

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Вдосконалення методів оцінки і прогнозування
комутаційних перенапруг в системах
електропостачання 6-10 кВ»
«Improvement of methods for assessing and forecasting
switching overvoltages in 6-10 kV power supply systems»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу групи ЕЕ-23М
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,
освітньо-професійної програми
«Електротехнічні системи
електроспоживання»
_____ Михайло ПРАВИЙ
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи
доцент, канд.техн.наук
_____ Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університетФакультет будівництва, транспорту та енергетикиКафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджментуРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**Правого Михайла Вячеславовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Вдосконалення методів оцінки і прогнозування
комутаційних перенапруг в системах електропостачання 6-10 кВImprovement of methods for assessing and forecasting switching overvoltages in 6-10 kV
power supply systems2. Керівник роботи (проекту) Переверзєв Ігор Олексійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

1. Аналіз сучасних методик оцінювання комутаційних перенапруг. 2. Аналітичні
дослідження комутаційних перенапруг. 3. Удосконалення методів оцінювання КП.
4. Пристрої для обмеження КП. 5. Охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>доц., к.т.н. І. Савеленко</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз сучасних методик оцінювання комутаційних перенапруг</i>	<i>14.10.2024</i>	
2	<i>Аналітичні дослідження комутаційних перенапруг</i>	<i>24.10.2024</i>	
3	<i>Удосконалення методів оцінювання КП</i>	<i>01.11.2024</i>	
4	<i>Пристрої для обмеження КП</i>	<i>18.11.2024</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>21.11.2024</i>	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>27.11.2024</i>	
78	<i>Оформлення презентаційної частини роботи</i>	<i>02.12.2024</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника

Ігор ПЕРЕВЕРЗЄВ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача

Михайло ПРАВИЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 82 с.; 22 рис.; 1 табл.; 13 джерел, 1 додаток

Правий М.В. Вдосконалення методів оцінки і прогнозування комутаційних перенапруг в системах електропостачання 6-10 кВ. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький, 2024 р.

Метою даної роботи є проаналізувати сучасні дослідження КП у СЕП 6 - 10 кВ промислових підприємств, а також методи їх оцінки й прогнозування.

Проаналізовано сучасні дослідження КП в СЕП в мережах 6-10кВ промислових підприємств, та методи їх оцінки та прогнозування.

Проведено математичне моделювання КП в системі «вимикач - кабельна лінія - електроприймач», та досліджено вплив параметрів електроприймача, гармонік струму та кута перемикачання на кратність КП.

На основі удосконалення експрес-методу був розроблений комплексний метод оцінки і прогнозування КП у СЕП напругою 6-10 кВ, що враховує вплив електромагнітних і елегазових вимикачів, вищих гармонік струму, клас мережевої напруги і типів кабельних ліній на величину перенапруги.

Передбачається, що результати кваліфікаційної роботи будуть використані для оцінки значення КП в будь-якій точці високовольтної системи «вимикач - кабель - електроприймач», а також для оцінки і прогнозування КП, що дозволить раціонально підібрати необхідне захисне обладнання.

Ключові слова: система електропостачання, комутаційні перенапруги, схема мережі, кабельна лінія, однофазне замикання на землю, синхронний двигун, асинхронний двигун.

SUMMARY

Qualification work: 82 p.; 22 Fig.; 1 tables; 13 sources

Pravyi M. Improvement of methods for assessing and forecasting switching overvoltages in 6-10 kV power supply systems. 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" EPP, " Electrotechnical Systems of Power Consumption". Central Ukrainian National Technical University. Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of this work is to analyze modern research on SO in 6-10 kV SEP of industrial enterprises, as well as methods for their assessment and forecasting.

Modern research on SO in 6-10 kV networks of industrial enterprises, and methods for their assessment and forecasting, were analyzed.

Mathematical modeling of SO in the system "switch - cable line - electrical receiver" was carried out, and the influence of electrical receiver parameters, current harmonics and switching angle on the multiplicity of SO was studied.

Based on the improvement of the express method, a comprehensive method for assessing and forecasting SP in 6-10 kV SEP was developed, which takes into account the influence of electromagnetic and SF6 switches, higher current harmonics, network voltage class and types of cable lines on the magnitude of overvoltage.

It is assumed that the results of the qualification work will be used to assess the value of the SO at any point of the high-voltage system "switch - cable - electrical receiver", as well as to assess and predict the SO, which will allow rational selection of the necessary protective equipment.

Key words: power supply system, switching overvoltages, network diagram, cable line, single-phase ground fault, synchronous motor, asynchronous motor.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
	ВСТУП	8
1.	АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ	9
2.	АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ	20
2.1.	Основні відомості та методологія досліджень	20
2.2.	Фізичні процеси, що з'являються при відключенні електродвигунів від мережі 6 - 10 кВ з урахуванням вищих гармонік струму	22
2.3.	Математична модель КП при впливі вищих гармонік струму внаслідок зрізу струму без повторних запалювань дуги	25
2.4.	Результати математичного моделювання КП при відключенні СД потужністю 520 кВт і 1250 кВт без засобів захисту від КП	33
2.5.	Результати математичного моделювання КП при відключенні СД потужністю 520 кВт та 1250 кВт із засобами захисту від КП	36
3.	УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ КП	47
3.1.	Дослідження впливу класу напруги мережі на величину понижувального коефіцієнта	48
3.2.	Аналіз впливу типу кабельної магістралі на значення знижувального коефіцієнта	50
3.3.	Вплив вищих гармонік струму на перенапруги, що виникають під час комутації силових трансформаторів	52
3.4.	Визначення коефіцієнта коригування кратності КП	54
3.5.	Комплексна методика оцінки та прогнозування КП у мережах 6-10 кВ	56
3.5.1.	Оцінка перенапруг під час комутації електричних двигунів та трансформаторів електромагнітними і масляними і вимикачами	58
3.5.2.	Оцінка КП під час комутації електродвигунів потужністю до 1250 кВт і до 2500 кВт елегазовим та вакуумним вимикачами	60
3.5.3.	Оцінка КП під час комутацій трансформаторів і електродвигунів потужністю понад 1250 кВт і 2500 кВт відповідно елегазовими і вакуумними вимикачами	61
4.	ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ КП	62
4.1.	Кабельні лінії	62
4.2.	Нелінійні обмежувачі перенапруг	64

4.3.	Резистивно-ємнісні обмежники перенапруг	66
4.4.	Резисторно-ємнісні гасники перенапруги (РС гасники)	69
	ВИСНОВКИ	70
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	71
	ДОДАТКИ	73
A	Охорона праці	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КП – комутаційні перенапруги;
ЛЕП – лінія електропередачі;
ЕП – електричні приймачі;
ПЛ – повітряна лінія;
КЛ – кабельна лінія;
СД – синхронний двигун;
ОЗЗ – однофазні замикання на землю;
КЗ – коротке замикання;
АД – асинхронний двигун;
ОПН – обмежувач перенапруги;
СЕП – система електропостачання.

ВСТУП

У сучасних системах електропостачання (СЕС) промислових підприємств напругою від 6 до 10 кВ широко використовуються вакуумні і газові вимикачі, кабелі із зшитого поліетилену, тиристорні перетворювачі і частотні перетворювачі частоти. Це призводить до того, що в розподільній мережі присутні вищі гармоніки, при перемиканні електродвигунів і трансформаторів вакуумними і елегазовими вимикачами виникає комутаційне перенапруження (КП), величина якого в 5-7 разів може перевищувати номінальну напругу мережі.

Досвід експлуатації електрообладнання в мережах напругою 6-10 кВ показує, що основна кількість аварійних відключень пов'язано з пробоями через вплив КП і природного старіння ізоляції. Статистика показує, що близько 60% однофазних замикань на землю (ОЗЗ) в системах електропостачання гірничодобувних і металургійних підприємств напругою 6-10 кВ відбуваються через КП.

Питання захисту ізоляції високовольного електрообладнання від КП стало найбільш актуальним після широкого впровадження вакуумних і газових вимикачів. Найбільший вплив КП надають на електроприймачі зі зниженим рівнем міцності ізоляції, тобто для електродвигунів, кабелів і трансформаторів, які працюють протягом тривалого часу.

Рішення цих завдань актуально, оскільки дозволяє прогнозувати значення КП в системі електропостачання від 6 до 10 кВ при заміні застарілих комутаційних апаратів на новітні і раціонально підходити до вибору захисту КП як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації системи електропостачання. Це позитивно позначиться на надійності СЕС.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ

На сьогоднішній день для оцінки комутаційних перенапруг (КП) використовують такі методи: експериментальний метод, методи математичного та фізичного моделювання, а також експрес-методи оцінки [1].

Методики математичного моделювання. Використання ЕОМ разом із сучасними програмними пакетами для математичних розрахунків дозволяє проводити математичне моделювання трифазних схем заміщення живильної мережі, вимикача, кабелю й електроприймача. Це уможливорює врахування впливу природної несиметрії ізоляції окремих фаз, а також несинхронність контактів під час замикання або розмикання. Проте опис ініціалізації КП у такому випадку є досить трудомістким завданням, адже потрібно скласти та вирішити велику кількість диференціальних рівнянь у часткових похідних, що стосуються трифазної схеми заміщення.

Значно простіше є рішення задачі математичного моделювання на основі однолінійної схеми заміщення завдяки значному зменшенню числа диференціальних рівнянь

У дослідженнях [1, 2] виконані теоретичні дослідження КП та розроблені аналітичні вирази для розрахунків напруги на навантаженні під час комутації.

Так, у дослідженні [1] виведено формули для визначення напруги на навантаженні під час неселективного відключення електродвигуна в режимі однофазного замикання на землю за допомогою вакуумних вимикачів.

У дослідженні [2] отримані формули для визначення перенапруг на навантаженні з урахуванням повторних запалювань дуги в вакуумній

камері вимикача.

Аналітичні вирази з робіт [1, 2], важко застосувати на практиці при оцінці КП для великого числа електродвигунів із різними параметрами, оскільки не всі параметри, використані у наведених вище формулах, вказані в паспортних даних електродвигунів; наприклад, ємність електродвигуна дуже рідко зустрічається в довідниках.

У результаті математичного моделювання можна визначити основні закономірності під час комутації електромашин. Наприклад, у дослідженні [2] були визначені КП на затискачах ненавантажених синхронних двигунів потужністю 250 і 630 кВт при відключенні вакуумним вимикачем, які дорівнюють 5 і 2,9, відповідно. Проте експериментальні дослідження встановили, що максимальна кратність КП при відключенні аналогічних синхронних двигунів склала 6,9 та 6,3 відповідно.

Різниця між даними аналітичних досліджень, заснованих на математичному моделюванні, та експериментальними результатами пов'язана з тим, що при математичному описі перехідних процесів завжди використовуються певні припущення, зокрема:

- обмотка електромашини вважається лінійною системою, параметри якої незалежні від значень струму і напруги;
- усі параметри схеми заміщення постійні протягом усього процесу й не залежать від частоти;
- значення напруги в мережі при частоті 50 Гц вважають квазіпостійним значенням, рівним до початкового значення напруги в момент початку перехідного процесу;
- ротор електромашини залишається нерухомим.

Через прийняті припущення є відмінностями між процесами відключення електродвигунів, визначеними через математичне моделювання, і реальними вимірами.

На рисунках 1.1 і 1.2 представлені осцилограми перехідних процесів, отримані під час математичного моделювання відключення асинхронних двигунів напругою 6 кВ потужністю 630 і 250 кВт, і осцилограми, зняті при відключенні справжніх електродвигунів.

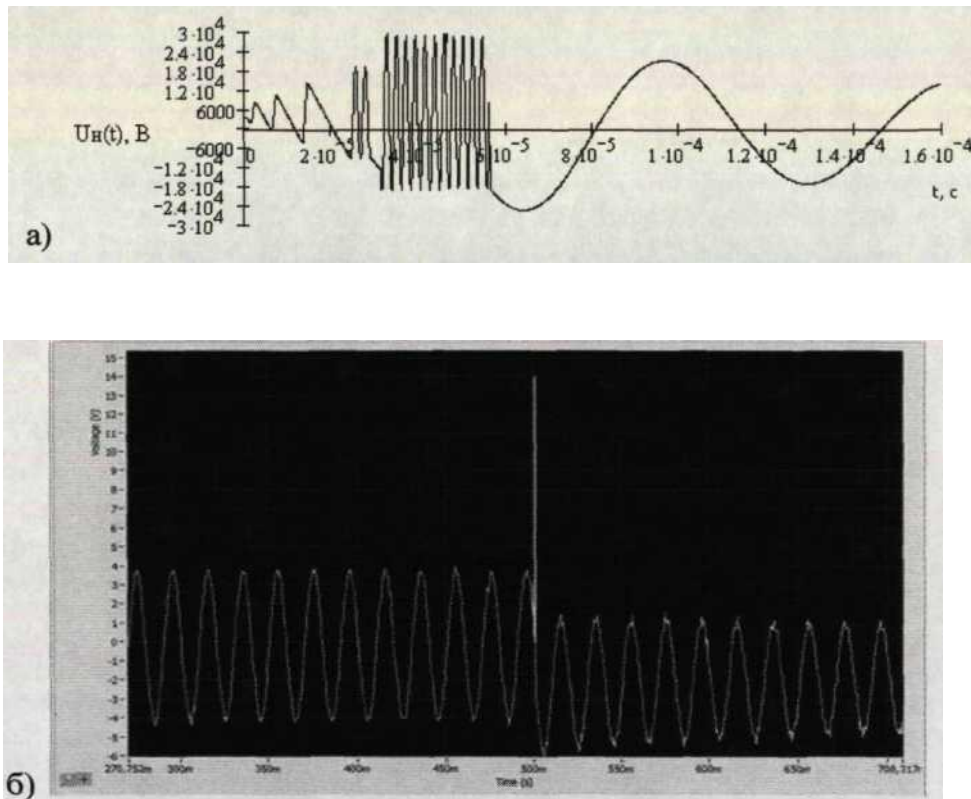


Рис. 1.1- Осцилограми процесу відключення синхронного двигуна потужністю 250 кВт

а) осцилограма, отримана під час математичного моделювання $K_{\max} = 5$;

б) осцилограма, отримана в результаті експериментального вимірювання $K_{\max} = 7$.

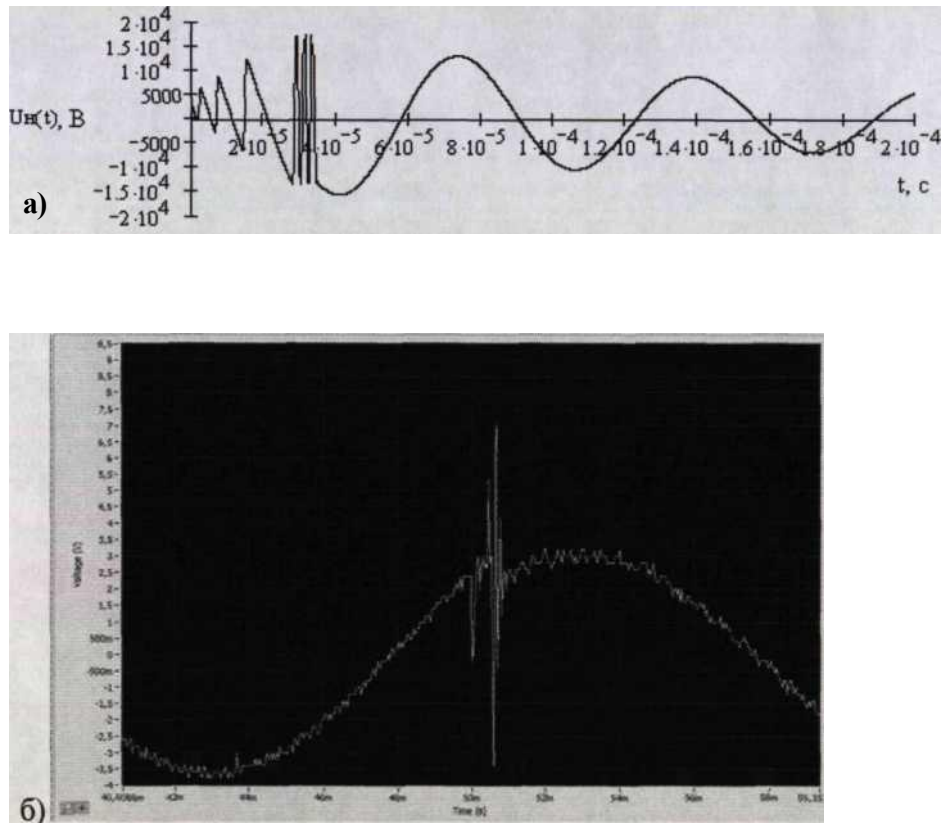


Рис. 1.2 - Осцилограми процесу відключення синхронного двигуна
потужністю 630 кВт

- а) осцилограма, отримана під час математичного моделювання $K_{\max} = 2,9$;
 б) осцилограма, отримана в результаті експериментального вимірювання $K_{\max} = 3,16$.

З аналізу наведених осцилограм видно, що характеристики перехідних процесів суттєво відрізняються. Це обумовлено в першу чергу нелінійним характером параметрів двигуна та наявністю ЕРС після вибігу.

Використання математичного моделювання, яке базується на застосуванні схеми заміщення, вимагає надійного математичного апарату для розрахунку перенапруг, що враховує численні фактори; точні дані про параметри схеми заміщення електроприймача з урахуванням нелінійних властивостей цих параметрів; кваліфікованого спеціаліста; значних витрат часу на оцінку перенапруг за допомогою математичних розрахунків для

великої кількості електроприймачів.

Методи фізичного моделювання. Ці методи базуються на вимірюванні перенапруг на фізичній моделі, яка складається з реальних елементів за схемою заміщення (індуктивні, активні, та ємнісні опори).

Оцінювання максимальних перенапруг для великої кількості реальних електроприймачів цим методом потребує великої варіації параметрів елементів фізичної моделі, що спричиняє значні витрати часу на проведення досліджень.

Моделювання фізичне дозволяє оцінити вплив різних факторів на перенапругу: тип вимикача, кут комутації, довжина кабельної лінії, навантаження - і не дозволяє врахувати процеси, що відбуваються в реальному електричному обладнанні через нелінійність параметрів машини та комбінації всіх випадкових факторів, що впливають на величину КП. Осцилограми, представлені на рисунку 1.3, демонструють, що при вимкненні одного двигуна типу АЕЗ-400Л потужністю 250 кВт, встановленого на екскаваторі ЕКГ-5, показують перенапруги з кратністю від $1,1 U_{ном}$ до $7 U_{ном}$. Це вказує на те, що для отримання інформації про закономірність появи максимально можливих КП потрібно застосовувати методи статистичного аналізу.

Отже, фізичне та математичне моделювання допомагає визначити загальні закономірності, які спричиняють виникнення КП, але всі фактори, що впливають на його величину в їхній випадковій комбінації, врахувати не вдається.

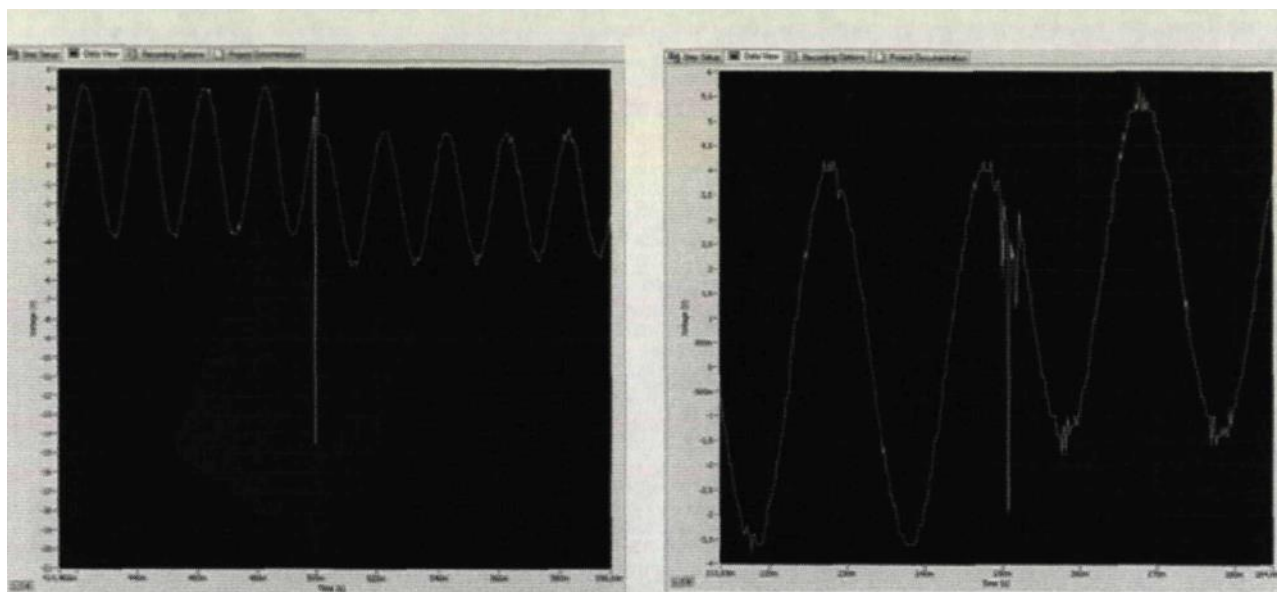
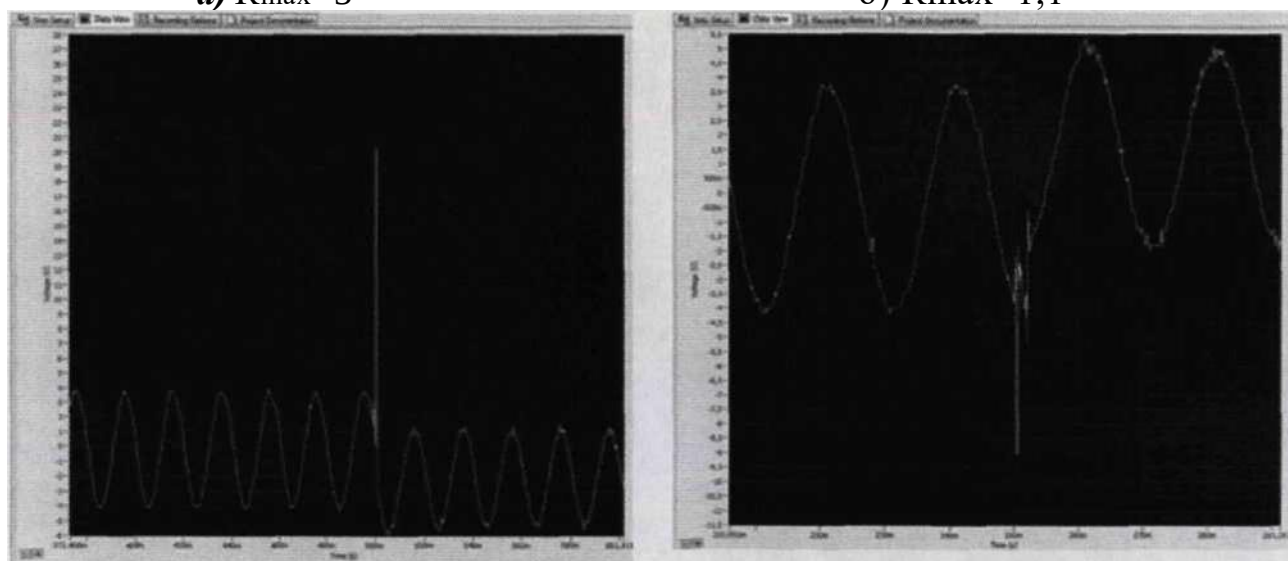
а) $K_{\max}=5$ б) $K_{\max}=1,1$ а) $K_{\max}=7$ б) $K_{\max}=3$

Рис. 1.3- Осцилограми при вимкненні двигуна АЕЗ-400Л
потужністю 250 кВт

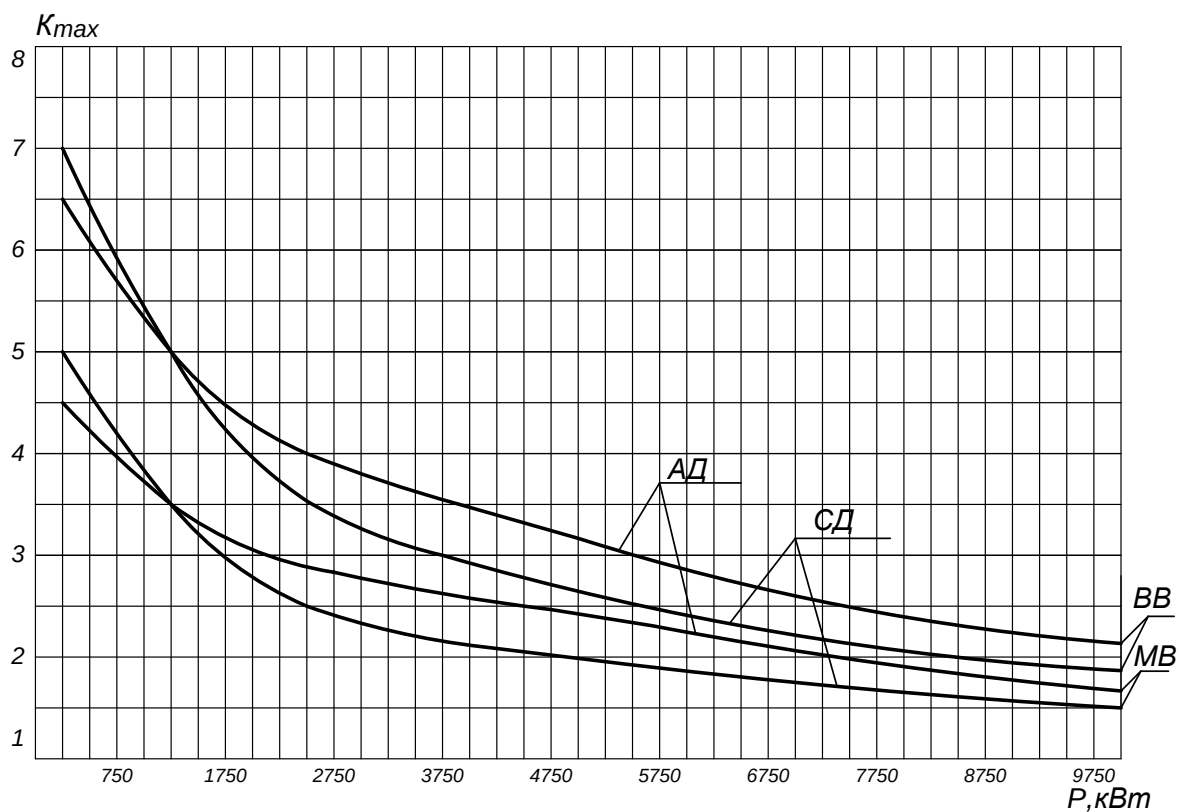
Експериментальний метод для оцінювання КП. Метод оцінювання, який базується на прямому вимірі перенапруг, надає змогу отримати реальні дані, враховуючи всі чинники, що впливають на величину й характер перенапруги. Проте, щоб визначити максимальні значення КП, слід провести значну кількість вимірів на одному пристрої, бо ймовірність зафіксувати максимальну перенапругу за одним виміром є дуже низькою.

У реальних умовах роботи електромашин збирання достатнього обсягу статистичних даних не завжди можливе, що в багатьох випадках пов'язано з неперервністю технологічних процесів. У таких випадках фіксація перенапруг можлива лише під час планових комутацій. Отже, цей метод вимагатиме значних витрат часу на збирання статистики для оцінювання максимальної кратності перенапруг.

Експрес-методи оцінювання КП. Експрес-методи ґрунтуються на використанні емпіричних кривих, які відображають зв'язок між максимальною кратністю перенапруги, типом вимикача, потужністю асинхронного та синхронного двигунів, переріз і довжину кабельної лінії, тип і потужність трансформаторів. Ці залежності презентовано на рисунках 1.4, 1.5 і 1.6.

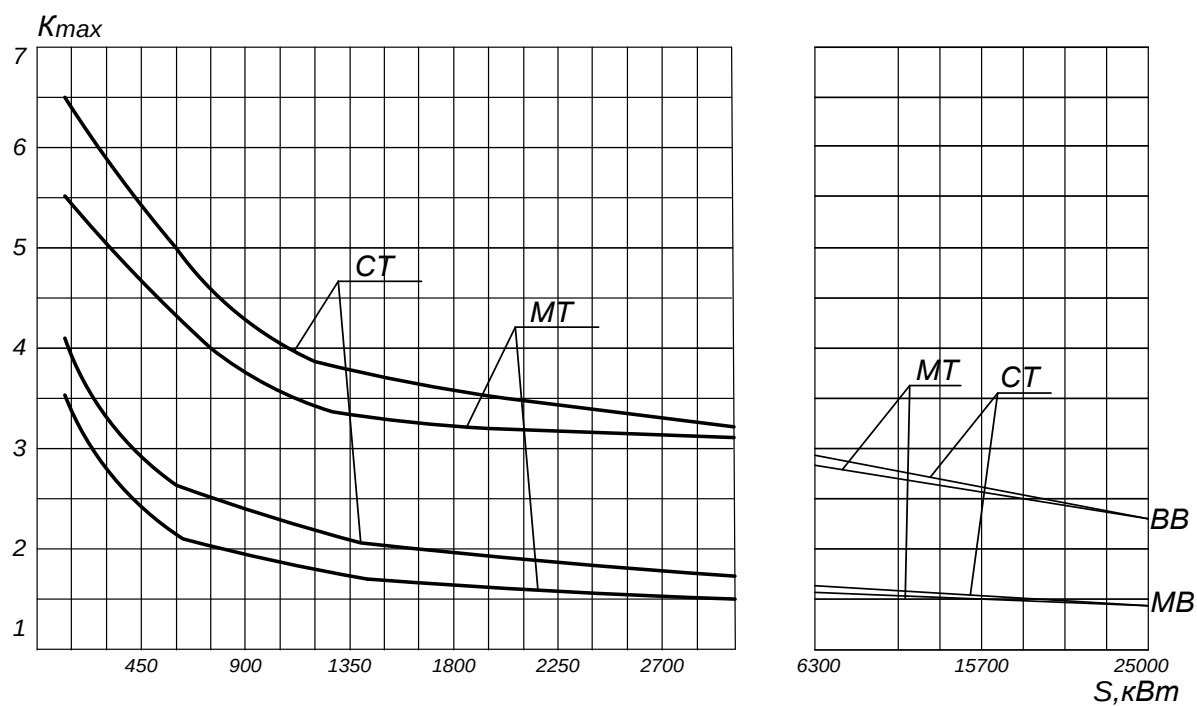
Результати величини КП, отримані цим методом, можуть відрізнятися від реальних значень на $\pm 19\%$ під час відключення електричного навантаження, якщо в мережі немає вищих гармонік, що цілком прийнятно для оцінювання та прогнозування КП як на стадії проектування, так і під час роботи систем електропостачання.

До недоліків цього методу можна віднести його незавершеність, оскільки представлені залежності стосуються вакуумних і масляних вимикачів.



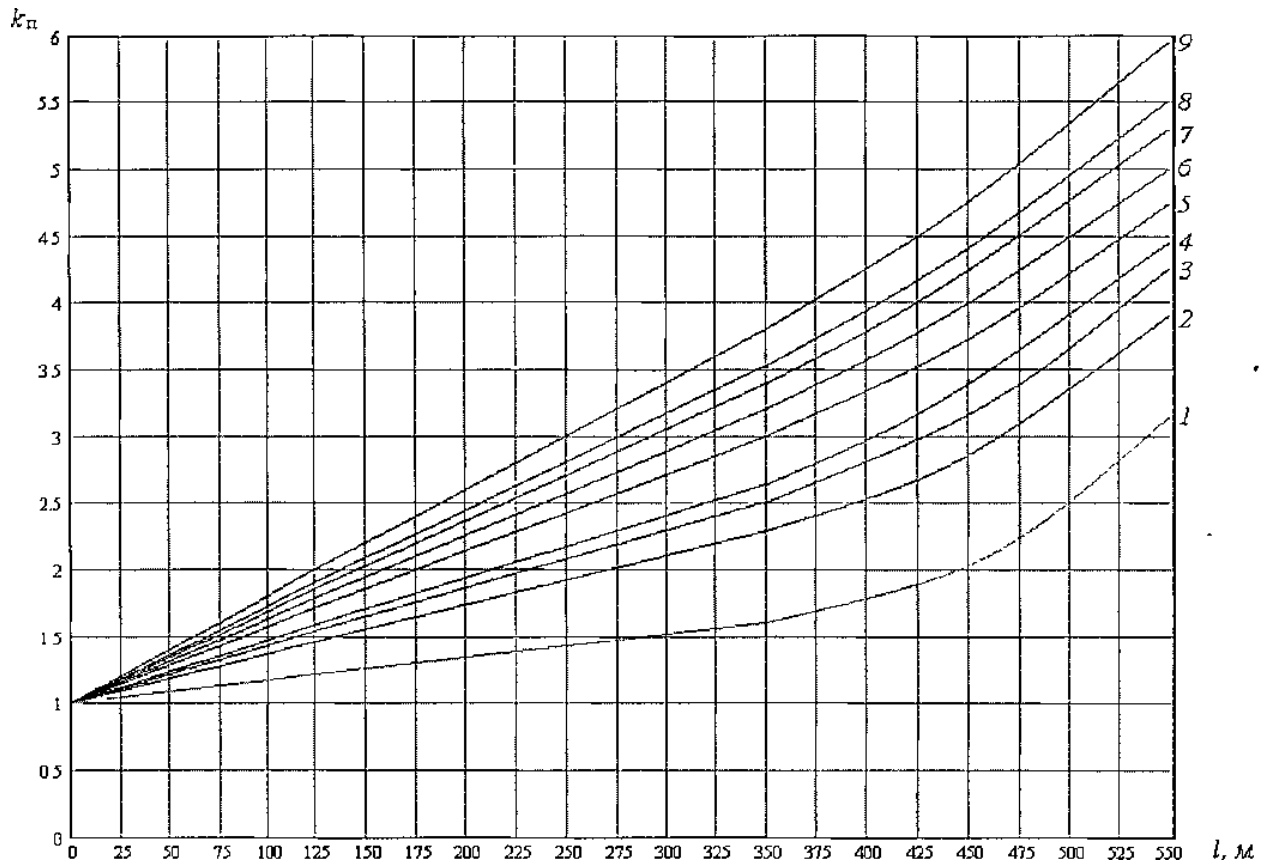
ВВ-вакуумний вимикач, МВ-масляний вимикач

Рис. 1.4 - Залежність максимального коефіцієнта перенапруги від потужності електродвигуна



СТ-сухий трансформатор, МТ-масляний трансформатор

Рис. 1.5 - Залежність максимального коефіцієнта перенапруги від потужності трансформатора



1 - $3 \times 25 \text{ mm}^2$, 2 - $3 \times 35 \text{ mm}^2$, 3 - $3 \times 50 \text{ mm}^2$, 4 - $3 \times 70 \text{ mm}^2$, 5 - $3 \times 95 \text{ mm}^2$, 6 - $3 \times 120 \text{ mm}^2$,
 7 - $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 8 - $3 \times 185 \text{ mm}^2$, 9 - $3 \times 240 \text{ mm}^2$

Рис. 1.6 - Зміна понижувального коефіцієнта КП в залежності від довжини та перетину кабельної лінії

Розроблений експрес-метод [3] не розглядає елегазові та електромагнітні вимикачі. Оцінка КП при використанні елегазових та електромагнітних вимикачів важлива, бо електромагнітні вимикачі все ще використовуються в нафтопереробній і гірничопереробній галузях, а елегазові вимикачі стають дедалі популярнішими практично в усіх галузях промисловості.

Похибка 19% при оцінці КП обумовлена середнім значенням понижувального коефіцієнта, яке враховує вплив параметрів кабельної лінії на величину КП. Середнє значення понижувального коефіцієнта визначено для броньованих кабелів з паперовою або гумовою ізоляцією для кожного стандартного перетину. В дійсності ємність одного типу та марки кабелю

напругою 6 кВ і 10 кВ може значною мірою відрізнятися.

Наприклад, кабель АСБГ 6 — (3х120) має питому ємність, що дорівнює $0,272 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Аналогічний кабель напругою 10 кВ має питому ємність, що дорівнює $0,119 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Середнє значення становитиме $0,196 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. Відхилення середнього значення ємності від кабелю напругою 6 кВ і 10 кВ відповідно дорівнює 28% і 39%. Відхилення ємності кабелів різних типів від середнього значення буде значно вищим. Наприклад, кабель зі зшитого поліетилену перетином 120 мм напругою 6 кВ має питому ємність $1,876 \cdot 10^{-6}$ Ф/км, що перевищує середнє значення майже у 9 разів. При використанні кабелів зі зшитого поліетилену КП в мережах 6 кВ будуть нижчими.

Отже, вдосконалення експрес-методів оцінки КП в системах електропостачання 6-10 кВ на основі аналізу впливу елегазових та електромагнітних вимикачів на величину перенапруг при комутації електродвигунів та трансформаторів різних типів, а також аналіз впливу типів кабелів напругою 6-10 кВ на значення понижувального коефіцієнта, дозволить отримати комплексний метод оцінки КП із високою точністю прогнозованих значень.

Беручи до уваги вищенаведене, мета даної роботи полягає у створенні комплексного методу оцінки та прогнозування КП у високовольтній системі «вимикач - кабельна лінія - електроприймач», а також у покращенні засобів захисту від КП у мережах 6 - 10 кВ за наявності вищих гармонік струму.

Для досягнення вказаної мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Провести експериментальні дослідження перенапруг, що виникають під час комутації трансформаторів і електродвигунів елегазовими та електромагнітними вимикачами, з подальшій статистичною обробкою результатів, щоб визначити основні фактори, що впливають на величину та природу КП.

2. Виконати математичне моделювання КП у системі «вимикач — кабельна лінія - електроприймач» для аналізу впливу параметрів електроприймача, кута комутацій та вищих гармонік струму на кратність КП.
3. Виконати комплексний підхід до оцінки та прогнозування КП у СЕП 6 - 10 кВ, що включає покращення експрес-методів шляхом врахування впливу електромагнітних та елегазових вимикачів, класу напруги в мережі та типу кабельної лінії, вищих гармонік струму на значення перенапруг.
4. Оптимізувати конструкцію РС-гасників, які служать для ефективного обмеження КП у мережах 6 - 10 кВ з наявністю вищих гармонік струму.

2. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ

2.1. Основні відомості та методологія досліджень

При перемиканні високовольтного силового електрообладнання в мобільних і стаціонарних електроприймачах комутаційними апаратами виникають перехідні процеси через миттєві зміни параметрів ділянки розподільної мережі, яка відключається. Ці процеси відбуваються за дуже короткий проміжок часу і супроводжуються КП, які значно перевищують номінальну напругу мережі, коли як комутаційні апарати використовуються елегазові або вакуумні вимикачі.

Перехідні процеси виникають унаслідок відключення ємнісної та індуктивної навантажень і є досить складною сукупністю взаємозалежних факторів, які врахувати при аналізі КП важко через їх випадковий характер.

Аналіз літературних матеріалів [2, 3] та результати експериментальних даних продемонстрували, що на величину КП впливає багато факторів, значення впливу яких різний. Основні з них: потужність навантаження, яка відключається, несинхронне замикання або розмикання полюсів контактної вимикача, величина зрізу струму, тип комутаційного апарата, характер навантаження, значення хвильового опору, ємність і індуктивність ланцюга, який відключається.

Аналіз літературних матеріалів [3, 4] вказує, що процеси, пов'язані зі зрізом струму, залежать не лише від теплофізичних характеристик контактного матеріалу та процесів на катоді й його області, але й від стану дугогасильної камери, поверхні катода, використовуваного матеріалу контакту, контактів, що шунтують вимикачі ємності, і величини відключаючого струму.

Збільшення величини струму, який вимикається, спостерігається при наявності в струмі вищих гармонік. Таким чином, можна стверджувати, що вищі гармоніки можуть викликати збільшення зрізу струму при комутації

індуктивного навантаження.

Вплив вищих гармонік струму на значення КП досліджено аналітично на прикладі комутації синхронного двигуна різної потужності з використанням вакуумного вимикача. Найбільш відповідним для оцінки основних закономірностей зміни КП залежно від коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої струму є математичний аналіз перехідних процесів при відключенні електродвигунів в режимі холостого ходу та близькому до нього, оскільки експеримент показав, що у цих сценаріях спостерігаються найбільші кратності КП.

Основою аналітичного дослідження вважається ідентичність схеми системи заміщення «вимикач — кабельна лінія — електродвигун» відносно високочастотного імпульсного процесу.

Для аналізу високочастотних перехідних процесів найбільш підходящою заміщувальною схемою є та, що має розподілені параметри, із врахуванням залежності величини цих параметрів від частоти перехідного процесу. Втім, через численні фактори, що впливають на перехідний процес при комутації, стає практично неможливим його математичне моделювання. Опис термодинамічних механізмів виникнення КП на основі трифазної схеми з розподіленими параметрами є надзвичайно складним завданням, отже, доцільно використовувати однофазну схему зосереджених параметрів, що є еквівалентом схеми з розподіленими параметрами.

Моделювання КП з урахуванням вищих гармонік струму в однофазній схемі зосереджених параметрів буде здійснюватися без розгляду повторних запалювань дуги у вакуумній камері вимикача. Вплив повторних запалювань дуги на величину КП детально вивчено у працях [1, 2], де показано, що з збільшенням кількості повторних запалювань (n) дуги значення кратності КП пропорційно зростає $\sqrt[3]{n}$.

Отже, маючи показник кратності КП без врахування повторних

запалювань дуги, можна визначити кратність КП з урахуванням повторних запалювань за формулою:

$$K_{n.z.d.} = K \cdot \sqrt[3]{n}, \quad (2.1)$$

де K — кратність перенапруг без урахування повторних запалювань дуги.

2.2. Фізичні процеси, що з'являються при відключенні електродвигунів від мережі 6 - 10 кВ з урахуванням вищих гармонік струму

Миттєві значення перенапруг, що з'являються при відключенні електродвигунів, можуть бути розраховані за виразом:

$$u = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2.2)$$

де i_0 - зріз струму, А;

L і C - індуктивність і ємність навантаження, Гн і Ф.

У дослідженнях [7] встановлено, що обрив дуги струму між контактами вакуумного вимикача, як правило, відбувається при куті комутації від 10° до 20° відносно основної гармоніки струму під час його відключення.

Величина зрізу струму $i_0(0_-)$ на першому етапі комутації буде визначатися поточним значенням сумарного струму, що протікає між контактами вимикача в згаданому діапазоні кута комутації.

У дослідженні [3] було показано, що в сучасних системах електропостачання підприємств існують 5, 7, 11 та 13 гармоніки струму. Залежно від коефіцієнта навантаження перетворювача частоти (K_3) характер розподілу амплітуд гармонік буде експонентним, якщо $K_3 \geq 0,6$, та відповідатиме нормальному закону розподілу, якщо $K_3 < 0,6$. У цьому

випадку точка максимуму нормального закону розподілу відповідає 7-ій гармоніці.

Варто вважати, що головними гармоніками, які викликають викривлення синусоїдальної форми струму, є 5-та та 7-ма гармоніки.

Для оцінювання впливу вищих гармонік струму на величину зрізу розглянемо 5-ту і 7-му гармоніки, причому амплітуда 5-ї гармоніки більша за амплітуду 7-ї гармоніки. Обрив дуги сумарного струму відбувається при куті комутації φ в діапазоні $10^\circ - 20^\circ$. У цьому контексті зріз струму може змінюватися в 1,8 — 2,8 рази в залежності від величини окремих гармонік, якщо коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої струму є в межах 0,24 - 0,53.

Як приклад на рис. 2.1 вказані значення зрізів струму за наступних умов: $J_{1max} = 3A$, $J_{5max} = 1,5A$, $J_{7max} = 0,5A$, коефіцієнт викривлення синусоїдності кривої струму становить 0,53. У такому випадку зріз струму дорівнюватиме 2,8A, що у 2,8 рази перевищує зріз струму при синусоїдальному струмі.

З урахуванням формули (2.1) кратність перенапруги буде збільшуватися.

Слід зазначити, що в інтервалі часу (Δt), який відповідає зміні кута комутації ($n \pm \varphi$), миттєві значення струму основної гармоніки, а також миттєві значення струмів 5-ї і 7-ї гармонік зберігають однакову полярність, що призводить до збільшення зрізу струму.

Розрахунки свідчать, що при коефіцієнтах викривлення синусоїдальної форми струму, рівних 0,37 та 0,24, зріз струму буде перевищувати значення зрізу струму при відсутності вищих гармонік відповідно в 2,3 та 1,8 рази, якщо L і C залишатимуться постійними.

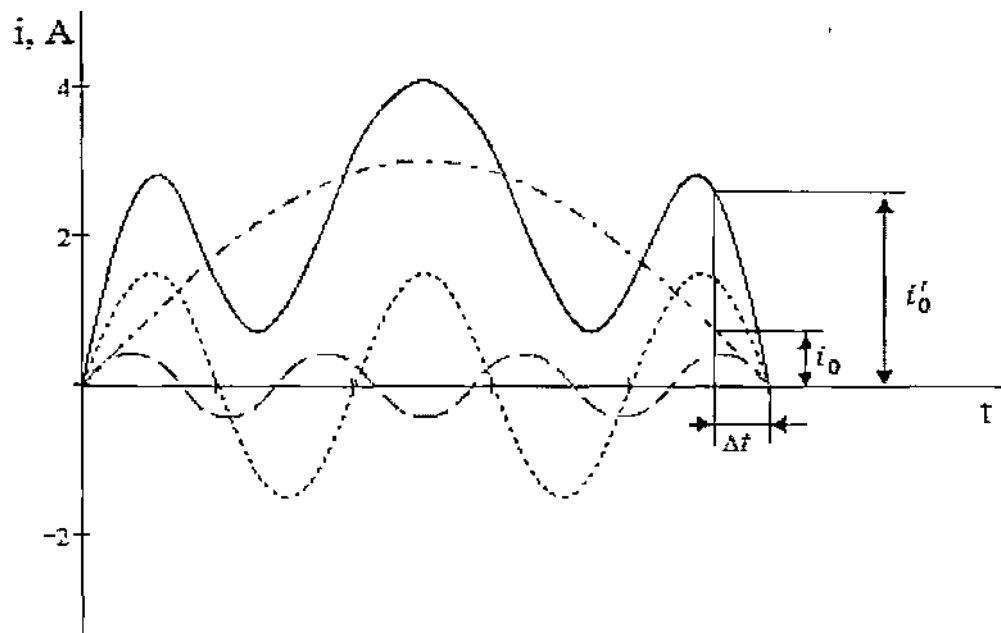


Рис. 2.1 – Графік залежності зміни струму при наявності вищих гармонік, кратних 5 і 7

Таким чином, із зростанням викривлення синусоїдальної форми струму кратність перенапруг може збільшуватися за умови зміни кута комутації ($\pi \pm \varphi$) відносно 1-ї гармоніки.

Зниження зрізу струму буде відмічатися при кутах комутації від 36° до 54° , через те що 5-а та 7-а гармоніки струму знаходяться у протифазі стосовно основної, тому в зазначених кутах комутації може спостерігатися зменшення кратності перенапруги.

При кутах комутації між 54° та 90° кратність перенапруг може як зменшуватися, так і збільшуватися, залежно від амплітудних значень 5-ї та 7-ї гармонік струму, адже вони знаходяться у протифазі одна до одної.

Зважаючи на вищесказане, можна зробити висновок, що при присутності 5-ї та 7-ї гармонік струму КП будуть безсумнівно зростати, якщо кут комутації знаходитиметься у діапазоні ($\pi \pm \varphi$).

Давайте детальніше розглянемо це явище за допомогою математичного моделювання.

2.3. Математична модель КП при впливі вищих гармонік струму внаслідок зрізу струму без повторних запалювань дуги

Основою розробки математичної моделі, що описує перехідні процеси струмів і напруг під час відключення електродвигунів від мережі 6 кВ, послужили наступні фактори, отримані експериментально:

- тривалість комутаційного імпульсу настільки мізерно мала порівняно з періодом промислової частоти і не перевищує $5 \cdot 10^{-4} \text{ С}$;
- перехідні процеси струмів і напруг у статорних обмотках електродвигунів обумовлені зрізом струму, тобто між контактами вимикача не має електричної дуги.

За цих умов можна прийняти такі допущення: вимикач можна вважати ідеальним комутаційним апаратом; параметри обмотки електричного двигуна лінійні та не залежать від величини напруги і струму; ротор двигуна під час комутації є нерухомим; напругу в мережі при частоті 50 Гц вважаємо квазіпостійною величиною та рівною миттєвому значенню напруги в початковий момент комутації; міжвиткова і міжфазна ємність не враховується (перша знизимось через її незначущість - 2,5% від ємності фази на землю, друга застосовується тільки для електродвигунів малої потужності).

Це дозволяє вважати комутований ланцюг лінійним, а вплив вищих гармонік оцінювати за методом суперпозицій.

У цьому випадку миттєвие значення перенапруги на затискачах електродвигуна визначається за формулою:

$$u(t) = u_1(t) + u_5(t) + u_7(t) + u_i(t) = \sum_{i=1}^n u_i(t), \quad (2.3)$$

де $u_i(t)$ - миттєва перенапруга, обумовлена зрізом струму i -ї гармоніки.

Відповідно до прийнятих допущень однофазна схема заміщення статорної обмотки електродвигуна зображена на рис. 2.2

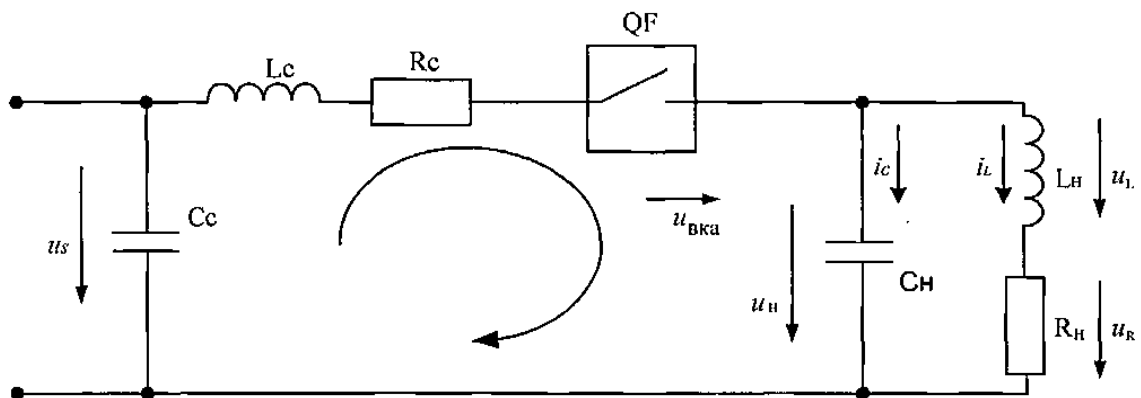


Рисунок 2.2 — Схема заміщення статорної обмотки електродвигуна

Позначення в схемі заміщення: L_n - індуктивність розсіювання; R_n — активний опір, враховуючи втрати в сталі; C_n — ємність фазної обмотки щодо корпусу електродвигуна.

В цій схемі складаємо систему рівнянь для коливального контуру $R_n L_n C_n$ щодо миттєвих значень напруг та струмів:

$$\begin{aligned}
 u_L + u_R - u_n &= 0 \\
 u_R &= i_L \cdot R_n \\
 u_L &= L_n \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) \\
 i_L &= -i_c \\
 i_c &= C_n \cdot \left(\frac{du_c}{dt} \right)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Розв'язуючи систему диференціальних рівнянь відносно струму, що проходить через індуктивний елемент, отримуємо таке рівняння:

$$L_n \cdot \left(\frac{di_L}{dt} \right) + i_L R_n - u_n = 0 \tag{2.5}$$

звідки, погоджуючись з рівнянням п'ятим та враховуючи четверте рівняння системи(2.4) отримуємо:

$$i_L = -L_n C_n \frac{d^2 i_L}{dt^2} - R_n C_n \frac{di_L}{dt}. \quad (2.6)$$

Таким чином, характеристичне рівняння набирає вигляду:

$$p^2 L_n C_n + p R_n C_n + 1 = 0 \quad (2.7)$$

Представимо характеристичне рівняння в наступному вигляді:

$$p^2 + p \cdot \frac{R_n}{L_n} + \frac{1}{L_n \cdot C_n} = 0 \quad (2.8)$$

Далі рівняння (2.8) подаємо у вигляді:

$$\left(p + \frac{R_n}{L_n} \right)^2 + \left(\frac{1}{L_n C_n} - \frac{R_n^2}{4L_n^2} \right) = 0. \quad (2.9)$$

Дана форма характеристичного рівняння може бути записана наступним чином:

$$(p + \alpha)^2 + \omega_0^2 = 0, \quad (2.10)$$

де $\alpha = \frac{R_n}{2L_n}$ — коефіцієнт загасання;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_n C_n} - \left(\frac{R_n}{2L_n} \right)^2} - \text{вільна частота коливань.}$$

Зазначені формули отримані на основі дослідження [2].

Загальний розв'язок другого порядку диференційного рівняння з врахуванням типу коренів має вигляд, А:

$$i_L = e^{\alpha t} \cdot [B_1 \sin(\omega_0 t) + B_2 \cos(\omega_0 t)], \quad (2.11)$$

де B_1, B_2 — постійні інтегрування, знайдені з початкових умов при $t=0$, тоді постійну інтегрування B_2 :

$$(B_2)_{t=0} = i_L(0); \quad (2.12)$$

де $i_L(0) = i_L(0_+) = i_L(0_-)$ - струм через індуктивність у момент комутації.

постійна інтегрування B_1 :

$$B_1 = \frac{u_n(0_-) - i_L(0_-)R_n - \alpha L_n \cdot i_L(0_-)}{\omega L_n}, \quad (2.14)$$

де u_c — напруга на ємності C_n в момент комутації чи миттєве значення напруги відносно землі, В;

L_n — індуктивність фазної обмотки, Гн.

Таким чином, рівняння для струму $i_L(t)$ з урахуванням постійних інтегрувань B_1 та B_2 має вигляд:

$$i_L(t) = e^{\alpha t} \left[\left(\frac{u_n(0_-) - i_L(0_-)R_n - \alpha L_n \cdot i_L(0_-)}{\omega L_n} \right) \sin(\omega t) + i_L(0_-) \cos(\omega t) \right]. \quad (2.14)$$

Аналогічним чином визначаємо напругу на затискачах електродвигуна.

$$u_n(t) = u_{n,np}(t) + u_{n,св}(t). \quad (2.15)$$

При відключенні електродвигуна від мережі $u_{n,св}(t) = 0$, маємо,

$$u_n(t) = u_{n,св}(t). \quad (2.16)$$

Для обчислення $u_{n,св}(t)$ рівняння системи (2.4) розв'язуємо щодо навантажувальної напруги U_n . Пропустивши проміжні математичні викладки, отримуємо таке рівняння:

$$u_{n,св}(t) = e^{\alpha t} (D_1 \sin(\omega t) + D_2 \cos(\omega t)), \quad (2.17)$$

Для постійних інтегрування складаємо таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned} u_n(t) &= u_{n,св}(t) \\ -\frac{du_{n,св}}{dt} C_n &= I_{c,св} \\ I_{c,св} &= -i_L \end{aligned} \quad (2.18)$$

З системи рівнянь (2.18) при $t=0$ отримуємо вираз для постійних інтегрування:

$$D_2 = u_n(0_-), \quad (2.19)$$

$$D_1 = \frac{\left[\frac{i_{cp}}{C_n} - \alpha \cdot D_2 \right]}{\omega_6}. \quad (2.20)$$

З урахуванням отриманих значень від постійних інтегрування, можна сформулювати наступний вираз для $u_{н.св}(t)$:

$$u_{н.св}(t) = e^{\alpha t} \left[\left(\frac{i_{cp}(0_-) - \alpha C_n \cdot u_n(0_-)}{\omega_6 C_n} \right) \sin(\omega_6 t) + u_n(0_-) \cos(\omega_6 t) \right]. \quad (2.21)$$

Щоб визначити вплив вищих гармонік на значення КП, необхідно з'ясувати, як змінюються індуктивність двигуна і ємність обмотки щодо землі для кожної з гармонік струму та врахувати початкові умови.

Користуючись виразами (2.21) і (2.14), можна виявити тимчасові зміни напруги на клеммах двигуна і зміни зверхперехідного струму при відключенні електродвигуна від мережі щодо конкретної гармоніки струму, а за формулою (2.3) - миттєві значення виникаючих перенапруг.

При дослідженні фізичних процесів, що виникають під час відключення електродвигуна від мережі 6 - 10 кВ при наявності вищих гармонік, було припущено, що індуктивність і ємність електродвигуна є постійними величинами і не залежать від частоти струму мережі.

У реальності ємність і індуктивність фази електродвигуна залежать від частоти струму, що протікає через обмотки електродвигуна. Давайте розглянемо це питання детальніше.

Індуктивність синхронного двигуна (фазна обмотка) визначається за формулою:

$$L_{\phi} = L_c \cdot \nu, \quad (2.22)$$

де ν - кількість секцій у фазі;

L_c — загальна індуктивність однієї секції, Гн.

Загальна індуктивність секції:

$$L_c = L_{nc} + L_{lc}, \quad (2.23)$$

де L_{nc} - індуктивність пазової частини секції, Гн;

L_{lc} - індуктивність лобової частини секції, Гн.

Відповідно до [5] індуктивність пазової частини секції фазної обмотки визначається виразом:

$$L_{nc} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im}[Z_{nc}], \quad (2.24)$$

де ω - кутова частота струму, що протікає через фазну обмотку, C^{-1} ;

$\text{Im}[Z_{nc}]$ - уявна частина повного опору секції обмотки, Ом.

Індуктивність лобових частин секції визначається за формулою [6]:

$$L_{nc} = (0,35 \div 0,45) \cdot 2 \cdot \mu_0 \frac{W_{\phi}^2}{\nu \cdot p \cdot K_{cp}} \cdot \tau(3\beta_H - 1), \quad (2.25)$$

де W_{ϕ} — кількість послідовних витків у фазовій обмотці (або в 1 паралельній гілці);

p — кількість пар полюсів машини;

τ — ширина полюсу, м;

$\beta_n = \frac{y_n}{\tau_n}$ - коефіцієнт скорочення кроку;

K_{cp} — кількість груп секцій, охоплюваних загальним магнітним потоком;

μ_0 — магнітна постійна.

Згідно з дослідженнями, описаними в роботах [6], індуктивний опір статорної обмотки синхронного двигуна як правило визначається поздовжньою зверхперехідною реактивністю x_d'' , яка залишається стабільною в діапазоні частот від 50 до 1000 Гц. Таким чином, індуктивність, що визначає характеристики обмотки, є індуктивністю пазової частини секції, оскільки зі збільшенням частоти струму, що проходить через обмотку, пропорційно знижується індуктивність, а індуктивний опір залишається незмінним.

Отже, під час математичного моделювання індуктивність для основної гармоніки струму визначається за формулою:

$$L_i = \frac{L_1}{n}, \quad (2.26)$$

де L_1 — індуктивність обмотки для першої гармоніки струму;

n — номер гармоніки струму.

Аналіз залежності ємності обмоток на корпус від частоти і температури показує, що зі збільшенням частоти від 50 до 1000 Гц ємність обмотки зменшується приблизно на 6 — 10 %. Надалі зниження ємності стає незначним. Збільшення частоти від 1 до 100 кГц зменшує ємність на 1 — 2%.

Для мережі основної частоти ємність двигуна приймається рівною паспортним значенням, а для вищих гармонік струму з частотою не більше 1000 Гц ($n < 20$) ємність електродвигуна для гармоніки, відмінної від основної, приймається рівною:

$$C_i = 0,92 \cdot C_1, \quad (2.27)$$

де C_1 — ємність електродвигуна для базової гармоніки, Ф.

Отже, значення індуктивності та ємності, що використовуються у

формулах (2.21) та (2.14), треба використовувати з урахуванням наведеного вище матеріалу.

Приймаємо для початкових умов у момент комутації ($u_n(0_-)$ і $i_L(0_-)$), що електродвигун вимкнений у режимі холостого ходу. Тоді характер струму навантаження буде близьким до індуктивного.

Таким чином, струм у обмотках електродвигуна буде відставати від напруги на 90° . При куті комутації 20° відносно основної гармоніки струму, величини:

$$u_n(0_-) = U_{\phi, \max} \cos(20^\circ) = 0,94 \cdot U_{\phi, \max}. \quad (2.28)$$

Виконаємо математичне моделювання комутації СД для мережі з напругою 6 кВ. У таблиці 2.1 представлені параметри ємності та індуктивності двигунів для номінального режиму роботи.

Таблиця 2.1 - Основні технічні характеристики СД

Тип	Номінальна потужність, кВт	Номінальна напруга, кВ	Номінальний струм статора, А	Частота обертання, об/хв	Індуктивність, Гн	Ємність, Ф
СДЕ2-16-6В2	1250	6	138	1000	$13 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$
СДСЕ-14-29-6	520	6	63,7	1000	$34 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$

У дослідженні [2] показано, що при відключенні СД під час перехідного процесу індуктивність і ємність електродвигуна залишаються практично незмінними і відповідають значенням до моменту комутації. Через високу частоту комутаційного імпульсу (80 — 120 кГц) активний опір обмоток двигуна різко зростає і коливається в межах 100 — 120 Ом залежно від потужності двигуна.

Щоб виконати математичний аналіз КП під час відключення СД, візьмемо опір обмоток, рівний 110 Ом.

Математичне моделювання продемонстроване в розділах 2.4 та 2.5.

2.4. Результати математичного моделювання КП при відключенні СД потужністю 520 кВт і 1250 кВт без засобів захисту від КП

Проведено математичне моделювання КП при відключенні СД потужністю 520 кВт та 1250 кВт від мережі на 6 кВ виконували при кутах перемикання 10° та 20° . Коефіцієнт викривлення синусоїдальності струму варіювали від 0,1 до 1. Це дозволило оцінити вплив не тільки на КП вищих гармонік струму, але і потужностей двигунів та кутів комутації.

На рис. 2.3 показані залежності кратності КП від коефіцієнта викривлення синусоїдальності струму для кутів комутації 10° та 20° при відключенні СД від мережі.

Аналіз графіків на рис. 2.3 демонструє, що в разі комутації синхронних двигунів потужністю 520 кВт залежність кратності КП від коефіцієнта викривлення синусоїдальності струму є практично лінійною. Для двигунів потужністю 1250 кВт при зміні коефіцієнта, що не перевищує 20%, залежність $K_n = f(kj)$ має лінійну тенденцію. Подальше збільшення kj практично не впливає на зростання кратності КП у діапазоні $20\% < kj \leq 100\%$, кратність КП зростає від 2,2 до 2,3 та від 3,5 до 3,7 відповідно до кутів комутації 10° та 20° .

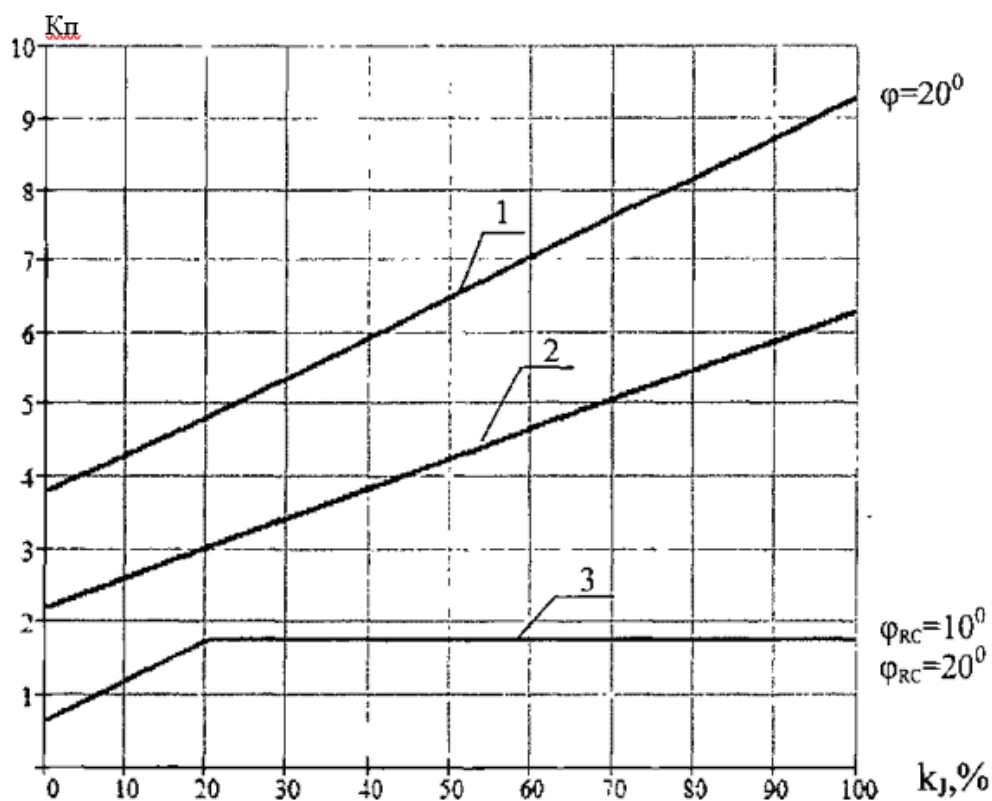
Дослідження виявили, що збільшення кута комутації призводить до зростання КП, не залежно від потужності двигуна.

Наприклад, для синхронних двигунів потужністю 520 кВт і 1250 кВт при зміні кута комутації з 10° і 20° кратність КП підвищується в середньому у 1,6 рази.

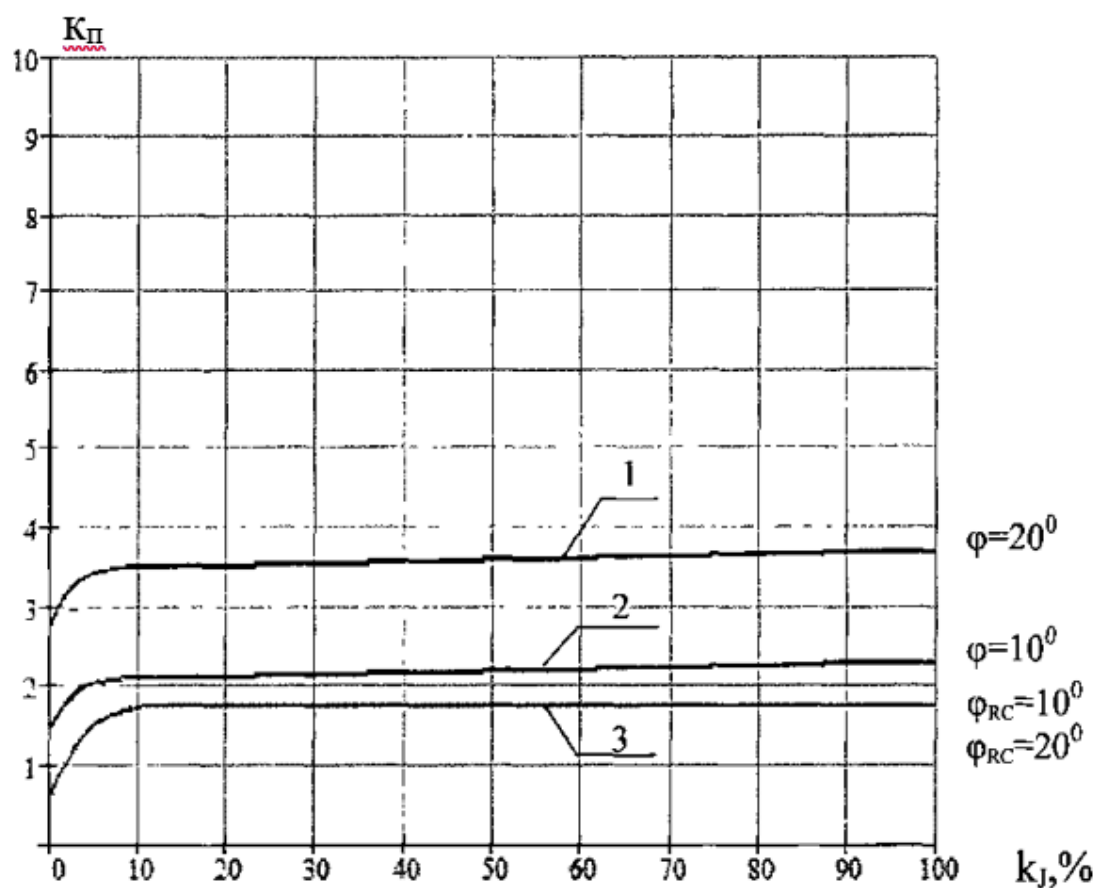
Розрахунок перехідних процесів показує, що зі зменшенням потужності синхронних двигунів при фіксованих коефіцієнтах викривлення синусоїдальності струму кратність КП збільшується, що узгоджується з залежностями кратності КП від потужностей двигунів, наведеними у роботах [7]. Збільшення кута комутації призводить до зростання кратності КП і практично не змінює характер перехідного

процесу.

Отже, при вимкненні СД без спеціальних засобів захисту від КП зростання коефіцієнта викривлення несинусоїдальності струму та кута комутації збільшує кратність КП. Для двигунів потужністю 1250 кВт ключовим фактором є кут комутації, тоді як для двигунів потужністю 520 кВт значний вплив на кратність КП мають обидва фактори.



a)



б)

Рисунок 2.3. - Співвідношення кратності КП до коефіцієнта викривлення синусоїдальності струму при відключенні СД потужністю 520 кВт (а) і 1250 кВт (б) без пристроїв захисту від КП (1,2) а з використанням RC-гасників (3)

2.5. Результати математичного моделювання КП при відключенні СД потужністю 520 кВт та 1250 кВт із засобами захисту від КП

Аналіз сучасних засобів та пристроїв для обмеження КП показав, що найбільш надійними для захисту високовольтних електродвигунів від КП є RC-гасники завдяки їхній високій термічній стійкості до вищих гармонік струму.

Залишається невирішеним питання про вплив коефіцієнта викривлення синусоїдальної форми кривої струму на рівень обмеження КП.

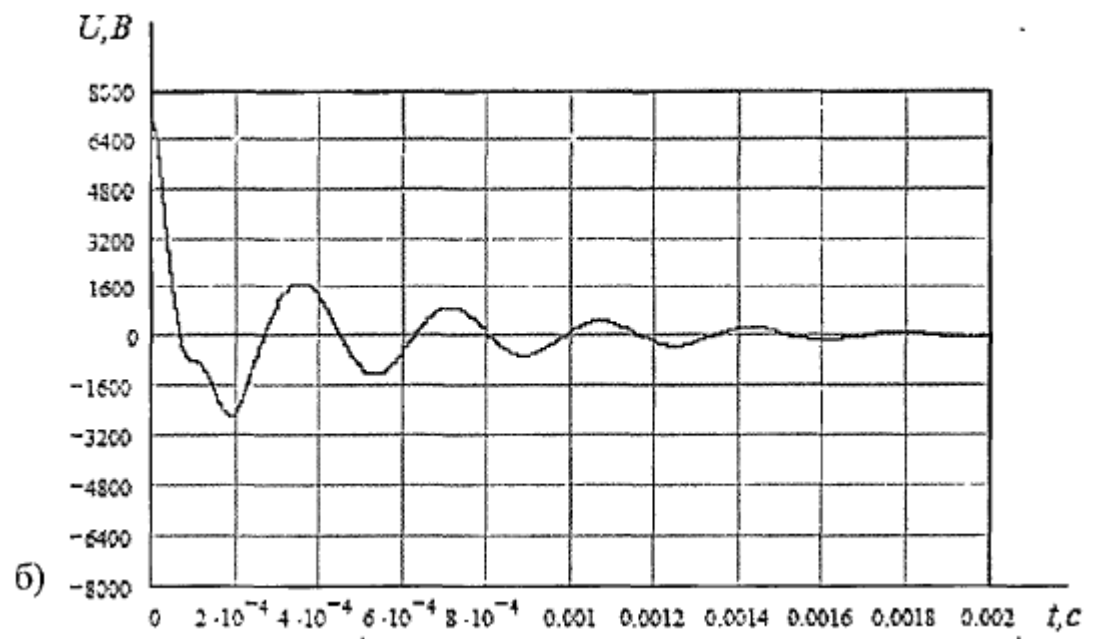
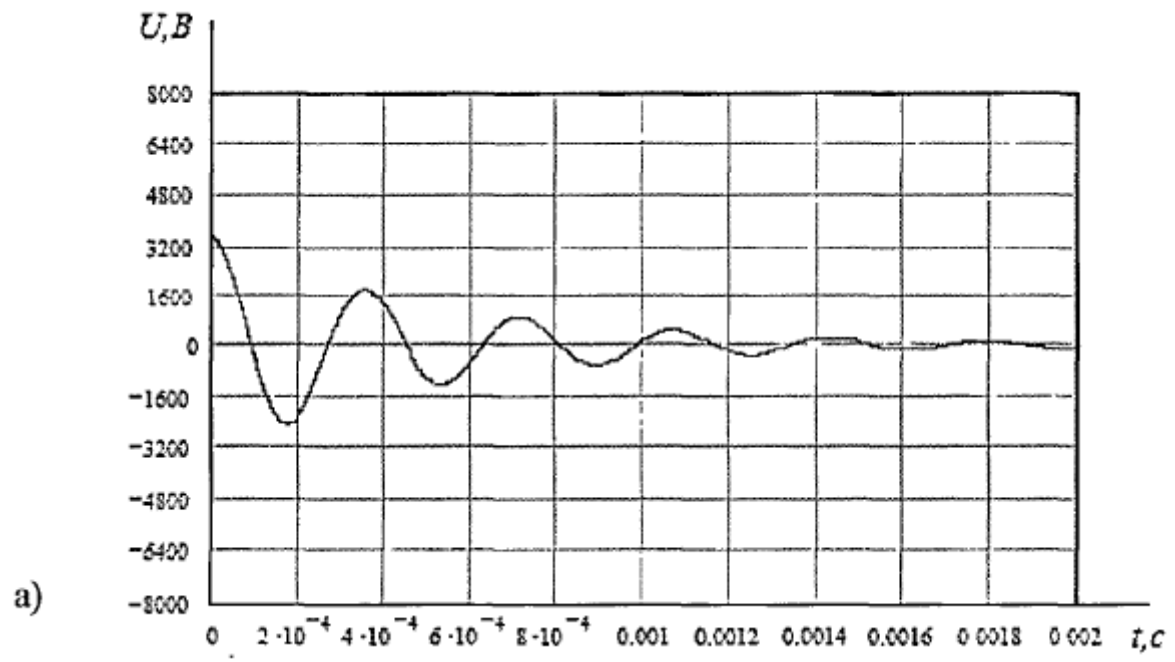
Основним компонентом RC-гасника є RC-ланцюг. Ємність RC-ланцюга розташована в межах від 0,1 мкФ до 0,25 мкФ. Оскільки ємність RC-ланцюгів значно перевищує власну ємність обмоток електродвигуна, в еквівалентній схемі власна ємність двигуна була замінена на ємність RC-ланцюга, а активний опір збільшений на величину, що дорівнює опору RC-ланцюга.

При математичному моделюванні взята ємність RC-ланцюга рівною 0,1 мкФ і 0,25 мкФ, опір резистора приймали за 12,5 Ом.

Результати математичного моделювання показали, що при ємності RC-ланцюга, що дорівнює 0,25 мкФ, кратність КП фактично не залежить від потужності двигуна, коефіцієнта викривлення синусоїдальної форми кривої струму і кута комутації. Значення кратності КП не перевищує 1,75, що є нижчим за допустиме значення 1,8.

Діаграма залежності $K_n = f(kj)$ для розглянутих потужностей двигунів і кутів комутації наведена на рис. 2.3. Зміна напруги на затискачах СД наведена на рис. 2.4-2.7.

Отримані залежності показують, що час перехідного процесу зменшується зі збільшенням ємності RC-ланцюга, тоді як максимальне значення фактично залишається незмінним.



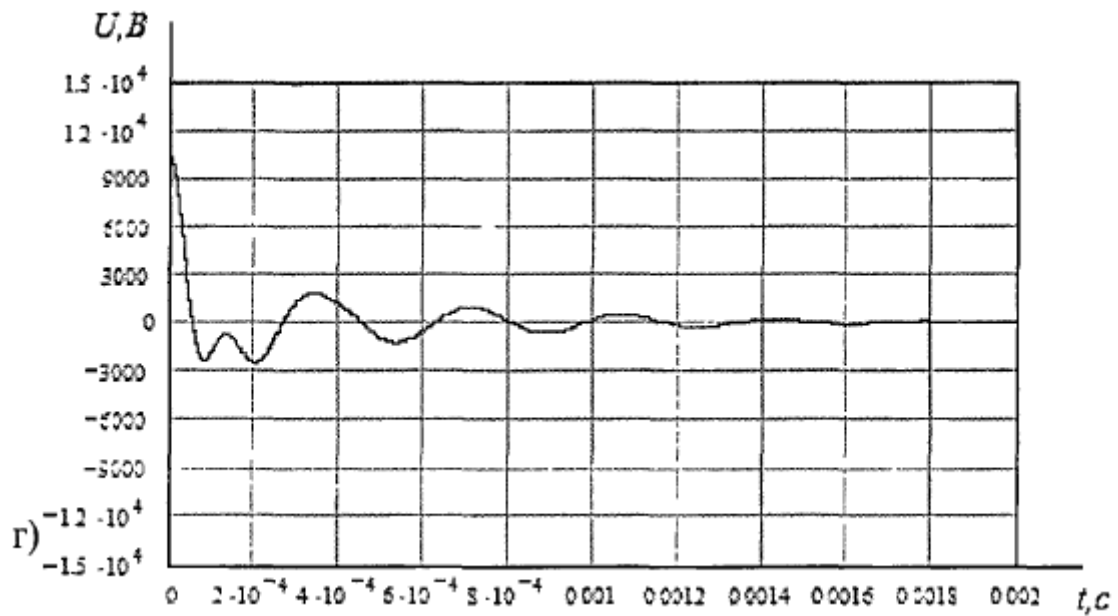
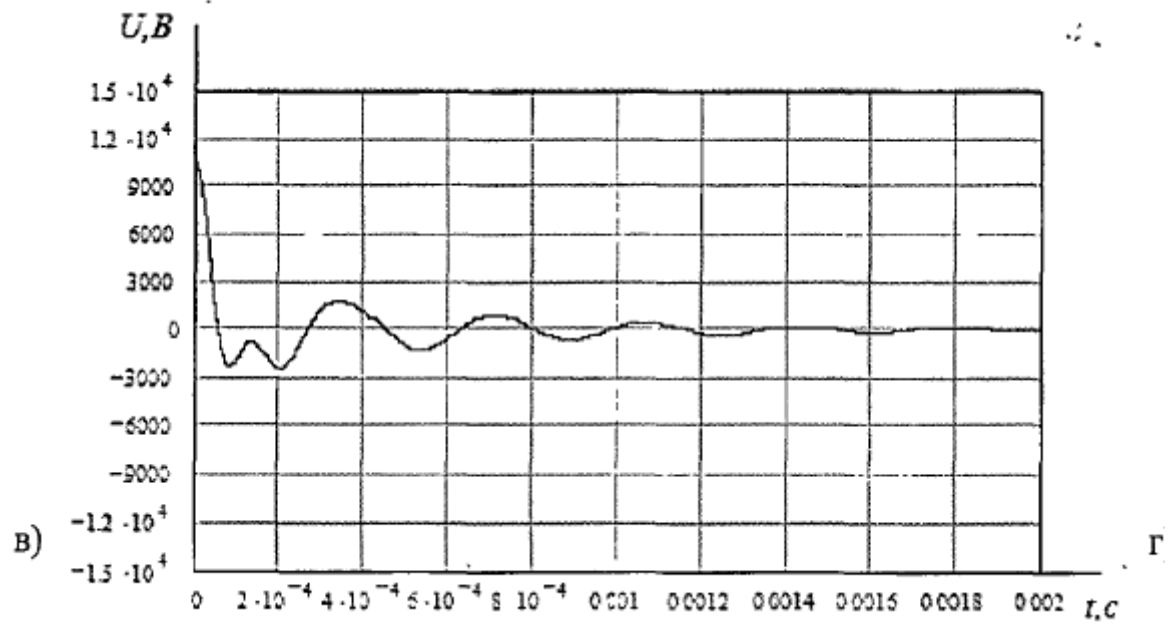
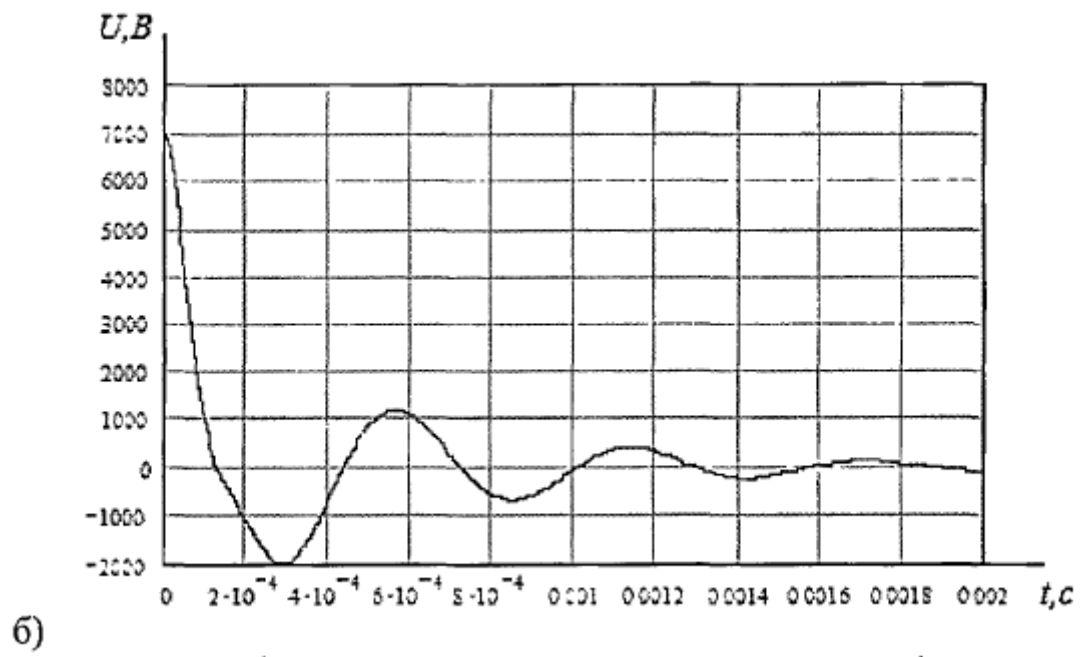
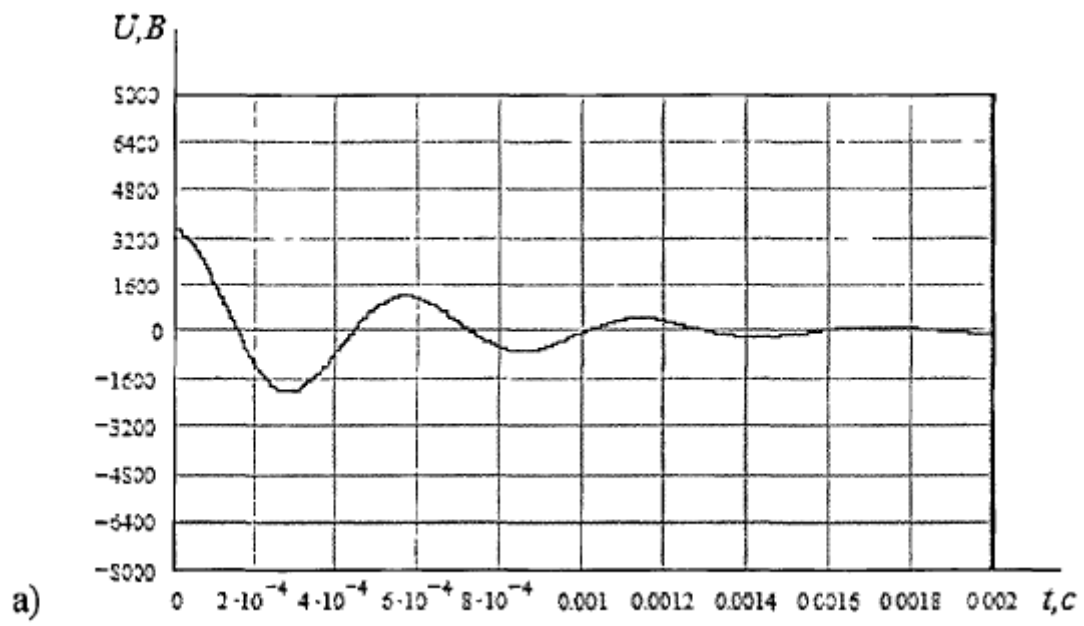


Рис. 2.4. - Зміни напруги на затискачах СД при $P = 520$ кВт, $\varphi = 10^\circ$ з параметрами RC-ланцюга $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, а) $k_j = 0\%$; б) $k_j = 10\%$; в) $k_j = 50\%$; г) $k_j = 100\%$



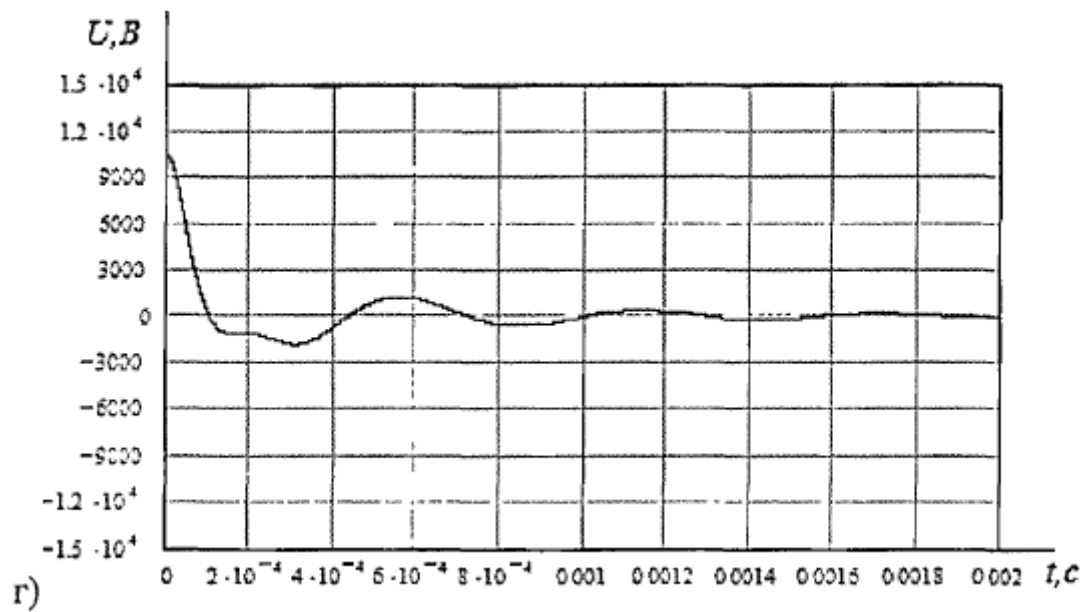
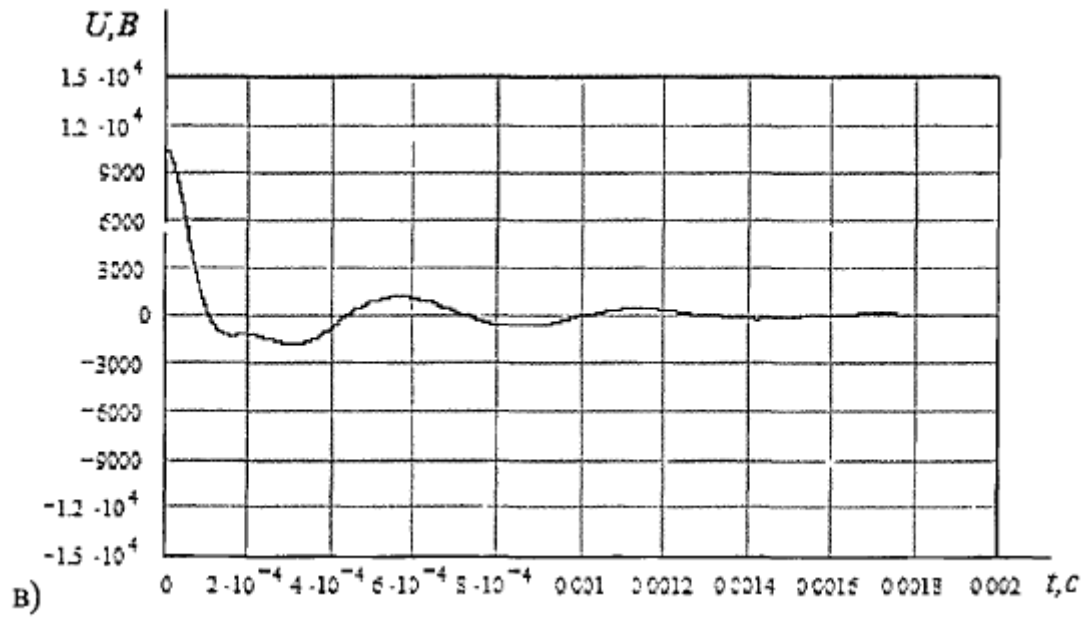
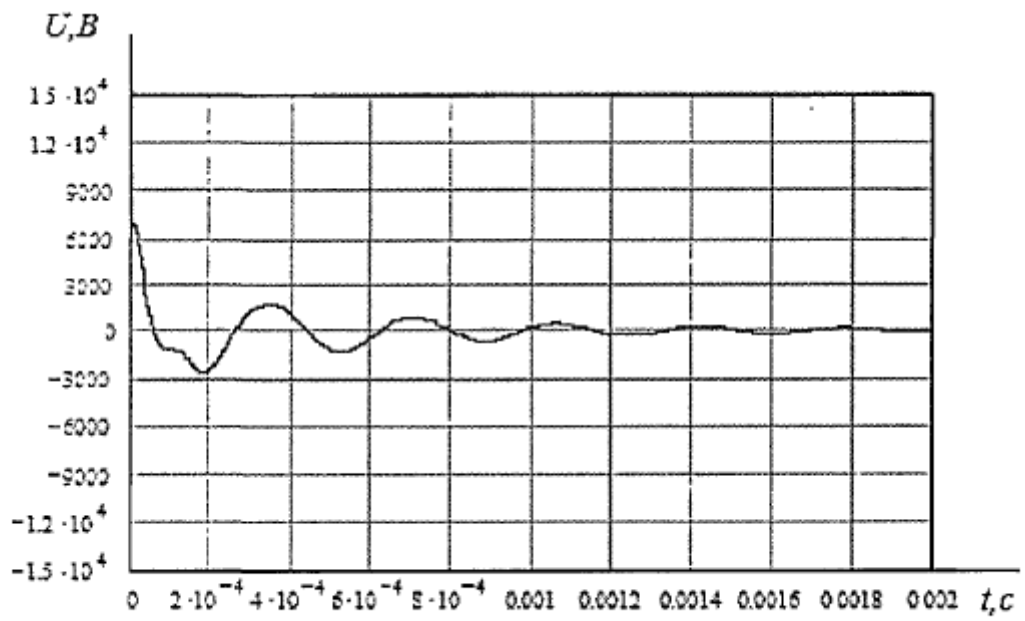
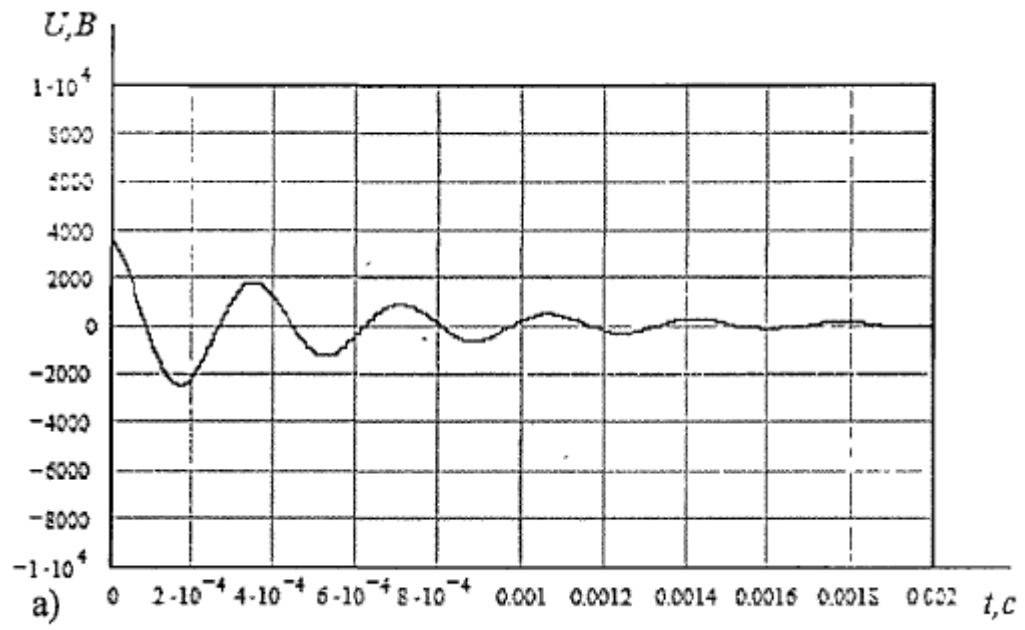
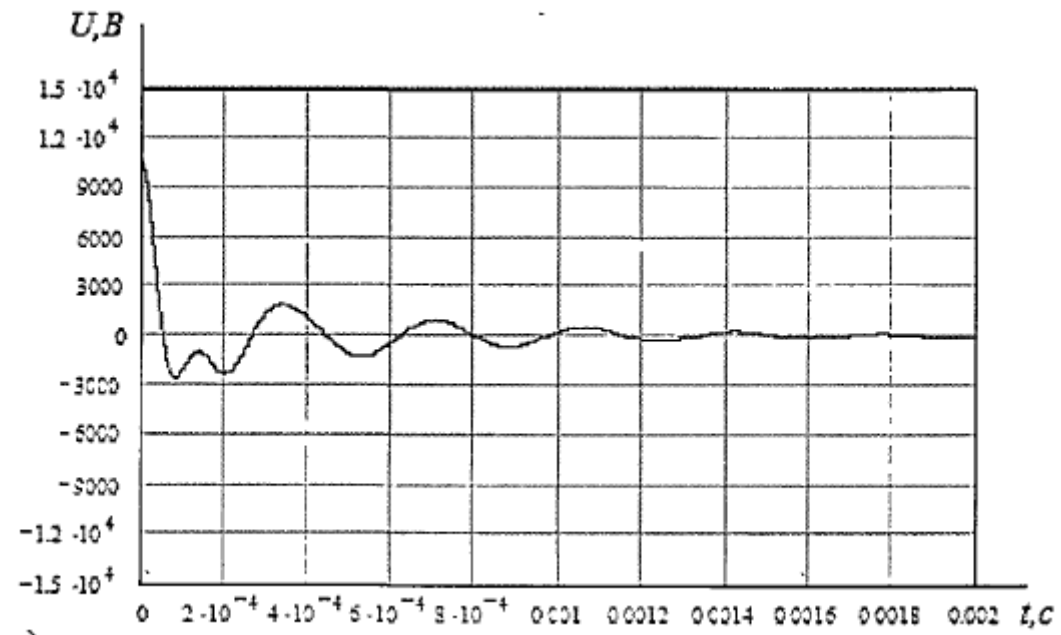


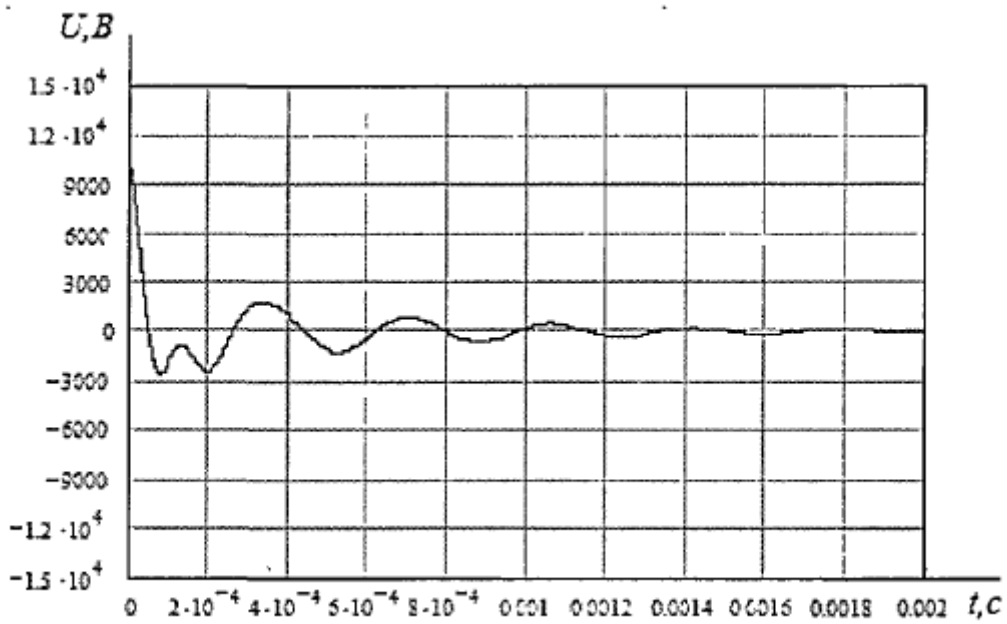
Рис. 2.5. - Зміни напруги на затискачах СД при $P = 520$ кВт, $\varphi = 10^\circ$ з параметрами RC-ланцюга $R = 12,5$ Ом и $C = 0,25$ мкФ а) $k_j = 0\%$; б) $k_j = 10\%$; в) $k_j = 50\%$; г) $k_j = 100\%$



6)

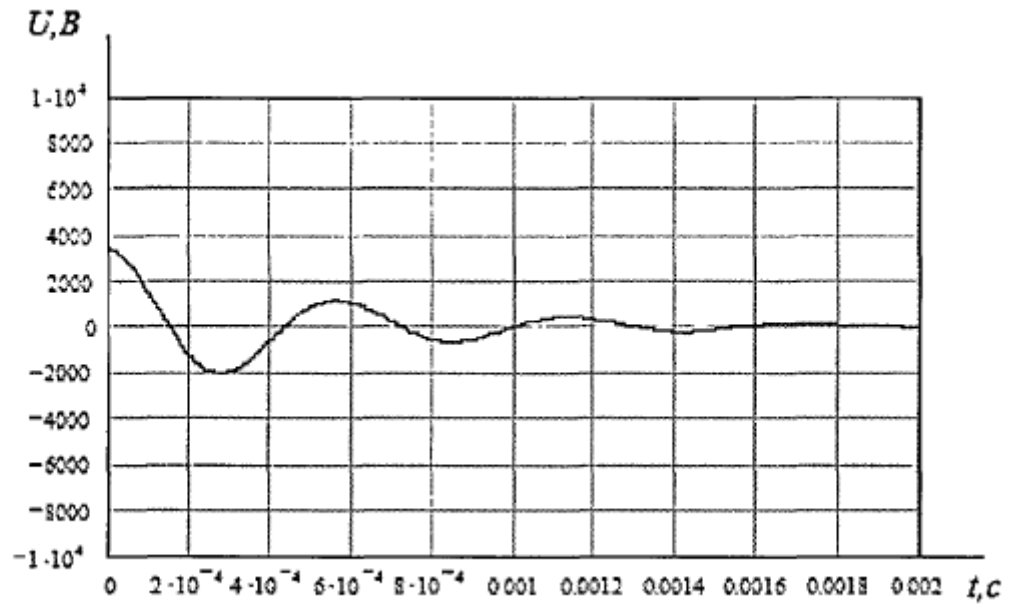


в)

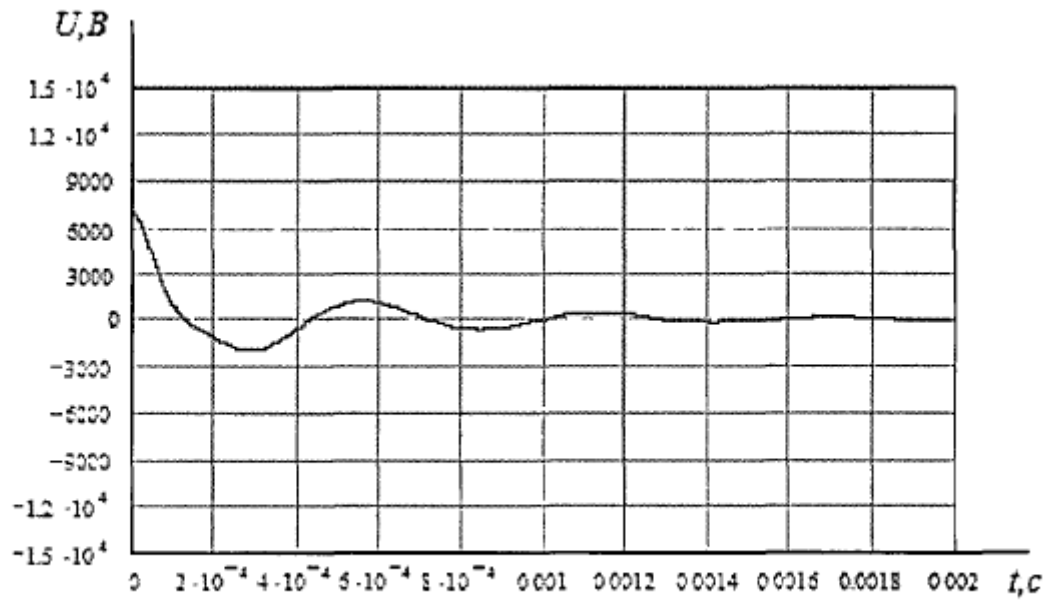


г)

Рис. 2.6. - Зміни напруги на затискачах СД при $P = 520$ кВт, $\varphi = 20^\circ$ з параметрами RC-ланцюга $R = 12,5$ Ом и $C = 0,1$ мкФ, а) $k_j = 0\%$; б) $k_j = 10\%$; в) $k_j = 50\%$; г) $k_j = 100\%$



a)



б)

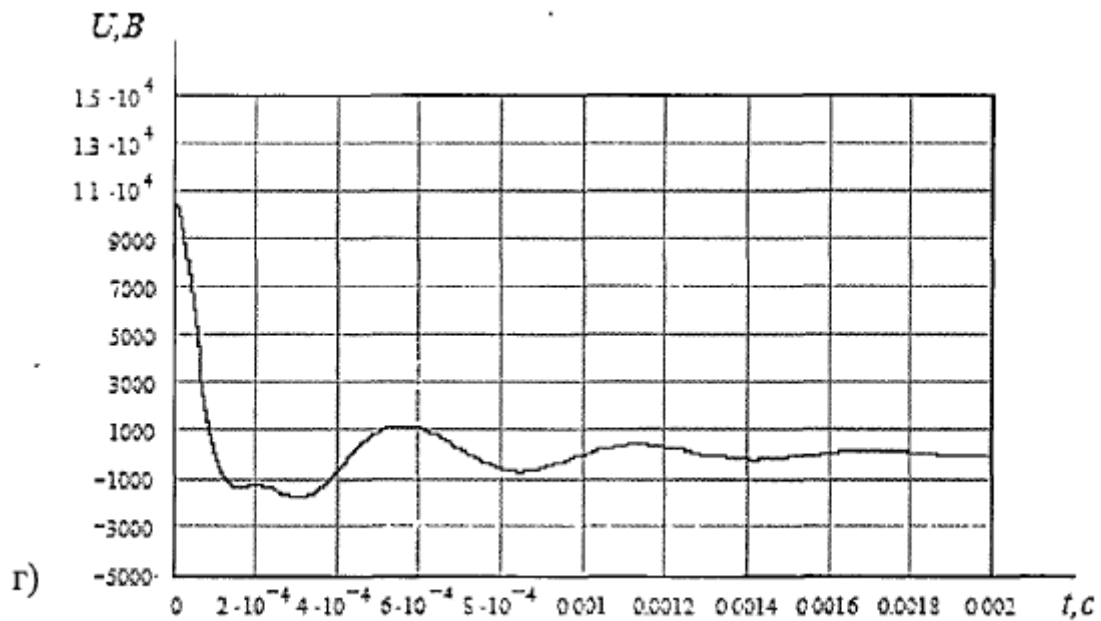
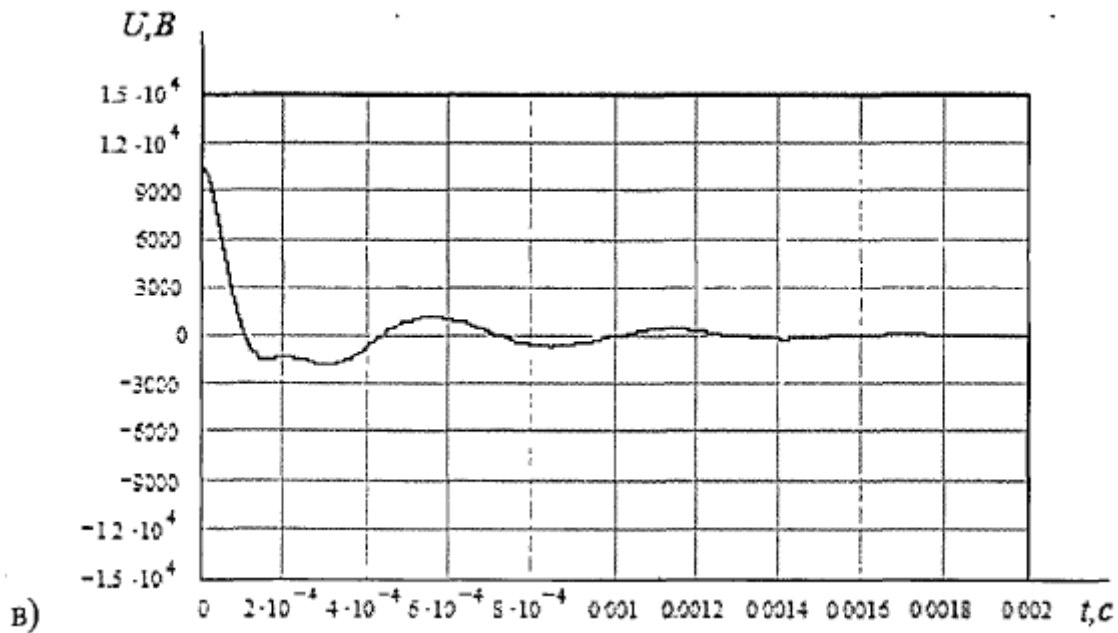


Рис. 2.7. - Зміни напруги на затискачах СД при $P = 520$ кВт, $\varphi = 20^\circ$ з параметрами RC-ланцюга $R = 12,5$ Ом і $C = 0,25$ мкФ, а) $k_j = 0\%$; б) $k_j = 10\%$; в) $k_j = 50\%$; г) $k_j = 100\%$

Згідно з математичним моделюванням, можна зробити висновок, що вищі гармоніки струму не впливають на рівень обмеження КП, якщо в якості засобу захисту застосовуються RC-ланцюги з параметрами $R = 12,5$ Ом і $C = 0,25$ мкФ.

Висновки:

1. Фізичні процеси, які виникають при відключенні електродвигунів від мережі напругою 6 - 10 кВ у присутності вищих гармонік струму, призводять до збільшення кратності КП через підвищення зрізу струму, якщо кут комутації не перевищує 36° відносно основної гармоніки. При кутах комутації від 36° до 54° спостерігається зниження зрізу струму, оскільки 5 і 7 гармоніки струму відносно основної гармоніки знаходяться у протифазі, що може призвести до зниження кратності КП. При кутах комутації від 54° до 90° можливе як зниження, так і зростання кратності перенапруг залежно від амплітудних значень 5-ї та 7-ї гармонік струму, які знаходяться у протифазі по відношенню одна до одної.

2. Математична модель КП у присутності вищих гармонік струму внаслідок зрізу струму без повторних запалювань дуги була розроблена на основі принципу суперпозицій, що дозволило надати фізичній моделі математичної наочності.

3. Відключення СД від мережі 6 кВ показало, що основним чинником впливу на величину КП є потужність двигуна, кут комутації і коефіцієнт викривлення синусоїдальної форми кривої струму. Зі збільшенням потужності двигуна за однакових умов кратність КП зменшується. Збільшення коефіцієнта викривлення синусоїдальної форми кривої струму і зростання кута комутації, при якому спостерігається зріз струму, приводять до зростання значення кратності КП.

4. На величину кратності КП для двигунів з потужністю більше 1000 кВт істотно впливає кут комутації, тоді як для двигунів потужністю менше 1000 кВт фактором є і кут комутації, і коефіцієнт викривлення синусоїдальності струмової кривої.

5. Використовуючи RC-ланцюги з параметрами: $C = 0,25 \text{ мкФ}$ і $R = 12,5 \text{ Ом}$, можна забезпечити ефективний захист електродвигунів від КП за наявності вищих гармонік струму в мережах 6 - 10 кВ. При цьому кратність КП не залежить від коефіцієнта викривлення синусоїдальності струмової кривої, потужності двигуна та кута комутації і не перевищує значення 1,75.

3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ КП

Аналіз наявних методів оцінки та прогнозування КП виявив, що найбільш практичним і достовірним є експрес-метод оцінювання КП. Перевагою цього методу є простота алгоритму для визначення величини КП для вакуумних та масляних вимикачів залежно від типу та потужності навантаження, довжини та перетину кабельної лінії. Величина КП у будь-якій точці системи «вимикач — кабельна лінія — електродвигун (трансформатор)» визначається за допомогою емпіричних кривих та знижувального коефіцієнта.

Емпіричні криві, показані на рисунках 1.4 та 1.5, відображають залежність максимальних кратностей КП від типу і потужності навантаження, а знижувальний коефіцієнт визначає часткове обмеження КП у розрахунковій точці. Застосування знижувального коефіцієнта залежать від частоти комутаційного імпульсу. Якщо частота комутаційного імпульсу перевищує 45 кГц, для визначення кратностей КП знижувальний коефіцієнт не застосовується. Значення цього коефіцієнта представлені у вигляді залежностей $k_n = f(l_{кл}; S_{кл})$ і відображені на рисунку 1.6.

Розглянутий метод дозволяє здійснювати оцінку КП при використанні масляних та вакуумних вимикачів, проте не враховує вплив електромагнітних та елегазових вимикачів на характер перенапруг. Таким чином, є неможливим комплексне його використання для оцінки та прогнозування КП ані на етапі проектування, ані під час експлуатації систем електропостачання з напругою 6 - 10 кВ.

До недоліків цього методу належить похибка розрахунків, яка може досягати 19%, що не забезпечує належного підходу до вибору захисного обладнання при КП. Похибки експрес-методів обумовлені недостатнім врахуванням факторів, що впливають на величину і характер КП: тип ізоляції кабелю, напруга мережі та наявність вищих гармонік.

Дослідження цих факторів і закономірностей появи КП при комутації електродвигунів і трансформаторів елегазовими та електромагнітними вимикачами дозволить розширити експрес-метод оцінки і прогнозування КП, що уможливить його використання як базу для розробки комплексного методу оцінки та прогнозування КП у системах електропостачання 6-10 кВ.

3.1. Дослідження впливу класу напруги мережі на величину понижувального коефіцієнта

Значення понижувальних коефіцієнтів, показаних на рисунку 1.6, найбільш наближені до кабелів напругою 6 кВ з паперовою ізоляцією в металевій оболонці типу ААШв, ААБлГ, АСГ, СГ, АСБГ, СБГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл та інших.

Дослідження виявили, що кабелі з напругою 10 кВ менш ефективно стримують КП, оскільки їхня власна ємність менша, ніж у кабелів з напругою 6 кВ.

Визначити у скільки разів понижувальний коефіцієнт для мереж 6 кВ відрізняється від коефіцієнта для мереж 10 кВ можна, враховуючи наступні умови: параметри електродвигунів або трансформаторів однакові, тому індуктивність навантаження є постійною, а величина зрізу струму у вимикачах не змінюється.

Вважаємо

$$k_U = \frac{U_{КП10}}{U_{КП6}}, \quad (3.1)$$

де $U_{КП6}$ й $U_{КП10}$ - перенапруги в мережах 6 кВ та 10 кВ.

У той же самий час

$$U_{кп} = i_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.2)$$

де i_0 - струм зрізу, А;

L – індуктивність електроприймача, Гн;

C – ємність електроприймача, Ф.

Вираз (3.1) з урахуванням рівняння (3.2) набуде вигляду:

$$k_U = \sqrt{\frac{C_6}{C_{10}}}, \quad (3.3)$$

де C_6 і C_{10} — власна ємність кабелю для мереж 6 кВ та 10 кВ, мкФ.

Ємність кабелю можна розрахувати за величиною струму однофазного замикання на землю:

$$C = \frac{I_{\text{пит}} \cdot l}{3U_\phi \omega}, \quad (3.4)$$

де $I_{\text{пит}}$ – питомий ємнісний струм кабелю в мережах 6-10 кВ, А/км;

l – довжина кабельної лінії, км;

ω - кутова частота, рад/с;

U_ϕ – фазна напруга мережі, кВ.

Значення питомих ємнісних струмів ($I_{\text{пит}}$) вказані в [7].

Враховуючи те, що фазна напруга в мережі 10 кВ у $\sqrt{3}$ раз більша за фазну напругу в мережі 6 кВ, а також вираз (3.4), формула (3.3) набуде вигляду:

$$k_U = 1,315 \cdot \sqrt{\frac{I_{\text{пит}6}}{I_{\text{пит}10}}}. \quad (3.5)$$

Зв'язок понижувальних коефіцієнтів у мережах 6 кВ порівняно з мережею 10 кВ можна виразити пропорцією:

$$k_{10} = \frac{k_6}{k_{10}} \cdot$$

Таким чином, понижувальний коефіцієнт для кабелів з напругою 10 кВ можна обчислити через понижувальний коефіцієнт для кабелів з напругою 6 кВ, з урахуванням поправочного коефіцієнта за класом напруги (k_U).

Коефіцієнт корекції для класу напруги кабелів із паперовою ізоляцією в броні зі стандартними перетинами 25 мм²; 35 мм²; 50 мм²; 70 мм²; 95 мм²; 120 мм²; 150 мм²; 185 мм²; 240 мм² обчислений за формулою (3.5) і дорівнює відповідно 1,487; 1,464; 1,487; 1,505; 1,486; 1,537; 1,513; 1,547; 1,515. Для реальних розрахунків можна прийняти середнє значення коефіцієнта k_U , яке складає 1,5. Максимальна різниця між середнім значенням коефіцієнта k_U та цими значеннями менше 3,3%.

Подібні результати були отримані і для кабелів з гумовою ізоляцією, що використовуються на підприємствах гірничодобування.

Для кабелів із поліетилену з перетином жили 50 мм²; 70 мм²; 95 мм²; 120 мм²; 150 мм²; 185 мм²; 240 мм² середнє значення коефіцієнта k_U становить 1,45.

Тоді, коригуючий коефіцієнт для кабелів зі зшитого поліетилену з напругою 10 кВ дорівнює 1,45, а для інших типів кабелів цього класу напруги цей коефіцієнт дорівнює 1,5.

3.2. Аналіз впливу типу кабельної магістралі на значення знижувального коефіцієнта

У підрозділі 3.1 були виконані дослідження з аналізу класу напруги на значення КП для однакових кабелів.

У цьому підрозділі обговорюється вплив різних типів ізоляції кабелів, які застосовуються у мережах 6 кВ або 10 кВ, на значення КП.

Коригуючий коефіцієнт по типу ізоляції кабелю ($k_{\text{тип}}$) для кабелів з пластиковою й зшитою поліетиленовою ізоляцією, гумовою порівняно до кабелів з паперовою ізоляцією в металевій оболонці можна розрахувати за формулою:

$$k_{\text{тип}} = \frac{U_{\text{кп}}}{U_{\text{кп.тип}}} , \quad (3.7)$$

де $U_{\text{кп}}$ - перенапруги в мережах, де використовують кабелі з паперовою ізоляцією, кВ;

$U_{\text{кп.тип}}$ - перенапруги в мережах, виконаних з кабелів з гумовою, пластиковою, ізоляцією та ізоляцією зі зшитого поліетилену, кВ.

З огляду на формули (3.2) і (3.4) співвідношення (3.7) виглядає так:

$$k_{\text{тип}} = \sqrt{\frac{I_{\text{уд.тип}}}{I_{\text{нит}}}} , \quad (3.8)$$

де $I_{\text{пит}}$ - питомий струм кабельної лінії з паперовою просоченою ізоляцією певного класу напруги і перетину, А/км;

$I_{\text{уд.тип}}$ - питомий струм кабельної лінії з гумовою, пластиковою ізоляцією і зшитою поліетиленовою ізоляцією, А/км.

Порівнюючи представлені дані у [7], за допомогою формули (3.6) отримуємо, що поправочний коефіцієнт, що залежить від типу кабелю відносно кабелю з паперовою просоченою ізоляцією у мережах 6 кВ, становитиме 1,4; 1,25 та 2,6 відповідно для кабелів з пластиковою та гумовою ізоляцією; для кабелів броньованих та для кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

У мережах 10 кВ значення поправочного коефіцієнта відносно типу кабелю до кабелю з паперовою ізоляцією буде: для кабелів з пластиковою та гумовою ізоляцією - 1,39; для кабелів у металевих оболонках з пластиковою ізоляцією - 1,25, а для кабелів з ізоляцією зі зшитого

поліетилену - 2,7.

При цьому зазначені значення поправочного коефіцієнта не перевищують 5% для стандартних перетинів сучасних типів кабелів, що є прийнятним для практичного використання.

З огляду на те, що відношення поправочних коефіцієнтів для кабелів з напругою 6 і 10 кВ не перевищує 4%, можна прийняти такі значення коефіцієнтів, рівні 1,4; 2,25 і 2,6, для кабелів з пластиковою і гумовою ізоляцією; для кабелів броньованих і для кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену відповідно.

Значення понижувального коефіцієнта буде визначатися за формулою:

$$k_{II} = \frac{k_6}{k_U \cdot k_{тип}}, \quad (3.9)$$

де k_6 - понижувальний коефіцієнт, що визначається за графіками на рисунку 1.6;

k_U і $k_{тип}$ - поправочні коефіцієнти, враховують клас напруги мережі і тип кабельної лінії.

3.3. Вплив вищих гармонік струму на перенапруги, що виникають під час комутації силових трансформаторів

Залежність поправочного коефіцієнта кратності КП від коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої струму показана на рисунку 3.1.

Значення цього поправочного коефіцієнта визначалось за формулою:

$$k_{БГ} = \frac{K_{\max}}{K_{БГ}} \quad (3.10)$$

де $K_{\max}$ - максимальна кратність КП у мережах 6 - 10 кВ за відсутності вищих гармонік струму;

$K_{БГ}$ - кратність КП у мережах 6 - 10 кВ при наявності вищих гармонік.

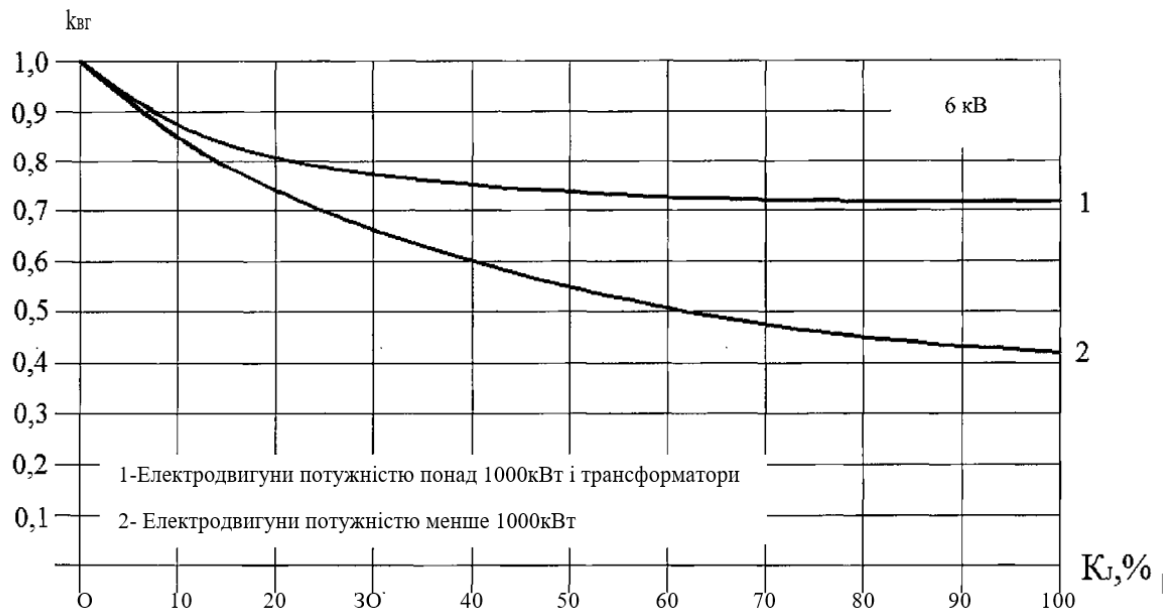


Рисунок 3.1 - Залежність поправочного коефіцієнта кратності КП від коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої струму

3.4. Визначення коефіцієнта коригування кратності КП

Для мереж 6 кВ, що містять трансформатори та електродвигуни, величина перенапруги обчислюється за формулою:

$$U_{КП6} = \frac{K_{\max} U_{H6}}{k_{\Pi}}, \quad (3.11)$$

де $K_{\max}$ - найвища кратність перенапруги на клеммах навантаження при довжині кабельної лінії до 50 м;

U_{H6} - номінальна напруга мережі, кВ;

k_{Π} – коефіцієнт зниження (визначається за кривими, показаними на рисунку 1.6).

Беручи до уваги вплив типу кабелю та існування вищих гармонік, вираз (3.11) набуває вигляду:

$$U_{КП6} = \frac{1}{k_{ВГ} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{ТИП}} K_{\max} U_{H6}. \quad (3.12)$$

Кратність перенапруги у вказаній точці дорівнюватиме:

$$K = \frac{1}{k_{ВГ} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{ТИП}} K_{\max}. \quad (3.13)$$

З виразу (3.13) значення коефіцієнта коригування дорівнює:

$$k_{к.к.6} = \frac{1}{k_{ВГ} \cdot k_{\Pi} \cdot k_{ТИП}}. \quad (3.14)$$

В мережах з напругою 10 кВ, перенапруга буде визначена за формулою:

$$U_{КП10} = \frac{k_u \cdot K_{\max} \cdot U_{н6}}{k_{БГ} \cdot k_{П} \cdot k_{ТИП}} K_{\max} , \quad (3.15)$$

Кратність перенапруги в мережах з напругою 10 кВ буде такою:

$$K_{10} = \frac{U_{КП10}}{U_{н10}} = \frac{U_{КП10}}{\sqrt{3} \cdot U_{н6}} . \quad (3.16)$$

Вираз (3.16) з урахуванням формули (3.15) можна переписати так:

$$K_{10} = \frac{k_u}{\sqrt{3} \cdot k_{БГ} \cdot k_{П} \cdot k_{ТИП}} K_{\max} . \quad (3.17)$$

Таким чином, коефіцієнт коригування для мереж з напругою 10 кВ буде дорівнювати:

$$k_{к.к.10} = \frac{k_u}{\sqrt{3} \cdot k_{БГ} \cdot k_{П} \cdot k_{ТИП}} . \quad (3.18)$$

Коефіцієнт коригування для мереж 10 кВ можна виразити через коефіцієнт для мережі 6 кВ:

$$k_{к.к.10} = \frac{k_u}{\sqrt{3} \cdot k_{БГ} \cdot k_{П} \cdot k_{ТИП}} . \quad (3.19)$$

Відповідно, застосування коефіцієнта коригування $k_{к.к.}$ дозволяє брати до уваги вплив напруги мережі, тип і параметри кабельної лінії, а також наявність вищих гармонік на характер і величину КП.

На основі цього коефіцієнта та урахуванням результатів досліджень, наведених у [5], можна створити комплексну методику для оцінки та прогнозування КП у радіальних електросистемах 6 – 10 кВ.

3.5. Комплексна методика оцінки та прогнозування КП у мережах 6-10 кВ

Аналіз результатів досліджень комутації електродвигунів та трансформаторів за допомогою масляних, електромагнітних, вакуумних і елегазових вимикачів представлений на рисунках 3.2, 3.3 і 3.4.

Зміна коефіцієнта зниження наведена на рисунку 1.6, а значення коефіцієнта, який враховує вплив вищих гармонік на КП, представлено на рисунку 3.1.

Слід зауважити, що доцільність використання понижувального коефіцієнта для оцінки комутаційних перенапруг обмежується частотою комутаційного імпульсу на затискачах навантаження. Понижувальний коефіцієнт не застосовується при частоті імпульсу 45 кГц і більше. Для обчислення кратності КП у точці з'єднання кабельної лінії з вимикачем понижувальний коефіцієнт використовується безвідносно до частоти комутаційного імпульсу.

Далі представлені складові частини методики для оцінки та прогнозування КП у мережах 6-10 кВ.

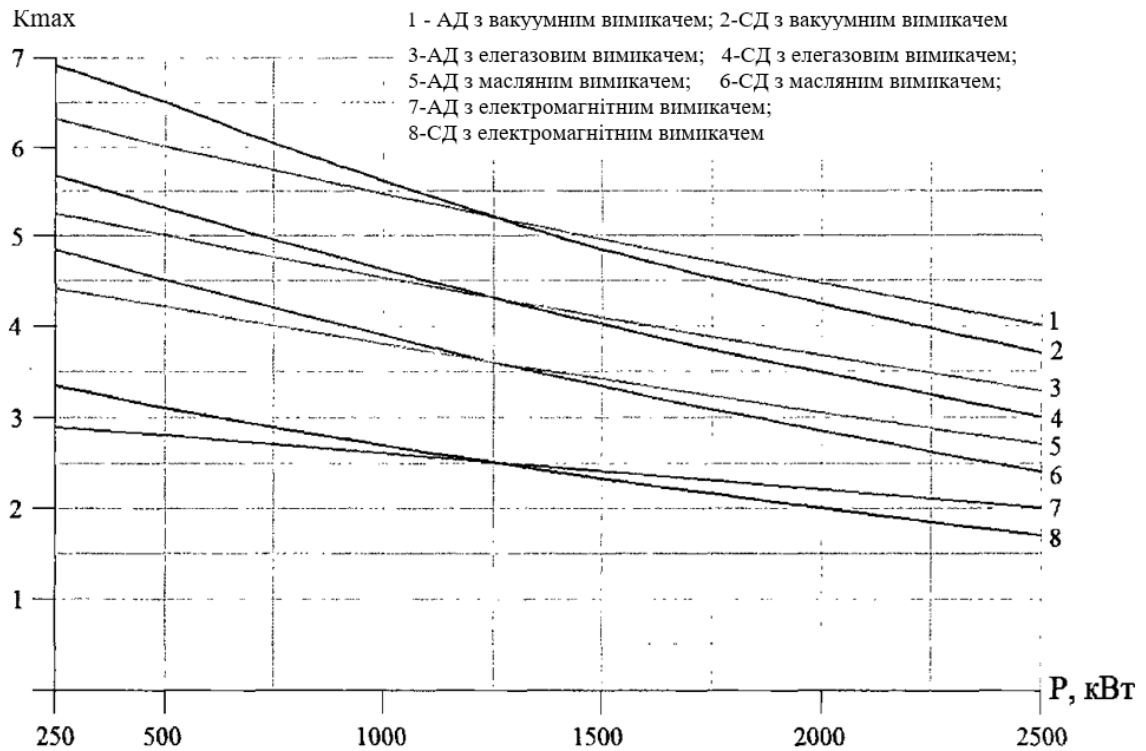


Рисунок 3.2 - Залежності максимальних значень кратності комутаційних перенапруг для СД і АД від типу вимикача

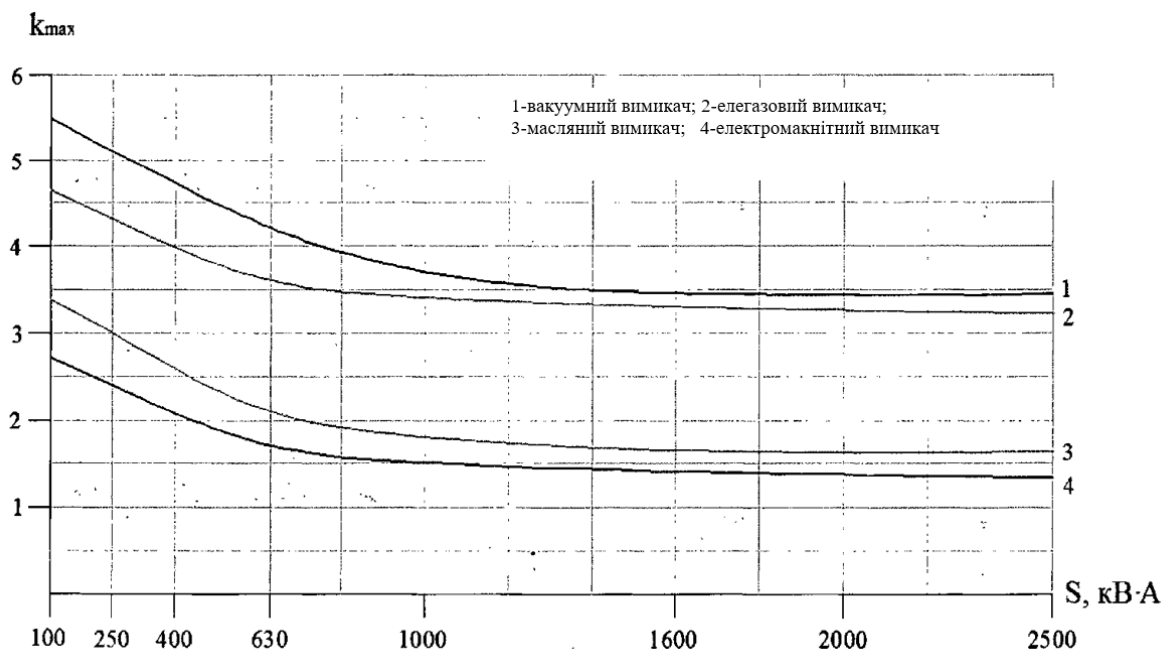


Рисунок 3.3 - Залежності максимальних значень кратності КП для сухих трансформаторів від типу вимикача

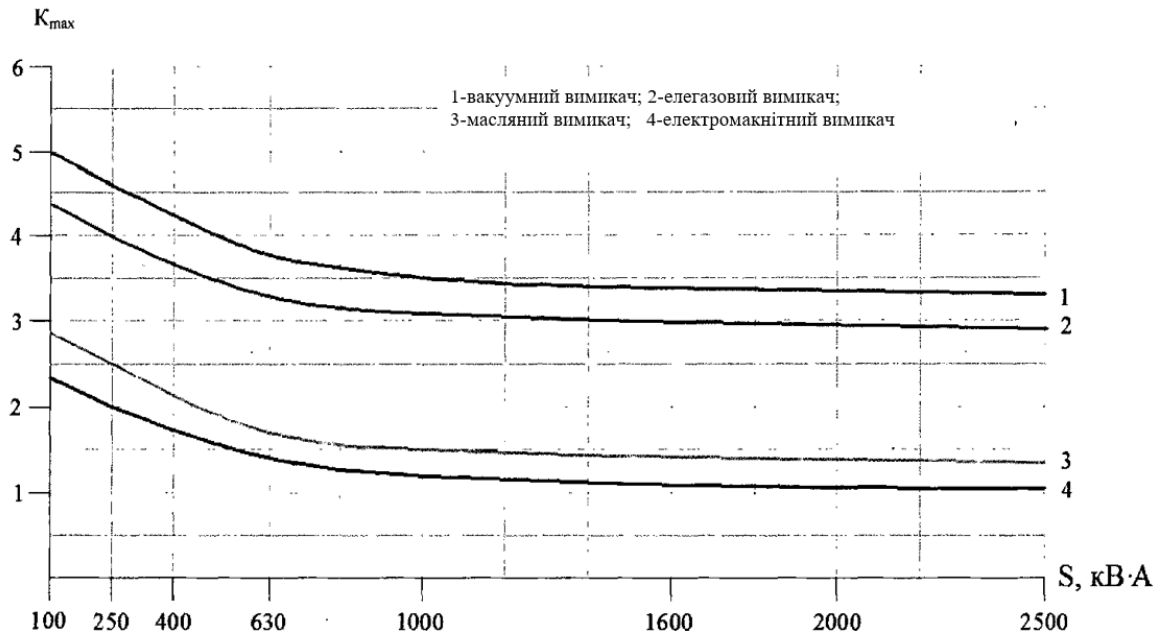


Рисунок 3.4 – Графік залежності максимальних значень кратності КП для масляних трансформаторів від типу вимикача

3.5.1. Оцінка перенапруг під час комутації електричних двигунів та трансформаторів електромагнітними і масляними і вимикачами

На рисунку 3.5 наведено розрахункову схему для визначення КП в точках з'єднання кабельної лінії з вимикачем (точка К1) та електричним двигуном (точка К2)

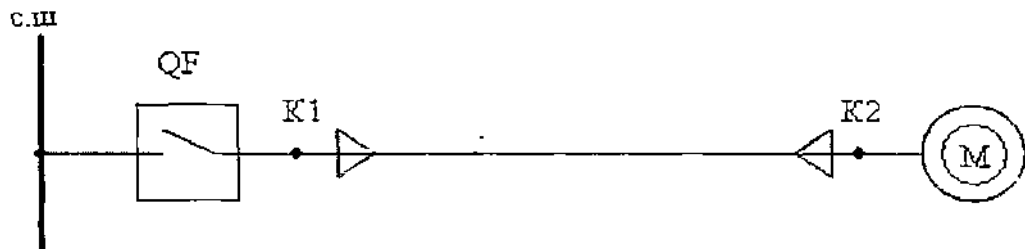


Рисунок 3.5 - Розрахункова схема для визначення кратностей КП

При відключенні електродвигунів та трансформаторів електромагнітними і масляними вимикачами частота імпульсу не перевищує 38 кГц, тому для оцінки КП потрібно використовувати понижувальний коефіцієнт. Розрахунки кратності КП слід виконувати в такій послідовності:

1. Величина КП на затискачах трансформатора або двигуна при комутації (точка К2) визначається за наступними формулами:

$$K_{II10}^{(2)} = \frac{k_u}{\sqrt{3}} k_{к.к.6} \cdot K_{\max} , \quad (3.20)$$

$$K_{II6}^{(2)} = k_{к.к.6} \cdot K_{\max} , \quad (3.21)$$

в яких $K_{\max}$ - максимальне значення кратності КП на затискачах навантаження, вибране за кривими, наведеними на рисунках 3.2 і 3.3 в залежності від типу та потужності трансформатора або електродвигуна в залежності від типу вимикача.

2. Величина КП при відключенні в точці з'єднання кабельної лінії і вимикача (точка К1) визначається за виразами:

$$K_{II6}^{(1)} = \frac{K_{II6}^{(1)}}{k_{II} \cdot k_{ТIII}} , \quad (3.22)$$

$$K_{II10}^{(1)} = \frac{K_{II10}^{(2)}}{k_{II} \cdot k_{ТIII}} . \quad (3.23)$$

3. Величина КП в мережах 6 - 10 кВ при включенні (точка К2) на затискачах трансформатора або електродвигуна визначається за формулою:

$$K_{П.ВКЛ}^{(2)} = \frac{4,2}{k_{П} \cdot k_{ТПП}} . \quad (3.24)$$

4. Величина КП при включенні (точка К1) в точці з'єднання кабельної лінії і вимикача визначається за виразом:

$$K_{П.ВКЛ}^{(1)} = \frac{K_{П.ВКЛ}^{(2)}}{k_{П} \cdot k_{ТПП}} . \quad (3.25)$$

3.5.2. Оцінка КП під час комутації електродвигунів потужністю до 1250 кВт і до 2500 кВт елегазовим та вакуумним вимикачами

Відповідно до дослідження, наведеного в розділ 3.2, при комутації електродвигунів потужністю до 1250 кВт та електродвигунів потужністю до 2500 кВт частота імпульсу перевищує 45 кГц, отже, розрахунки КП слід виконувати в такій послідовності:

1. Величина КП при відключенні (точка К2) на затискачах електродвигуна визначається за формулою:

$$K_{П6}^{(2)} = \frac{K_{\max}}{k_{БГ}} . \quad (3.26)$$

$$K_{П10}^{(2)} = \frac{k_u K_{\max}}{\sqrt{3} k_{БГ}} . \quad (3.27)$$

2. Величина КП при відключенні вимикачем кабельної лінії (точка К1) визначається за формулою:

$$K_{П6}^{(1)} = \frac{K_{П6}^{(2)}}{k_{П} \cdot k_{ТПП}} , \quad (3.28)$$

$$K_{П10}^{(1)} = \frac{K_{П10}^{(2)}}{k_{П} \cdot k_{ПШ}} . \quad (3.29)$$

3. Величина КП на клеммах двигуна та вимикача під час включення (точка К1 і К2) визначається за формулами (3.24) і (3.25).

3.5.3. Оцінка КП під час комутацій трансформаторів і електродвигунів потужністю понад 1250 кВт і 2500 кВт відповідно елегазовими і вакуумними вимикачами

Під час комутацій трансформаторів і електродвигунів з потужністю понад 1250 кВт і більше 2500 кВт відповідно елегазовими і вакуумними вимикачами частота імпульсу не перевищує 45 кГц, отже, розрахунки КП здійснюються за методикою, викладеною в підрозділі 3.5.1.

Комплексна методика розрахунку КП в мережах напругою 6-10 кВ складається з трьох основних частин, встановлених в підрозділі 3.5.1 - 3.5.3.

4. ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ КП

На сьогодні для обмеження КП застосовують такі засоби й пристрої: RC-обмежники, кабельні лінії, RC-гасники й ОПН.

4.1. Кабельні лінії

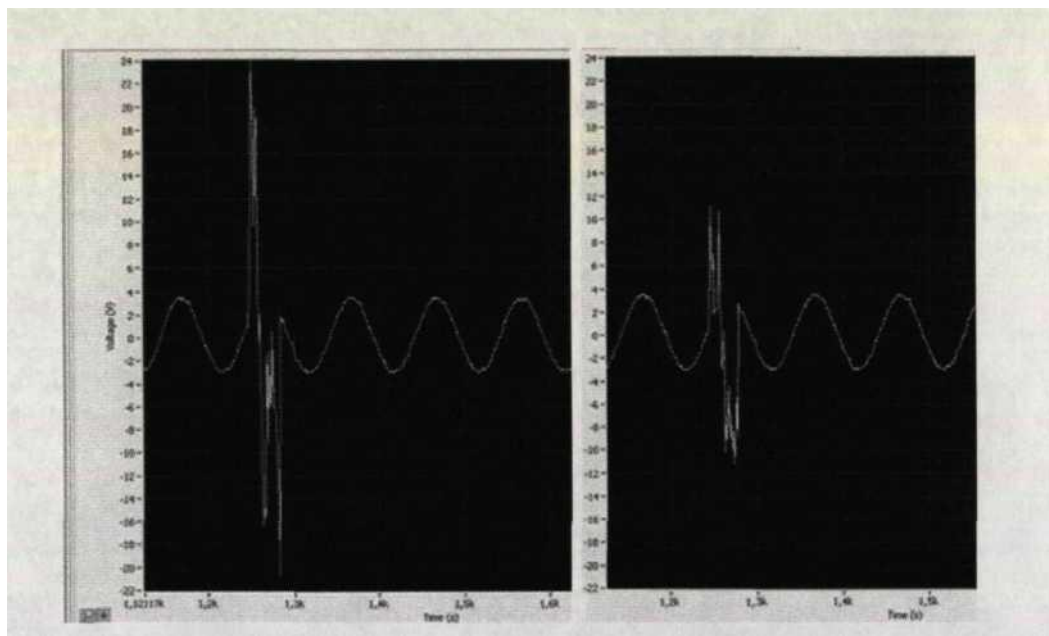
Зазвичай передбачається, що обмеження КП може бути досягнута шляхом розподілу мінімальної довжини кабелю між високовольтним вимикачем і навантаженням. Захисний ефект кабельної лінії полягає в зниженні хвильового опору комутованого ланцюга за рахунок власної ємності кабелю. Параметри кабелю, перемикача та індуктивного навантаження є вирішальними при формуванні КП.

Вважається, що збільшення потужності системи кабель-електродвигун і активного-індукційного опору кабелю призводить до зменшення амплітуди і крутизни імпульсу КП, а також до зменшення кількості повторних запалювань дуги в вимикачі. У роботі [8] довели, що якщо довжина кабельної лінії між вимикачем і навантаженням перевищує 100 м, то відключення струму вимикача не викликає перенапруги. Цей висновок зроблено без урахування частоти комутаційного імпульсу.

Виявляється, що при частоті імпульсів вище 45 кГц кабельна лінія перетворюється з "гладжувального" фільтра на "замикаючий". Це означає, що при високих частотах комутаційних імпульсів ($f \leq 45$ кГц) збільшується не тільки поздовжній індукційний опір кабелю, але і його активне поздовжнє опір через поверхневий ефект. Це призводить до того, що максимальна КП виникає на клеммах електродвигуна або трансформатора при відключенні від основного джерела живлення вакуумним або газовим вимикачем, а мінімальна КП виникає в точці з'єднання вимикача і кабельної лінії.

Цей ефект демонструється за допомогою осцилограми, показаної на рисунку 4.1.

З представленої форми сигналу видно, що на клеммах електродвигуна кратність перенапруги становить $4,9 U_{\text{ном}}$, а на клеммах перемикача кратність перенапруги становить $2,4 U_{\text{ном}}$, і амплітуда імпульсу перемикання зменшується, коли перемикач знаходиться далеко від індуктивного навантаження. Частота комутаційних імпульсів становила 63 кГц, довжина кабельної лінії - 370м, а поперечний переріз жили кабелю - 70 мм². Детальне дослідження впливу довжини та поперечного перерізу кабельної лінії на розмір та характер КП описано в [8].



а) комутаційне перенапруження на клеммах електродвигуна;

б) комутаційне перенапруження на клеммах вимикача

Рис. 4.1-осцилограма відключення СД потужністю 500 кВт за допомогою елегазового вимикача

Отже, якщо частота комутуючих імпульсів не перевищує 45 кГц, можна використовувати кабельну лінію як засіб обмеження передачі. В іншому випадку кабельна лінія не сприяє зменшенню кратності КП на клеммах навантаження.

4.2. Нелінійні обмежувачі перенапруг

Нелінійний обмежувач перенапруги широко використовується для захисту електродвигунів і силових трансформаторів від КП.

Аналіз сучасних ОПН, які застосовуються в мережах 10 кВ, показує, що залишкова напруга на ОПН в момент спрацьовування може коливатися від 22 до 24 кВ, а для обмежувачів перенапруг у мережах 6 кВ - від 13 до 14 кВ. Таким чином, сучасні ОПН знижують КП до рівня $(2,2 - 2,4)U_{ном}$. Цей рівень обмеження КП може бути небезпечним для ізоляції електродвигунів, оскільки перевищує допустиму кратність перенапруги, яка дорівнює 1,8, проте не є небезпечним для ізоляції обмоток силових трансформаторів, оскільки допустима кратність перенапруги для трансформаторів складає 2,8, що перевищує рівень обмеження КП ОПНом.

Недавні дослідження показали, що при частоті імпульсів перемикання вище 45 кГц в ОПН спостерігається "зона загасання". "Зона загасання" характеризується тим, що ОПН не реагує на виникнення перенапруги, його амплітуда може перевищувати робочий поріг (граничний рівень) ОПН в кілька разів. Це пов'язано з тим, що при перемиканні електродвигуна потужністю від 200 кВт до 2500 кВт спостерігається частота імпульсів перемикання вище 45 кГц, що може привести до руйнування ізоляції обмоток високовольтних електродвигунів. Тривалість "зони завмирання", як правило, не перевищує 2-3 періоди коливань напруги комутаційного імпульсу і складає менше $4 \cdot 10^{-5}$ с [7].

Іншим недоліком роботи ОПН є погана термічна стійкість у режимі однофазного замикання на землю.

Встановлено, що в режимі однофазного замикання на землю з переривчастим виникненням дуги кратність перенапруги може перевищувати напругу мережі в 3,5-4 рази [8]. Частота, з якою горить дуга, може досягати 5-7 кГц. Це вказує на те, що частотна характеристика дуги

дозволяє уникнути "зони загасання" при роботі ОПН. Якщо перенапруга в режимі однофазного замикання на землю перевищує порогове значення обмежувача, може спрацювати ОПН.

Перенапруги в режимі однофазного замикання на землю здебільшого виникають на неушкоджених фазах мережі. У момент горіння дуги спрацювання ОПН, які підключені до неушкоджених фаз, призводить до короткочасного короткого замикання на землю і ОПН. Цей процес ілюструє схема на рис. 4.2.

Затримка переривання лінії при однофазному замиканні на землю через низьку селективність захисту зазвичай призводить до теплового пробою ОПН. Це припущення підтверджується статистичними даними про інтервали відмов обмежувачів перенапруг, що працюють в мережах 6-10кВ.

Типове термічне руйнування ОПН представлено на рис. 4.3.

Тому основними недоліками роботи розрядника є «зона завмирання» при частоті комутаційних імпульсів вище 45 кГц і низька термічна стійкість в режимі однофазного замикання на землю.

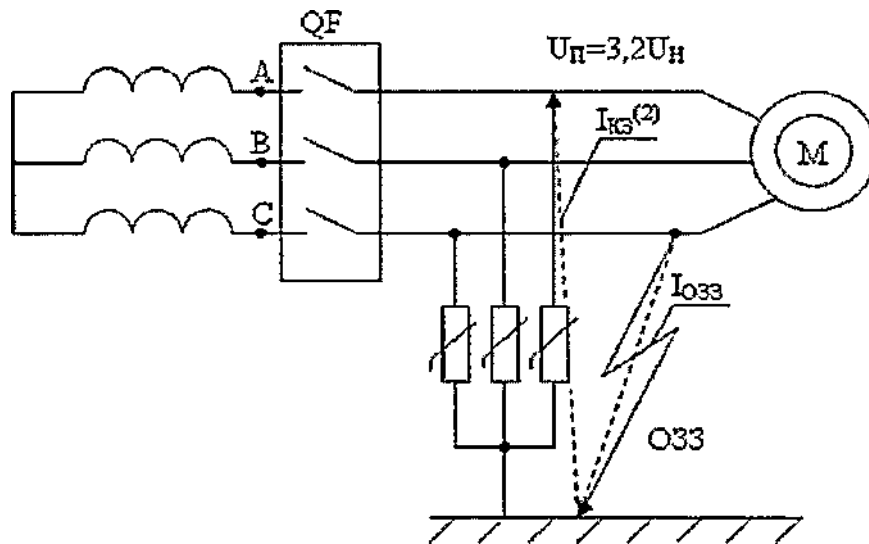


Рис. 4.2- Процес, при якому у високовольтній мережі виникає двофазне коротке замикання, коли спрацює розрядник в режимі однофазного замикання на землю.



Рис. 4.3 - Типове термічне руйнування ОПН в умовах однофазного замикання на землю

4.3. Резистивно-ємнісні обмежники перенапруг

Принцип дії RC-обмежувачів ґрунтується на зменшенні хвильового опору об'єкта, що захищається, завдяки зростанню підключеної ємності. RC-обмежувачі не мають «зони нечутливості». Це пов'язано з тим, що завдяки своїй ємності частота комутаційного імпульсу не більше 3,5 кГц.

Також використання конденсатора в RC-обмежнику дозволяє

зменшити швидкість збільшення напруги на передньому фронті комутаційного імпульсу, оскільки завдяки ємності конденсатора зростає приєднана ємність на затискачах електроприймача:

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{i_0}{C}, \quad (4.1)$$

Це позитивно впливає на експлуатаційні якості ізоляції обмоток електродвигунів.

Граничний рівень комутаційної перенапруги RC-обмежувача знаходиться в діапазоні (1,45 - 1,7) $U_{ном}$, що нижче допустимого рівня перенапруги, яку може витримати ізоляція високовольтних двигунів і трансформаторів.

Недолік RC-обмежника полягає в підвищенні ємнісного струму під час однофазного замикання на землю. У такому режимі RC-обмежник додає додатковий ємнісний струм 0,7А до мережі, що обумовлено з'єднанням елементів (RC-ланцюгів) за схемою «зірка» із заземленою нейтральною точкою. Це збільшення ємнісного струму ОЗЗ негативно впливає на забезпечення електробезпеки, адже зі збільшенням струму однофазного замикання зростають напруги дотику та кроку.

Широке впровадження RC-обмежників може спричинити зміну режиму нейтралі у мережах 6 - 10 кВ з ізолюваної на компенсовану нейтраль. У мережах з компенсованим режимом нейтралі знадобиться встановлення потужніших дугогасячих реакторів, що призводить до додаткових економічних витрат.

Варто зазначити, що RC-обмежники можуть зазнати термічного руйнування через тривалий вплив струмів вищих гармонік, що обумовлено конструкцією RC-обмежника.

Сучасні RC-обмежники мають ємність 0,25 мкФ на фазу. З цією ємністю послідовно підключено резистор 50 Ом, потужність якого становить 60 Вт. RC-ланцюг розміщено в спеціальному герметичному

корпусі. Через протікання струмів вищих гармонік ємнісний опір знижує, а потужність розсіювання на резисторі зростає. Тривале протікання струмів вищих гармонік призводить до інтенсивного нагрівання резисторів, що викликає термічне руйнування RC-обмежника. Враховуючи, що RC-ланцюги з'єднані за схемою «зірка» із заземленою нейтраллю, по фазних RC-ланцюгах проходить увесь спектр струмів вищих гармонік, що сприяє інтенсивнішому нагріванню RC-обмежника.

Експлуатація RC-обмежників для зниження КП на трансформаторах для плавки виявилася невдалою. Середній час роботи до відмови становив 18 місяців, адже при роботі пічних трансформаторів генеруються вищі гармоніки струму в широкому спектрі. Тривалість існування вищих гармонік струму обмежена часом плавки, який варіюється від 1,5 до 3 годин.

На рис. 4.4 представлений приклад термічного руйнування RC-обмежника.

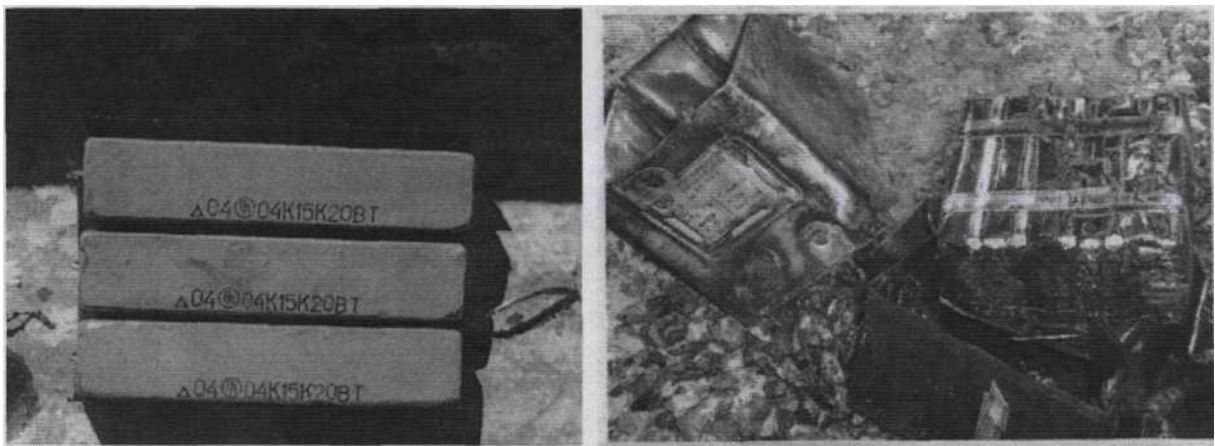


Рисунок 4.4 — Зовнішній вигляд термічного руйнування RC-обмежника

Отже, основний недолік RC-обмежника полягає у його впливі на величину та природу струму однофазного замикання на землю, а також на умови електробезпеки та недостатню термічну стійкість до струмів вищих гармонік.

4.4. Резисторно-ємнісні гасники перенапруги (RC гасники)

Принцип дії RC- гасника подібний до принципу дії RC-обмежувача. Різниця між RC- гасником і RC-обмежувачем полягає в способі з'єднання RC-ланцюга. RC-ланцюги RC- гасника зібраний за схемою «трикутник». Це обмежує діапазон струму, що протікає через RC-ланцюг. Гармоніки, кратні трьом, не протікають по RC-ланцюгах, що підвищує термічну стійкість RC-гасника до зовнішніх гармонік струму. Схема з'єднання “трикутник” не впливає на величину і характер струму однофазного замикання на землю.

Отже, RC-гасники краще витримують термічний вплив струмів вищих гармонік і не впливають на величину та характер струму при однофазному замиканні на землю.

На основі вищевикладеного матеріалу можна дійти висновку, що RC-гасники є найбільш надійними пристроями для обмеження КП на сучасному етапі.

ВИСНОВКИ

В наданій роботі розглядались питання вдосконалення методів оцінки і прогнозування комутаційних перенапруг в системах електропостачання 6-10 кВ.

Розроблено математичну модель КП за наявності вищих гармонік струму в результаті зрізу струму без повторного запалювання дуги за принципом суперпозиції, що дозволяє наочно представити фізичну модель з точки зору математики.

Коли синхронний двигун був відключений від мережі напругою 6 кВ, було показано, що основними факторами, що впливають на величину КП, є потужність двигуна, коефіцієнт кривизни кривої синусоїдального струму і кут перемикавання. При збільшенні потужності двигуна, при інших рівних умовах, кратність КП зменшується. Збільшення коефіцієнта кривизни синусоїдальної кривої струму і збільшення кута перемикавання, при якому спостерігається зріз струму, призводить до збільшення значення кратності КП.

Для двигунів потужністю понад 1000 кВт кут перемикавання істотно впливає на збільшення кратності КР, тоді як для двигунів потужністю менше 1000 кВт значення КП залежить як від кута перемикавання, так і від коефіцієнта кривизни кривої синусоїдального струму.

Використання RC-схеми з параметрами: $C = 0,25$ мкФ і $R = 12,5$ Ом - при наявності вищих гармонік струму в мережі 6-10 кВ забезпечує надійне обслуговування електродвигуна від КП, при цьому кратність КП не залежить від потужності двигуна, коефіцієнта кривизни синусоїдальної кривої струму і кута перемикавання не перевищує 1,75.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сегеда М. С. Математичне моделювання в електроенергетиці: навч. посіб. / Сегеда М. С. – Львів:, 2002. – 300 с. 2. Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л. Електричні мережі і системи. –К.:НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.
2. Сегеда М. С. Математичне моделювання хвильових та електромагнетних процесів в електроенергетичних системах: монографія / Сегеда М. С. – Львів, 2002. – 152 с.
3. Бржезицький В.О., Ісакова А.В., Рудаков В.В. та ін.. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ" – Торнадо, 2005. – 930с.
4. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
5. Теоретичні основи електротехніки: підручник / В.С.Хілов. – Д.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, 433 с. 2021 рік.
6. Перхач В. С. Математичні задачі електроенергетики / В. С. Перхач. — Львов. : Вища школа, 1982. — 378 с.
7. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
8. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітніх програм «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 104 с.

9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

10. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

11. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.]; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.

12. Правила улаштування електроустановок. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України). Наказ Міністерства енергетики України від 21.07.2017 №476, 2017. – 617 с.

13. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ

Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках:

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по інших причинах (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т.п.).

Еквівалентом землі може слугувати вода ріки чи моря, кам'яне вугілля в корінному заляганні тощо.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучим металічним частинам, що опинилися під напругою внаслідок замкнення на корпус та по інших причинах.

Захисне заземлення потрібно відрізнати від робочого заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Робоче заземлення – навмисне сполучення з землею окремих точок струмової цепі, наприклад нейтральних точок обмоток генераторів, силових та вимірювальних трансформаторів, дугогасячих апаратів, реакторів поперечної компенсації в дальніх лініях електропередач, а також фази при використанні землі в якості фазного чи оберненого проводу. Робоче заземлення призначене для забезпечення належної роботи електроустановки в нормальних чи аварійних умовах і здійснюється безпосередньо (тобто шляхом з'єднання провідником частин, що заземлюються із заземлювачем) чи через спеціальні апарати – пробивні запобіжники, розрядники, резистори тощо.

Заземлення блискавкозахисту – навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підйом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого обладнання).

Область застосування захисного заземлення:

- ✓ *мережі напругою до 1000 В* змінного струму – трифазні трипроводні з ізолюваною нейтраллю, однофазні двопроводні, ізолювані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізолюваною середньою точкою обмоток джерела струму;
- ✓ *мережі напругою вище 1000 В* змінного і постійного струму з будь – яким режимом нейтралі чи середньою точкою обмоток джерела струму.

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час вельми ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах.

Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати працюють люди”, “Не відкривати працюють люди”.

3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.
5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Захисні заходи при пошкодженні ізоляції:

Контроль ізоляції – вимірювання її активного або омичного опору для знаходження дефектів і попередження замкнень на землю та коротких замикань (КЗ). Стан ізоляції в значній мірі визначає степінь безпеки експлуатації електроустановок, оскільки опір ізоляції в мережах з ізолюваною нейтраллю визначає величину струму замикання на землю, а отже і струму, що проходить через людину. В мережах напругою вище 1000 В зменшення опору ізоляції майже завжди призводить до пробоя ізоляції і до глухого замикання на землю.

При глухо заземленій нейтралі струм замикання на землю і струм, що проходить через людину, не залежать від величини опору ізоляції. Але при поганому стані ізоляції часто виникають її пошкодження, що призводить до глухих замкнень на землю (корпус) і до КЗ. При замиканні на землю і не спрацюванні захисту на відключення виникає небезпека ураження електричним струмом, так як не струмоведучі металічні частини, з якими людина нормально має контакт, виявляються під напругою.

Щоб попередити замикання на землю і інші пошкодження ізоляції, при яких виникає небезпека ураження електричним струмом, а також виходить з ладу обладнання, необхідно проводити випробування підвищеною напругою та контроль опору ізоляції.

Приймально-здавальні випробування проводяться при введенні в експлуатацію наново змонтованих і виведених з ремонту електроустановок. Об'єм і норми приймально-здавальних випробувань регламентуються Правилами технічної експлуатації електроустановок (ПТЕЕУ).

При випробування підвищеною напругою дефекти ізоляції виявляються в результаті пробою і наступного про палення ізоляції. Виявлені дефекти усуваються, а потім проводяться повторно випробування налагодженого обладнання.

Експлуатаційний контроль ізоляції – вимірювання її опору при прийманні електроустановки після монтажу періодично в строк, визначений Правилами, або в випадку знаходження дефектів. Опір ізоляції вимірюється на відімкнені установці. При такому вимірюванні можна визначити опір ізоляції окремих ділянок мережі, електричних апаратів, машин і т.п. В мережі вимірюється опір ізоляції кожної фази відносно землі і між кожною парою фаз на кожній ділянці між двома послідовно встановленими апаратами захисту, а також за останнім апаратом захисту до зажимів електроприймача. Опір ізоляції кожної ділянки в мережах напругою до 1000 В має бути не нижче 0,5 МОм. Для електричних апаратів і машин норми інші, тому вони відмикаються від мережі, і опір їх ізоляції міряється окремо.

Вимірювання опору ізоляції під робочою напругою дозволяє визначити стан ізоляції всієї мережі, включаючи джерело і електроприймачі. Отримана таким чином величина опору ізоляції дозволяє визначити степінь безпеки експлуатації даної мережі. Тому норми, наведені в ПТЕ, не можуть бути в даному випадку критерієм нормальної роботи ізоляції, так як вони задані не для всієї мережі, а для її окремих ділянок.

Міркувати про нормальну роботу або про появу дефектів ізоляції за результатами вимірювань під напругою можна лише шляхом порівняння з даними попередніх вимірювань. Якщо результати співпадають, ізоляція

робоча. Якщо ж виявлене різке зниження опору ізоляції в порівнянні з даними попередніх вимірювань, це вказує на наявність дефектів ізоляції.

В мережах напругою до 1000 В невеликої ємності (до 0,05 мкФ) слід підтримувати опір ізоляції на такому рівні, щоб струм, який проходить через людину, яка торкнулася до фази, не перебільшував тривало допустимої величини.

Постійний контроль ізоляції – вимірювання опору ізоляції під робочою напругою на протязі всього часу роботи електроустановки з дією на сигнал. Величина опору ізоляції відраховується за шкалою приладу. При зниженні опору ізоляції до гранично допустимої величини або нижче прилад подає звуковий або світловий сигнал.

Прилад постійного контролю ізоляції має задовольняти наступним основним вимогам:

- 1) показувати лише активний або омичний опір ізоляції фаз відносно землі незалежно від величини ємності;
- 2) на точність показань приладу не повинні впливати коливання напруги мережі;
- 3) бути досить надійним;
- 4) здійснювати самоконтроль, тобто при несправності приладу стрілка вказувача повинна встановлюватися на нуль, а не на ∞ ;
- 5) опір внутрішніх кіл опору приладу має бути значно вищим повного опору фаз відносно землі (не нижче 100 кОм). У іншому випадку підключення приладу до мережі підвищує небезпеку ураження електричним струмом при експлуатації електрообладнання.

Організація безпечної експлуатації електроустановок:

Керівник підприємства зобов'язаний забезпечити утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для цього він повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку;
- забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників;
- затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці;
- встановити такий порядок, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування електроустановок, вели ретельні спостереження за дорученим їм обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням;
- забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки;
- забезпечити проведення проти аварійних, приймально-здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок;
- забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці зобов'язані контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки.

Забороняється покладати на енергослужбу обов'язки, що не входять до її професійної компетенції.

Оперативне обслуговування:

Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок.

Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою, відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях.

До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання.

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою вище 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком.

Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією;
- одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві;
- перевірити й прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції;
- ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування;
- оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає;
- доповісти старшому зміні про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Прийняття і здача зміни безпосередньо під час ліквідації аварії, виконання перемикань чи операцій по вмиканню та вимиканню обладнання забороняється.

Старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний негайно повідомити диспетчера енергопостачальної організації про аварії, які спричинили відключення однієї або кількох ліній електропередачі, що живлять підприємство.

В разі порушення режиму роботи, пошкодження чи аварії електроустаткування оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміні працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство.

У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії.

Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріпленій за ними ділянці.

Під час огляду в електроустановках понад 1000 В забороняється відкривати двері приміщень, комірок, що обладнані сітчастими огорожами або бар'єрами, якщо відстань між дверима та струмовідними частинами менша за зазначену в ПУЕ. Перелік таких приміщень та комірок затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство.

Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку роботу.

Огляди, виявлення і ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконується централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені.

В приміщеннях електроустановок забороняється зберігання матеріалів та інструментів, що не належать до даної електроустановки.