_{ma}}). \quad (3.36)$$

З (3.36) випливає, що середнє значення випрямленої напруги буде визначатися не тільки амплітудою напруги вторинної обмотки трансформатора, а й початковою фазою $\psi_{U_{ma}}$ напруги U_{ma} .

На рис. 3.24 представлена зовнішня характеристика трифазного стабілізуючого трансформатора з секціонованими первинними і вторинними обмотками і короткозамкненою обмоткою (результати чисельного розрахунку п.2.3 другого розділу). Номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора становить $U_{ma} = 3715$ В при номінальному струмі $I_{ma} = 2000$ А.

При збільшенні струму I_{ma} більш ніж в 1,4 рази напруга U_{ma} зменшується на 20 В.

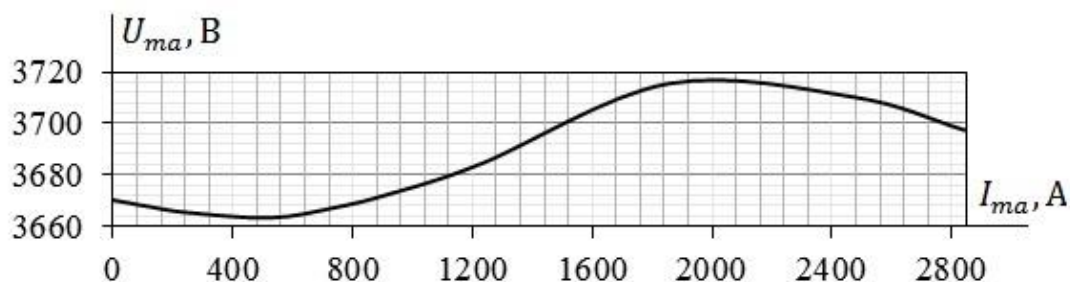


Рисунок 3.24 – Зовнішня характеристика трансформатора із стабілізуючим ефектом

На рис. 3.25 представлений графік залежності $\psi_{U_{ma}}(I_{ma})$. Зі збільшенням струму I_{ma} початкова фаза $\psi_{U_{ma}}$ змінюється нелінійно і при $I_{ma} = 2000$ А $\psi_{U_{ma}}$ становить 20 електричних градусів.

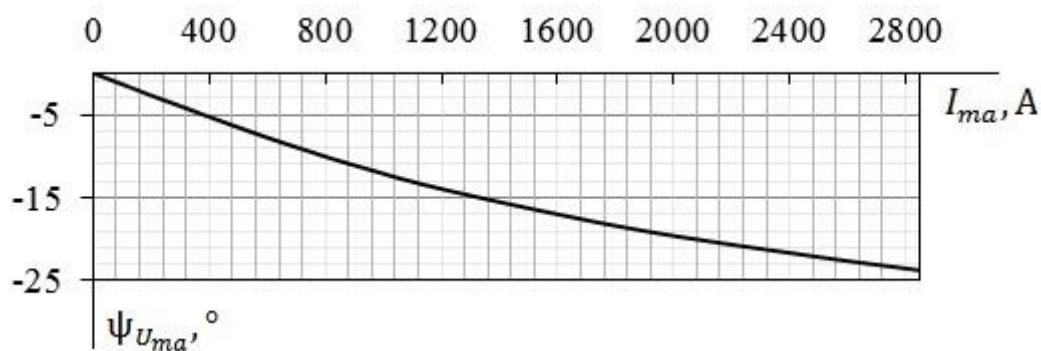


Рисунок 3.25 – Залежність початкової фази $\psi_{U_{ma}}$ від струму I_{ma}

Середнє значення випрямленого струму тягової підстанції визначається як $I_d = \frac{3}{2} I_{ma}$. В результаті розрахунків для U_d і I_d отримана зовнішня характеристика трансформаторно-випрямного агрегату з урахуванням електричних і магнітних втрат в трансформаторі, втрати у випрямлячі не враховувалися (рис. 3.26).

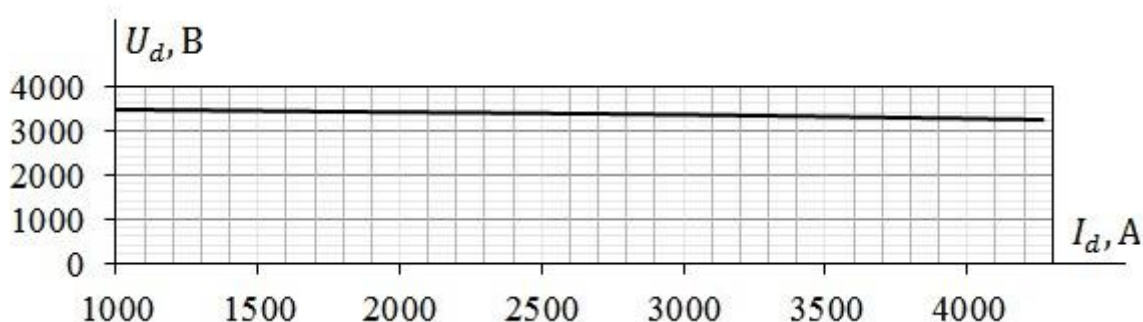


Рисунок 3.26 – Зовнішня характеристика трансформаторно-випрямного агрегату тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ

Згідно рис. 3.26 при $U_d = 3300$ кВ середнє значення випрямленого струму підстанції становить $I_d = 3200$ А. При збільшенні струму I_d більш ніж в 1,4 рази напруга контактної мережі (в точці її приєднання до шин живильної підстанції) знижується на 67 В.

Таким чином, зменшення фазної напруги вторинної обмотки стабілізуючого трансформатора на 0,54% відповідає зниженню рівня напруги на шинах живильної підстанції 3,3 кВ не більше ніж на 2% при зміні тягового струму більш ніж в 1,4 рази, цей факт підтверджує стабілізуючі властивості трансформаторно-випрямного агрегату підстанції постійного струму 3,3 кВ.

Висновки по 3 розділу

1. Побудовано математичну модель фази трансформатора зі стабілізуючими властивостями, в основі якої лежить система з чотирьох рівнянь, складених за I і II законами Кірхгофа для чотирьох незалежних контурів єдиної схеми заміщення фази.

2. В результаті розрахункових досліджень номінального режиму, режиму холостого ходу і короткого замикання встановлено, що особливості конструкції трансформатора, відповідальні за прояв його стабілізуючих властивостей, призводять в порівнянні з трансформаторами традиційного виконання до збільшення значення струму холостого ходу (через насичення одного з двох підстержней, що належать до однієї фази) і напруги короткого замикання (через збільшення потоків розсіювання).

3. З позиції отримання мінімального значення зміни напруги більш сприятливими є режими роботи з навантаженням активного або активно-індуктивного характеру.

4. Зміни в конструкції трансформатора не є перешкодою для отримання прийнятних значень коефіцієнта навантаження (наприклад, $k_{нз} = 0,54$ для розрахованого трансформатора) і коефіцієнта корисної дії (наприклад, $\eta = 99\%$ для розрахованого трансформатора).

5. Результати електромагнітного розрахунку трифазного трансформатора практично збігаються з результатами математичного моделювання.

6. Робота випрямляча практично не погіршує стабілізуючі властивості трансформаторно-випрямного агрегату.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі розроблено та досліджено трансформаторно-випрямний агрегат тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ, що дозволяє підтримувати напругу контактної мережі на заданому рівні при струмових перевантаженнях. Трифазний трансформатор, що входить до його складу, має принципово нову конструкцію і володіє стабілізуючими властивостями.

У процесі досліджень отримані наступні результати:

1. Розроблено конструкцію трансформатора з розщепленими стрижнями, секціонованими первинними і вторинними обмотками і короткозамкненою обмоткою.
2. Теоретично обґрунтований і досліджений спосіб стабілізації напруги вторинної обмотки трансформатора агрегату за рахунок зміни ступеня намагнічування матеріалу його підстержней.
3. Теоретично визначено умови прояву стабілізуючого ефекту трансформатора, при якому відхилення напруги на виході трансформаторно-випрямного агрегату при збільшенні тягового струму більш ніж на 40% від свого номінального значення не перевищує 2%.
4. Досліджено вплив основних параметрів трансформатора агрегату на ступінь прояву ефекту стабілізації напруги.
5. Визначено оптимальні значення параметрів магнітопроводу і обмоток трансформатора агрегату.
6. Вироблено математичне моделювання трьох режимів роботи трансформатора агрегату: номінальний режим, режим холостого ходу і короткого замикання, уточнені значення холостого ходу $I_0 = 12,8$ А і напруги короткого замикання $u_k = 35,1\%$, коефіцієнта навантаження $k_{нз} = 0,54$ і коефіцієнта корисної дії $\eta = 99\%$.
7. Розроблено єдина схема заміщення трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом з урахуванням магнітних втрат.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

8. Визначено характеристики і властивості трансформатора.

9. В результаті експериментальних досліджень отримана зовнішня характеристика моделі трансформатора, підтверджені стабілізуючі властивості силового трифазного трансформатора.

10. Запропоновано методику визначення основних параметрів трифазного трансформатора із стабілізуючим ефектом.

11. Встановлено, що робота випрямляча практично не погіршує стабілізуючі властивості трансформаторно-випрямного агрегату.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 16110-82 Трансформатори силові. Терміни та визначення. - М. :
Видавництво стандартів, 1986. - 27 с.
2. Тихомиров, П.М. Розрахунок трансформаторів. Навчальний посібник для
вузів /
П.М. Тихомиров. - 4-е изд., Перераб. і доп. - М. : Енергія, 1976. - 544 с.
3. Вольдек, А.І. Електричні машини. Підручник для студентів вищих
технічних навчальних закладів / А.І. Вольдек. - 3-е изд., Перераб. - Л. :
Енергія, 1978. - 832 с.
4. ГОСТ 11920-85 Трансформатори силові масляні загального призначення
напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. - М. :
Видавництво стандартів, 1985. - 39 с.
5. ГОСТ 12965-85 Трансформатори силові масляні загального призначення
класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови. - М. : Видавництво стандартів,
1985. - 48 с.
6. Розенблат, М.А. Магнітні підсилювачі / М.А. Розенблат. - М. : Радянське
радіо, 1956. - 823 с.
7. Бадєр, М.П. Про підвищенні енергетичної ефективності
перетворювального обладнання тягових підстанцій метрополітену / Бадєр
М.П., Ю.М. Іньков // Електрика. - 2008. - №2. - С. 60-64.
8. Бей, Ю. М. Тягові підстанції. Підручник для вузів ж.-д. транспорту /
Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошін, В.Н. Пупинін, М.Г. Шалімов. - М. : Транспорт,
1986. - 319 с.
9. Бурков, А.Т. Електронна техніка та перетворювачі: Підручник для вузів
ж.-д. транспорт / А.Т. Бурков. - М. : Транспорт, 1999. - 464 с.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		106

10. Аржанніков, Б.А. Удосконалення системи електропостачання постійного струму на основі автоматичного регулювання тягових підстанцій / Б.А. Аржанніков, А.А. Пишкін. - Єкатеринбург: Видавництво Уральського державного університету шляхів сполучення, 2006. - С.118.
11. Аржанніков, А.А. Система керованого тягового електропостачання постійного струму для пропуску швидкісних і великовагових поїздів / А.А. Аржанніков // Транспорт Уралу. - 2012. - №1 (32). - С.134-137.
12. Аржанніков, Б.А. Автоматичне регулювання напруги в системі електропостачання постійного струму 3,0 кВ / Б.А. Аржанніков, Л.А. Фролов. - Єкатеринбург: Видавництво УрГУПС, 2009. - 48 с.
13. Аржанніков, Б. А. Можливості автоматичного регулювання напруги на існуючому обладнанні тягових підстанцій швидкісної магістралі Санкт-Петербург - Москва / Б. А. Аржанніков, Л. А. Фролов, А. Н. Марікіна // Електрифікація, інноваційні технології, швидкісне і високошвидкісне рух на залізничному транспорті Eltrans'2009: матеріали П'ятого Міжнародного симпозіуму. Санкт-Петербург, 2010. - С. 330-333.
14. Іньков, Ю.М. Компенсатори неактивній енергії зі стабілізацією напруги трансформаторних підстанцій / Ю.М. Іньков, В.С. Климаш, Д.П. Светлаков // Електротехніка. - 2007. - №7.- С.34-37.
15. Розанов, Ю.К. Основні етапи розвитку і сучасний стан силової електроніки / Ю.К. Розанов // Електрика. - 2005. - №7. - С.52-61.
16. Александров, Г.Н., Шакіров М.А. Трансформатори й реактори / Г.Н. Александров, М.А. Шакіров. - СПб .: Видавництво політехнічного університету, 2006. - 204 с.

17. Кім, К.К. Розробка стабілізаторів напруги контактної мережі електрифікованого залізничного транспорту / К.К. Кім, Ю.А. Михайлов, А.А. Ткачук // Известия вузів. Електромеханіка. - 2011. - №5. - С.38-45.
18. Сергієнко, Б.Н. Електричні машини: Трансформатори. Навчальний посібник для електро. спец. вузів / Б.М. Сергієнко, В.М.Кіселев, Н.А. Акімова; під. ред. І.П. Копилова. - М .: Вища школа., 1989. - 352 с.
19. Бикадоров, А.Л. Надпровідникової індуктивний накопичувач енергії для тягових підстанцій постійного струму / А.Л. Бикадоров, Т.А. Заруцька, А.Д. Петрушин, Є.П. Фігурне // Известия вузів. Електромеханіка. - 2008. - №3. - С.56-61.
20. Кім, К.І. Електротехніка надпровідників: навчальний посібник / К.І. Кім, К.К.Кім, І.Д. Лупкін. - Л .: ЛПЖТ, 1989. - 66 с.
21. Шевлюгін, М.В. Підвищення енергетичних показників роботи системи тягового електропостачання залізниць з допомогою накопичувачів енергії / М.В. Шевлюгін // Наука і техніка транспорту. - 2007. - №1. - С. 68-72.
22. Шевлюгін, М.В. Використання надпровідних індуктивних накопичувачів енергії в системі тягового електропостачання електричних залізниць / М.В. Шевлюгін // Вісник МПТа. - 2003. - вип.8. - С. 48-51.
23. Златкін, Б.Р. Оптимізація конструкції силових трансформаторів / Б.Р. Златкін, Л.Я. Поволоцький, Г.І. Ціер // Електротехніка. - 1977. - №4. - С. 14-16.
24. Пат. 109909 Російська Федерація, МПК H01F 30/12. Трифазний трансформатор / Кім К.К., Ткачук А.А .; заявник і власник патенту Федеральне державне освітня установа вищої професійної освіти «Петербурзький державний університет шляхів сполучення». - № 2011123724/07; заявл. 10.06.2011; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. - 3 с.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

25. Пат. 119930 Російська Федерація, МПК H01F 30/12. Трифазний трансформатор / Кім К.К., Ткачук А.А .; заявник і власник патенту Федеральне державне освітня установа вищої професійної освіти «Петербурзький державний університет шляхів сполучення». - № 2012114281/07; заявл. 11.04.2012;
опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24. - 2 с.
26. Пат. 172859 Російська Федерація, МПК H01F 20/12. Трифазний трансформатор тягової підстанції постійного струму / Кім К.К., Ткачук А.А., Титова Т.С .; заявник і власник патенту Федеральне державне бюджетне освітня установа вищої освіти «Петербурзький державний університет шляхів сполучення імператора Олександра І». - № 2017104981; заявл. 15.02.2017; опубл. 28.07.2017, Бюл. № 22. - 2 с.
27. Кім, К.К. Розробка пристрою підтримки напруги на необхідному рівні в контактній мережі постійного струму залізничного транспорту / К.К. Кім, А.А. Ткачук // Електрифікація і розвиток інфраструктури енергозабезпечення тяги поїздів на залізничному транспорті: матеріали Шостого Міжнародного симпозіуму «Елтранс-2011». - Санкт-Петербург, 2013. - С. 416-424.
28. Кім, К.К. Розробка пристрою підтримки напруги на необхідному рівні в контактній мережі постійного струму залізничного транспорту / К.К. Кім, А.А. Ткачук // Електрифікація і розвиток інфраструктури енергозабезпечення тяги поїздів на залізничному транспорті: тези доповідей шостого Міжнародного симпозіуму «Елтранс-2011». - Санкт-Петербург, 2011. - С. 63.
29. Кім, К.К .. Трифазний трансформатор зі стабілізуючими властивостями / К.К. Кім, А.А. Ткачук // Електрифікація і розвиток інфраструктури енергозабезпечення тяги поїздів швидкісного і високошвидкісного

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		109

залізничного транспорту: тези доповідей сьомого Міжнародного симпозиуму «Елтранс-2013». - Санкт-Петербург, 2013. - С. 55-56.

30. Кім, К.К. Трансформатор зі стабілізуючими властивостями / К.К. Кім, А.А. Ткачук // «Транспорт - 2013»: праці міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт - 2013». Частина III. Природничі та технічні науки. - Ростов-на-Дону, 2013. - С. 159-160.
31. Ткачук, А.А. Стабілізація напруги на шинах тягових підстанцій постійного струму / К.К. Кім, А.А. Ткачук // Електроенергетика очима молоді: наукові праці V міжнародної науково-технічної конференції, Т.2., - Томськ, 2014. - С. 167-171.
32. Ткачук, А.А. трифазний трансформатор зі стабілізуючими властивостями / А.А. Ткачук // Збірник тез доповідей конгресу молодих вчених, Випуск 2. - Санкт-Петербург, 2014. - С. 308-309.
33. Ткачук, А.А. Трансформатор-стабілізатор напруги / А.А. Ткачук // Транспорт: проблеми, ідеї, перспективи. Тиждень науки - 2012: матеріали LXXII Всеросійської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. - Санкт-Петербург, 2012. -С. 106-107.
34. Ткачук, А.А. Трансформатор зі стабілізуючими властивостями / А.А. Ткачук // Транспорт: проблеми, ідеї, перспективи. Тиждень науки - 2013: матеріали LXXIII Всеросійської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. - Санкт-Петербург, 2013. - С. 214-215.
35. Ткачук, А.А. Трифазний трансформатор з стабілізуючими властивостями / А.А. Ткачук, М.А. Шпильч // Енергоефективність та енергобезпеку виробничих процесів: III Всеросійська науково-технічна конференція студентів, магістрантів, аспірантів: збірник праць. - Тольятті, 2014. - С. 216-218.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

36. Ткачук, А.А. Розробка пристрою підтримки напруги на необхідному рівні в контактній мережі постійного струму залізничного транспорту / А.А. Ткачук, К.К. Кім // Збірник тез доповідей учасників XXVIII Всеросійської конференції навчаються «ЮНІСТЬ, НАУКА, КУЛЬТУРА ». - Москва, 2011. - С. 371.
37. Бессонов, Л.А. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: підручник / Л.А. Бессонов. - М .: Гардарики, 2002. - 638 с.
38. Кім, К.К. метрологія, стандартизація, сертифікація і електровимірювальна техніка: навчальний посібник / К.К. Кім, Г.Н. Анісімов, В.Ю. Барбаровіч, Б.Я. Литвинов. - СПб .: Пітер, 2006. - 368 с.
39. Буль, Б.К. Основи теорії і розрахунку магнітних ланцюгів / Б.К. Буль. - М. - Л., Енергія, 1964. - 464 с.
40. Петров, Г.Н. Електричні машини. У 3-х частинах. Ч.1. Вступ. Трансформатори: підручник для вузів / Г.М. Петров. - М .: Енергія, 1974. - 240 с.
41. Демірчян, К.С. Теоретичні основи електротехніки: підручник для вузів. Т.2. / К.С. Демірчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкін. - 5-е изд. - СПб .: Пітер, 2009. - 432 с.
42. Ламмеранер, І. Вихрові струми. Переклад з чеської / І. Ламмеранер, М. Штафль. - М.-Л .: Вища школа, 1967. - 208 с.
43. Нейман, Л.Р. Поверхневий ефект в феромагнітних тілах / Л.Р. Нейман. - Л.- М .: Госенергоіздат, 1949. - 190 с.
44. Кіфер, І.І. Випробування феромагнітних матеріалів / І.І. Кіфер. - М .: Енергія, 1969. - 360 с.
45. Єршов, Ю.К. Розрахунок перехідних процесів в нелінійної магнітної ланцюга з масивними проводять ділянками муздрамтеатру / Ю.К. Єршов // Известия вузів. Електромеханіка. - 2008. -№6. - С. 67-74.

					02.15.ЕС1927.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111

46. Дружинін, В.В. Магнітні властивості електротехнічної сталі / В.В. Дружинін. - М.: Енергія, 1974. - 240 с.
47. Карпова, І.М. Розрахунок електромагнітних полів в програмі Elcut: навчальний посібник / І.М. Карпова. - СПб.: ПГУПС, 2009. - 64 с.
48. Гельперин, Б.Б. Розрахунок дроселів насичення з урахуванням розсіювання магнітних потоків [Текст] / Б.Б. Гельперин, А.І. Майзель // Електротехніка. - 1972. - № 11. - С. 35-39.
49. Зіхерман, М.Х. Характеристики намагнічування потужних трансформаторів / М.Х. Зіхерман // Електрика. - 1972. - №3. - С. 79-82.
50. Привалов, І.І. Введення в теорію функцій комплексного змінного / І.І. Привалов. - М.: Наука, 1984. - 432 с.
51. Бронштейн, І.М. Довідник з математики для інженерів і учнів вузів / І.М. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М.: Наука, 1964. - 610 с.
52. Пат. 146074 Російська Федерація, МПК H01F 30/12. Трансформаторний агрегат для електрифікованих залізниць змінного струму / Кім К.К., Титова Т.С., Ткачук А.А.; заявник і власник патенту Федеральне державне бюджетне освітня установа вищої професійної освіти «Петербурзький державний університет шляхів сполучення імператора Олександра І». - №2014117369 / 07; заявл. 29.04.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27. - 3 с.
53. Кім, К.К. Трифазний трансформатор з стабілізуючими властивостями / К.К. Кім, А.А. Ткачук // Електроніка та обладнання транспорту. - 2016. - №5. - С. 18-21.