

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня освіти

на тему:

**«АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В АВТОКОМПРЕСІЙНОМУ
ДУГОГАСИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА»**

Виконав: студент IV курсу

групи Ен – 613 спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Валькович Р. І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник: Чабан А. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент: Коробка С. В.

(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЗАОЧНОЇ
ТА ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) рівень

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)
к.т.н., доцент Левонюк В. Р.
(вч. звання, прізвище, ініціали)
“ ” 202__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Вальковичу Роману Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої елегазового вимикача»

керівник роботи д.т.н., професор Чабан А. В.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП № 887 / к - с від 30.12.2024 р.

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025 р.

3. Вихідні дані

технічна документація, науково-технічна і довідкова література

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Конструктивні та експлуатаційні особливості елегазового вимикача 110 кВ

2 Математична модель динамічних процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої елегазового вимикача

3 Розрахунок та аналіз динамічних процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої

4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5 Економічна оцінка наслідків відмови елегазового вимикача 110 кВ

Висновки

Перелік джерел посилання

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 30.12.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз конструктивних та експлуатаційних особливостей елегазового вимикача 110 кВ	30.12.2024 – 27.02.2025	
2	Розробка математичної моделі динамічних процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої елегазового вимикача	2.03.2025 – 2.05.2025	
3	Виконання розрахунку та аналізу динамічних процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої	5.05.2025 – 11.07.2025	
4	Аналіз можливих небезпек при роботі з елегазовим вимикачем та розробка заходів у надзвичайних ситуаціях	14.07.2025 – 17.10.2025	
5	Здійснення техніко-економічної оцінки збитків при аварії елегазового вимикача	20.10.2025 – 7.11.2025	
6	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації	10.11.2025 – 28.11.2025	
7	Завершення роботи в цілому	1.12.2025 – 8.12.2025	

Студент

Валькович Р. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Чабан А. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

УДК 621.10.2211:1

Валькович Р. І. Аналіз процесів в автокомпресійному дугогасильному пристрої елегазового вимикача. Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького, 2025 р. 58 с. текстової частини, 2 таблиці, 19 рисунків, 23 джерела.

У роботі було досліджено особливості роботи елегазового вимикача 110 кВ та поведінку газового середовища у його дугогасильному пристрої при різних режимах комутації. Проаналізовано конструктивні особливості елегазових вимикачів та принцип роботи автокомпресійного дугогасильного вузла. Побудовано математичні моделі динаміки тиску, температури та масових витрат елегазу для номінальних та короткозамикальних струмів. Виконано чисельні розрахунки на основі побудованих моделей та здійснено аналіз отриманих графічних залежностей. Розглянуто фактори небезпеки, пов'язані з експлуатацією елегазових вимикачів, та наведено рекомендації щодо безпечної роботи й дій у надзвичайних ситуаціях. Особливу увагу приділено ризикам, пов'язаним з вибитком SF_6 , підвищенням тиску та появою продуктів розкладу газу. Здійснено техніко-економічні розрахунки збитків при аварії лінійного елегазового вимикача 110 кВ.

ЕЛЕГАЗОВИЙ ВИМИКАЧ, ДУГОГАСИЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, АВТОКОМПРЕСІЯ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ПЕРЕХІДНА ВІДНОВЛЮВАЛЬНА НАПРУГА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА 110 КВ.....	9
1.1 Загальна характеристика елегазових вимикачів.....	9
1.2 Номенклатура високовольтних вимикачів.....	11
1.3 Аналіз номінальних параметрів та конструкції вимикача.....	12
1.4 Параметри пружинного приводу вимикача.....	15
1.5 Взаємодія високовольтного вимикача з мережею.....	16
1.5.1 Розрахунок параметрів високовольтного вимикача при короткому замиканні 100 %.....	18
1.5.2 Розрахунок перехідної відновлювальної напруги для режиму близького короткого замикання при $p^* = 0,9$	20
1.5.3 Розрахунок перехідної відновлювальної напруги для режиму близького короткого замикання при $p^* = 0,3$	21
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОКОМПРЕСІЙНОМУ ДУГОГАСИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА.....	23
2.1 Аналіз схеми дугогасильного пристрою елегазового вимикача.....	23
2.2 Математична модель динамічних процесів дугогасильного пристрою при розрахунку номінальних струмів.....	25
2.3 Математична модель динамічних процесів дугогасильного пристрою при вимкненні струмів коротких замикань.....	28
3 РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОКОМПРЕСІЙНОМУ ДУГОГАСИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ.....	31
3.1 Реалізація математичної моделі в <i>MathCad</i>	31
3.2 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції при відмиканні номінальних струмів.....	35

3.3 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції при відмиканні струмів короткого замикання.....	38
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.	42
4.1 Електричні небезпеки при експлуатації елегазового вимикача 110 кВ	42
4.2 Засоби та заходи безпеки при роботі з елегазовим обладнанням...	43
4.3 Механічні та експлуатаційні небезпеки.....	46
4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	48
5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА НАСЛІДКІВ ВІДМОВИ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИ- МИКАЧА 110 КВ.....	50
5.1 Постановка завдання економічної оцінки.....	50
5.2 Компоненти економічних збитків.....	50
5.3 Практичні рекомендації для зменшення економічних ризиків.....	52
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	54
ДОДАТКИ.....	56
Додаток А Реалізація математичної моделі в <i>MathCad</i> для струмів короткого замикання.....	56

ВСТУП

У сучасних електроенергетичних системах надійність комутаційного обладнання безпосередньо впливає на стійкість роботи мережі та рівень її безпеки. Зі зростанням навантажень, переходом до більш складних схем та появою швидкодіючих систем автоматики підвищуються вимоги до апаратів, які виконують операції вмикання та вимкнення струмів різної природи. Особливо це стосується високовольтних вимикачів, адже саме вони відповідають за відключення аварійних струмів, здатних завдати значної шкоди обладнанню та спричинити масштабні відмови [1].

Серед різних типів високовольтних комутаційних апаратів найбільш поширеними сьогодні є елегазові вимикачі. Їх популярність зумовлена поєднанням високої вимикальної здатності, компактності, тривалого ресурсу та стабільних ізоляційних властивостей газового середовища. Проте попри очевидні переваги, процеси, які відбуваються всередині дугогасильних камер таких вимикачів, є складними й багатofакторними. Особливо це стосується режимів короткого замикання, коли тиск, температура та витрата газу змінюються за мілісекунди, а результат цих процесів визначає, чи зможе вимикач відновити діелектричну міцність у потрібний момент.

У лабораторних умовах такі процеси відтворити складно, а повномасштабні випробування потребують значних витрат. Тому математичне моделювання динаміки елегазу в камері стиснення та автогенерації стає одним із найбільш ефективних інструментів для аналізу роботи вимикачів і прогнозування їх поведінки у різних режимах [2].

Відтак, актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності елегазових вимикачів у сучасних енергосистемах, особливо під час вимкнення струмів короткого замикання. Саме у цей момент від комутаційного апарата вимагається максимально швидке відновлення електричної міцності, яке на пряму залежить від термогазодинамічних процесів у дугогасильному пристрої. Побудова та аналіз математичної моделі дає змогу дослі-

дити ці процеси без проведення дорогих експериментів і дає змогу оцінити вплив різних конструктивних параметрів на роботу вимикача [3].

Метою кваліфікаційної роботи є побудова та дослідження математичної моделі динамічних процесів у дугогасильному пристрої елегазового вимикача та аналіз його роботи при вимкненні номінальних та короткозамикальних струмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі **завдання**:

1. Проаналізувати конструкцію елегазового вимикача 110 кВ та принцип роботи автокомпресійного дугогасильного вузла.
2. Розглянути взаємодію вимикача з електричною мережею та особливості комутаційних режимів.
3. Побудувати математичну модель процесів стиснення, нагрівання та витрати елегазу у камері дугогасильного пристрою.
4. Реалізувати створену модель у програмному комплексі *MathCad* та провести чисельні розрахунки.
5. Проаналізувати отримані результати та порівняти режими роботи при номінальних струмах та струмах короткого замикання.
6. Здійснити техніко-економічні обчислення для умови аварії на елегазовому вимикачі.

Об'єктом кваліфікаційної роботи є елегазовий вимикач 110 кВ автокомпресійного типу.

Предметом кваліфікаційної роботи є динамічні процеси в камері стиснення та камері автогенерації під час вимикання струмів різної природи, а також їх вплив на можливість гасіння дуги.

1 КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА 110 КВ

1.1 Загальна характеристика элегазових вимикачів

Елегазовий вимикач – це комутаційний апарат, який використовує елегаз (шестифтористу сірку, SF_6) як середовище гасіння електричної дуги; призначений для оперативних вмикань та відмикань окремих контурів або електрообладнання в енергосистемі, у нормальних чи аварійних режимах, при ручному, дистанційному чи автоматичному управлінні.

На сьогоднішній день элегазові вимикачі є найпоширенішими високовольтними вимикачами у світі. Основні переваги элегазового обладнання визначаються фізико-хімічними властивостями элегазу. При правильній експлуатації элегаз не старіє та не вимагає такого ретельного догляду за собою, як олива.

Елегазові вимикачі мають ряд переваг [4]:

- компактність;
- великі міжревізійні терміни, аж до відсутності експлуатаційного обслуговування протягом усього терміну служби;
- широкий діапазон номінальної напруги (10 – 1150 кВ);
- пожежобезпечність та підвищена безпека обслуговування.

Ще одним позитивним аспектом використання элегазових вимикачів є їхня надійність. Так, за останньою статистикою *CIGRE*, надійність вимикачів на основі SF_6 покращилася до значення 0,3 відмов на 100 років роботи вимикача, що є найкращим із можливих показників на сьогоднішній день (див. рис.1.1.).

Активний розвиток элегазових вимикачів розпочався на початку 1980-х років. Саме із цього часу вони масово впроваджуються в електричних мережах класів напруги від 110 до 1150 кВ, забезпечуючи відключення струмів до 80 кА. У більшості технічно розвинених країн вимикачі на основі элегазу фа-

критично витіснили інші типи високовольтних апаратів у діапазоні напруг від 110 кВ до 1150 кВ. Провідні світові виробники майже повністю перейшли на випуск комплектних розподільчих пристроїв з елегазовою ізоляцією, а також елегазових вимикачів для відкритих розподільчих підстанцій напругою 110 кВ і вище [5].

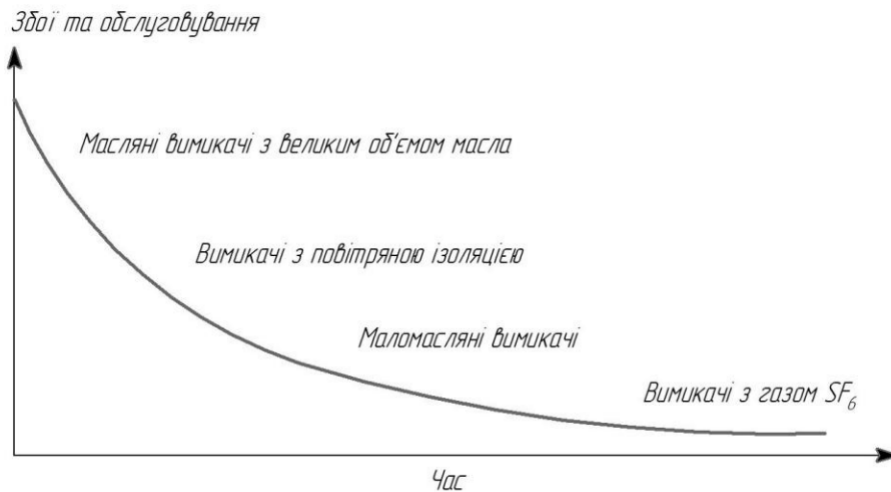


Рисунок 1.1 – Частота відмов різних типів вимикачів

Попри численні переваги, елегазові вимикачі мають й певні недоліки. Одним із них є залежність працездатності від умов навколишнього середовища: за температур нижчих ніж $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ можлива відмова апарата через фазовий перехід газового середовища. Крім того, ненадійні ущільнення корпусу можуть спричиняти поступове витікання SF_6 , що вимагає постійного контролю за станом обладнання. Хоча чистий елегаз є нетоксичним, продукти його розкладання, які утворюються після гасіння електричної дуги, можуть бути шкідливими.

Під час планового технічного обслуговування внутрішні вузли вимикача потребують ретельного очищення у сухому та чистому середовищі. Особливу увагу приділяють видаленню частинок тефлону та сульфідів. Для транспортування, перекачування та підтримання необхідних параметрів газу застосовують спеціалізоване обладнання, оскільки погіршення фізико-хімічних властивостей SF_6 негативно впливає як на роботу, так і на довговічність елегазових вимикачів.

1.2 Номенклатура високовольтних вимикачів

Під час вивчення конструкції та правил експлуатації високовольтних вимикачів основним документом, яким необхідно керуватися, є паспорт виробу. Технічний опис та інструкція з експлуатації забезпечують користувача інформацією щодо будови вимикача, принципів його роботи, вимог до умов застосування, правил безпечної експлуатації, підготовки до увімкнення та регламентних процедур технічного обслуговування.

Елегазовий вимикач із пружинним приводом, призначений для комутації електричних кіл трифазного змінного струму частотою 50 або 60 Гц у нормальних та аварійних режимах при номінальній напрузі до 126 кВ. Такі вимикачі зазвичай використовуються у шафах комплектних розподільчих пристроїв (КРП) внутрішньої установки теплових та атомних електростанцій, а також на об'єктах інших споживачів електричної енергії [6].

Кожному високовольтному вимикачу присвоюється умовне позначення, яке містить ключові параметри та характеристики конкретного типорозміру. Структура такого позначення для типової модифікації вимикача наведена на рисунку 1.2.

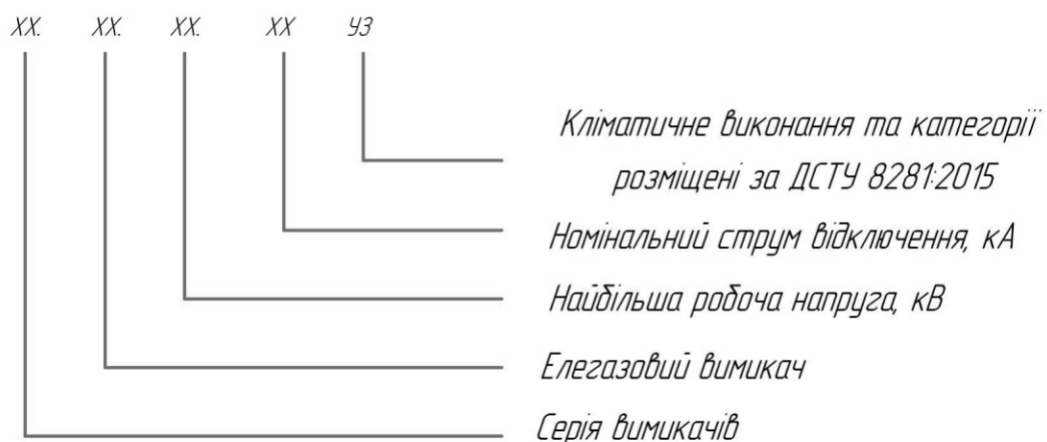


Рисунок 1.2 – Структура умовного позначення типовиконання вимикача

Для прикладу, у супровідній документації або під час оформлення замовлення елегазовий вимикач виробництва фірми АВВ, розрахований на номінальну напругу 10 кВ (за максимально допустимої робочої напруги 12,5 кВ), номінальний струм 2000 А та струм відмикання 50 кА, призначений для

експлуатації в умовах помірного клімату (позначення «У») і категорії розміщення «3», маркується таким чином: «Елегазовий вимикач VF 07.20.50 У3».

На лабораторному стенді кафедри використовується вимикач типу АВВ 121PM40-20В. Він розрахований на номінальну напругу 110 кВ (при максимальній робочій напрузі 126 кВ), номінальний струм 3150 А та струм відмикання 40 кА. Вимикачі цього типу виготовляються у виконанні «У» та категорії розміщення 1.

Кліматичне виконання «У» означає, що обладнання призначене для роботи в умовах помірного клімату з діапазоном робочих температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Категорія розміщення 1 передбачає можливість експлуатації на відкритому повітрі.

Отже, прийнятий для дослідження вимикач може працювати при температурах від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ та призначений для розміщення поза приміщеннями.

1.3 Аналіз номінальних параметрів та конструкції вимикача

Відповідно до ДСТУ EN IEC 62271-100:2022 [7] та рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії до номінальних параметрів вимикачів слід зараховувати такі характеристики, які визначають умови роботи:

- номінальна напруга U_H ;
- номінальний струм I_H ;
- номінальний струм відмикання I ;
- номінальний струм увімкнення I_{YBIM} ;
- номінальна тривалість короткого замикання (КЗ);
- номінальна частота f_H ;
- номінальний рівень ізоляції;
- номінальна послідовність операцій (номінальні цикли);
- номінальні характеристики при коротких замиканнях, тощо.

Для вимикачів із газовим дуттям додатково вводять параметри, які потрібні для відмикання та вмикання:

- номінальний тиск P_H ;
- витрати газу;
- нижня межа тиску для здійснення окремих операцій (О – відмикання; В – вмикання; ВО – вмикання-відмикання).

Додаткові параметри, не включені до основного списку:

- найбільша робоча напруга U_H ;
- номінальна перехідна напруга, яка відновлюється (ПВН) при КЗ на виводах вимикача;
- номінальна напруга вмикаючих та відмикаючих пристроїв (електромагнітів);
- нормовані показники надійності.

Оскільки об'єктом кваліфікаційної роботи є процеси, які відбуваються у дугогасильному пристрої елегазового вимикача 110 кВ, то нас буде цікавити конструкція самого дугогасильного пристрою. Конструкція аналізованого дугогасильного пристрою вимикача 110 кВ представлена на рисунку 1.3 [8].

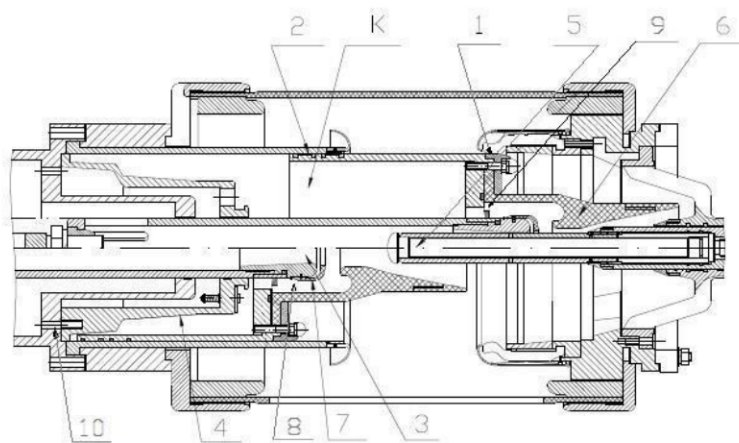


Рисунок 1.3 – Автокомпресійний дугогасильний пристрій елегазового вимикача

Дугогасний вузол містить основні нерухомий (1) та рухомий (2) контакти, рухомий дугогасильний контакт (3), нерухомий поршень (4), нерухомий дугогасильний контакт (5), ізоляційне сопло (6), Г-подібну циліндричну ізоляційну втулку (7), камеру автогенерації (8), систему клапанів (9), а також

запобіжний клапан. Конструктивно вимикач утворюють ізоляційне сопло (6), головний рухомий контакт (2), який жорстко з'єднаний зі штоком приводу та рухомим дугогасним контактом (3), а також нерухомий поршень (4). У проміжках між комутаційними операціями тиск у всьому об'ємі дугогасного пристрою залишається сталою величиною.

Однією із ключових переваг автокомпресійних вимикачів із камерою автогенерації є можливість застосування приводів з меншою необхідною енергією спрацювання. Водночас такі елегазові апарати характеризуються підвищеним тепловим навантаженням на горловини ізоляційних та металевих сопел, а також ускладненнями під час забезпечення необхідних «вікон відмикання» та комутаційного ресурсу. Ці труднощі особливо проявляються при відмиканні струмів короткого замикання зі зростанням відмикальної здатності та номінальної напруги апарата.

Принцип дії дистанційного керування при відмиканні номінальних струмів полягає в такому. Після подачі команди на відмикання першими розмикаються головні контакти, а за ними – дугогасильні. У цей момент рухома система вимикача переміщується зліва направо, унаслідок чого елегаз у камері стиснення K та в автогенераторній камері 8 стискається під дією нерухомого поршня 4. Клапан 9 у цей період залишається відкритим.

Розрив дугогасильних контактів відбувається з певною затримкою, зумовленою тим, що перетин сопел 6 та 3 частково перекривається дугою. Утворений при цьому перепад тиску спрямовує потік газу із камери стиснення через сопло рухомого дугогасного контакту 3 та ізоляційне сопло 6 у загальний об'єм вимикача. Саме цей двосторонній поздовжній газовий потік забезпечує ефективне гасіння дуги у момент переходу струму через нуль.

Для надійного відмикання потрібно, щоб через соплові канали дугогасного пристрою проходив максимально можливий об'єм елегазу, який відводить тепло від плазмового стовпа дуги. Після виконання своєї функції відпрацьований газ відводиться під оболонку ізоляційної камери.

Під час вимкнення струмів короткого замикання дуга, яка виникає між контактами 3 та 5, інтенсивно нагріває елегаз у міжконтактному проміжку. Унаслідок цього розігрітий газовий потік спрямовується до камери автогенерації 8. Накопичення гарячого газу призводить до підвищення тиску у цій камері, що, чергово, спричиняє закриття клапана 9. Подальше зростання тиску забезпечує формування потужного газового потоку, який у момент переходу струму через нуль сприяє надійному згасанню дуги через сопла 3 та 6.

Режим увімкнення дугогасного пристрою передбачає іншу послідовність дій: спочатку замикаються дугогасні контакти, після чого вступають у роботу головні контакти. У положенні «увімкнено» струм проходить через головні контакти, а тиск у внутрішніх порожнинах дугогасного вузла залишається сталим.

Важливою специфічною рисою вимикачів цього типу є тісна взаємодія механічних процесів, термогазодинаміки та дугових явищ під час операції вимкнення, що визначає їх комутаційні властивості та динаміку роботи.

1.4 Параметри пружинного приводу вимикача

Привід високовольного вимикача являє собою комплекс взаємопов'язаних механізмів та функціональних вузлів, призначених забезпечувати виконання усіх необхідних механічних дій та їхніх циклів, які гарантують надійну роботу вимикача в умовах експлуатації.

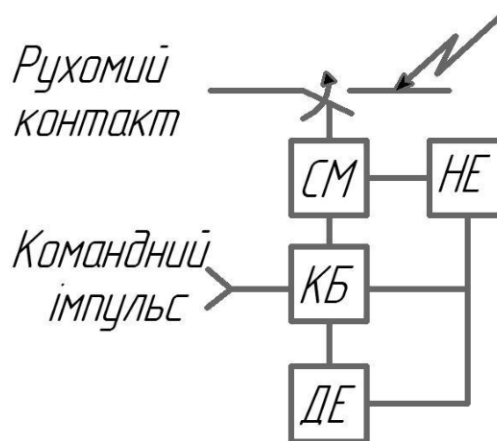


Рисунок 1.4 – Структурна схема приводу вимикача

У сучасних вимикачах застосовують різні типи приводів – електромагнітні, пружинні, пневматичні, гідравлічні, а також комбіновані варіанти. Пружинний привід вимикача АВВ 121PM40-20В, включає низку основних елементів: джерело енергії ДЕ, пусковий керувальний блок КБ, силовий механізм СМ та вузол накопичення енергії НЕ (рис. 1.4).

Функціонування кожного вузла приводу тісно пов'язане з роботою решти механізмів, а сумарний час спрацьовування окремих елементів у кінцевому підсумку формує регламентований час увімкнення або вимкнення вимикача. Основні технічні дані приводу наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технічні дані пружинного приводу вимикача [8]

Параметр	Значення
Зусилля при робочому стисненні силових пружин, Н	2188
Робочий хід силових пружин, мм	62
Мінімальна робота, яка здійснюється при виконанні операції вмикання або відмикання, Нм	78
Номінальна напруга електромагніта відмикання (вмикання):	
• постійного струму, В	110, 220
• змінного струму, В	127, 220
Діапазон напруги спрацьовування електромагніту:	
• постійного струму, %	70 – 110
• змінного струму, %	65 – 120
Власний час вмикання здійснення операції, не більше:	
• постійного струму, с	0,15
• змінного струму, с	0,1

1.5 Взаємодія високовольтного вимикача з мережею

Нині елегазові вимикачі посідають ключове місце у забезпеченні комутаційних процесів в електроенергетичних мережах. Проведення експериментальних досліджень з удосконалення конструкції дугогасних камер вимика-

чів потребує значних фінансових ресурсів та тривалих випробувань. У зв'язку з цим особливого поширення набуло математичне моделювання, яке дає змогу оцінити робочі можливості вимикачів без необхідності виготовлення й тестування великої кількості дослідних зразків.

Для визначення динамічних характеристик дугогасного пристрою може бути використана модель, побудована на засадах енергетичного підходу. У межах цієї роботи на базі вказаної моделі проаналізовано поведінку елегазу в камері стиснення дугогасного пристрою вимикача.

Високовольтний вимикач має забезпечувати розмикання електричного кола як у штатних режимах роботи мережі, так і під час аварійних ситуацій, включно з різними видами коротких замикань. Під час комутації при ненормальних режимах до дугогасних систем висуваються суттєво жорсткіші вимоги щодо швидкодії та гарантованої надійності їх роботи. У найпростішому наближенні модельна еквівалентна схема, яка використовується для аналізу перехідних процесів при короткому замиканні, представлена на рисунку 1.5.

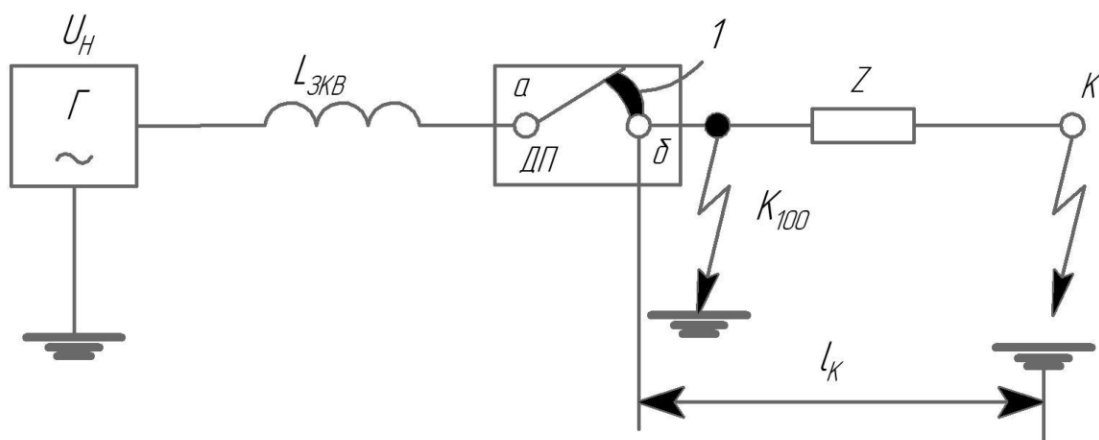


Рисунок 1.5 – Еквівалентна схема для аналізу перехідних процесів

Оскільки найбільш критичними з погляду вимкнення є саме аварійні режими, які супроводжуються виникненням струмів короткого замикання, у подальшому розгляді акцент буде зроблено на таких режимах роботи вимикача [9]:

- короткому замиканні на контактах вимикача;
- невіддаленому короткому замиканні при параметрі $p = 0,9$;
- невіддаленому короткому замиканні при $p = 0,1$.

1.5.1 Розрахунок параметрів високовольтного вимикача при короткому замиканні 100 %. Після зникнення струму під час відмикання короткого замикання на контактній системі вимикача формується перехідна відновлювана напруга, яка визначається власними параметрами електричної мережі у точці встановлення апарата. Характер та конфігурація хвилі цієї перехідної напруги залежать від структури мережі.

У високовольтних системах (понад 100 кВ) за великих значень струмів короткого замикання перехідна відновлювана напруга зазвичай має початкову ділянку з дуже швидким фронтом наростання, після якої наступає область із суттєво меншою швидкістю зміни. Такий тип напруги коректно описується наближеною обвідною, що складається з трьох лінійних фрагментів, які визначаються за методом чотирьох параметрів: U_1, U_c, t_1, t_2 .

Наявна ємність зі сторони джерела живлення спричиняє певне запізнення зростання ПВН на нормований проміжок часу, що фактично полегшує умови вимикання вимикачем високоенергетичних струмів.

1) Нормовані параметри ПВН при $I_{від} = I_{від.ном.}$

$$U_1 = 0,75 K_{ПГ} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{НР}, \quad (1.1)$$

де $K_{ПГ}$ – коефіцієнт першого гасильного полюса (приймаємо $K_{ПГ} = 1,3$), будемо мати [10]:

$$U_1 = 0,75 \cdot 1,3 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 110 = 87,4 \text{ кВ.}$$

$$U_c = K_a K_{ПГ} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{НР}, \quad (1.2)$$

де K_a – коефіцієнт перевищення амплітуди відновлюваної напруги (приймаємо $K_a = 1,4$), будемо мати:

$$U_c = 1,4 \cdot 128 = 179 \text{ кВ.}$$

При $U_{ном} = 110 \text{ кВ}$: $t_1 = 144 \text{ мкс}$, $t_2 = 576 \text{ мкс}$, $t_d = 2 \text{ мкс}$, $U' = 48 \text{ кВ}$, $t' = 74 \text{ мкс}$.

У зв'язку із тим, що кількість ліній електропередач та конфігурація енергосистеми варіюються від випадку до випадку, далі представлено методику розрахунку нормованих параметрів перехідної відновлюваної напруги, пристосовану до різних схем мережі.

2) Нормовані параметри перехідної відновлюваної напруги при $I_{від} = 0,1I_{від.ном}$, при $K_a = 1,54$:

$$U_c = 1,54 \cdot 128 = 197 \text{ кВ.}$$

При $U_{ном} = 110 \text{ кВ}$: $t_3 = 85 \text{ мкс}$, $t_d = 13 \text{ мкс}$, $U' = 65 \text{ кВ}$, $t' = 41 \text{ мкс}$.

Нормовані характеристики перехідної відновлюваної напруги представлено на рисунку 1.6.

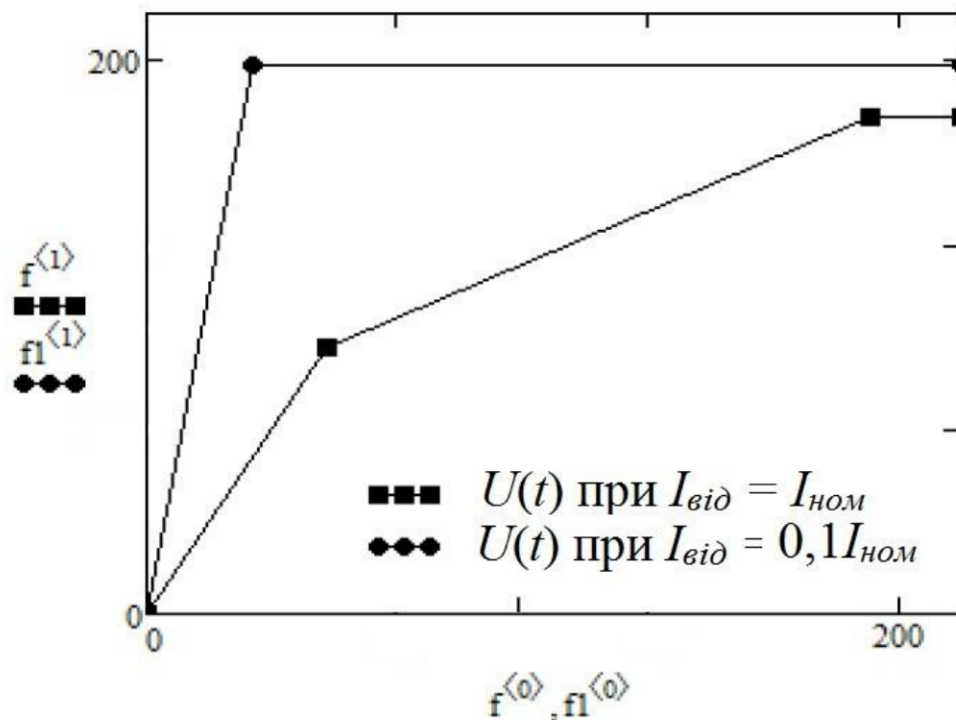


Рисунок 1.6 – Характеристики перехідної відновлюваної напруги при $I_{від} = I_{від.ном}$ та $I_{від} = 0,1I_{від.ном}$

Газові вимикачі вирізняються підвищеною чутливістю до початкової крутизни наростання перехідної відновлюваної напруги. Відтак, для них особливо актуальним є встановлення нормативних параметрів перехідної відновлюваної напруги у випадку найбільш несприятливих коротких замикань, яким притаманна значна швидкість зростання напруги на контактах одразу після проходження струму через нуль.

1.5.2 Розрахунок перехідної відновлювальної напруги для режиму близького короткого замикання при $p^* = 0,9$.

Аналізоване значення струму близького короткого замикання становить:

$$I_L = 50 \cdot 0,9 = 45 \text{ кА.}$$

Амплітудне значення напруги мережі відносно землі становить:

$$U_m = 121 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 99 \text{ кВ.}$$

Значення напруги на лінії при нульовому значенні струму становить:

$$U_0 = 99 \cdot (1 - 0,9) = 9,9 \text{ кВ.}$$

Амплітудне значення перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії становить:

$$U_L^* = 1,6 \cdot 9,9 = 15,8 \text{ кВ.}$$

Обчислюємо час до першого пікового значення перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії:

$$t_L = \frac{15,8}{0,2 \cdot 45} = 6,1 \text{ мкс.}$$

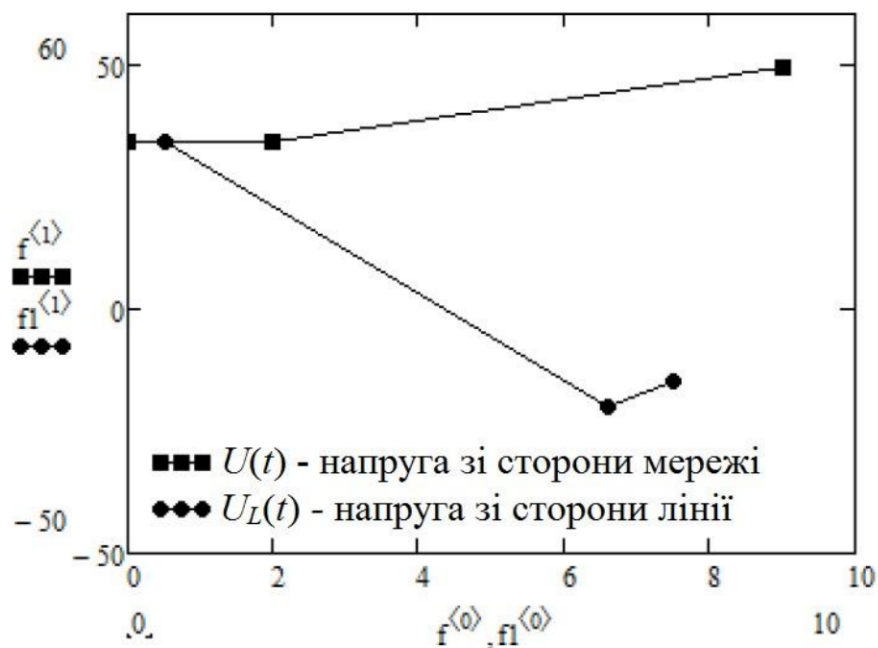


Рисунок 1.7 – Нормовані значення перехідної відновлюваної напруги при близькому короткому замиканні $p^* = 0,9$

Обчислюємо відстань від вимикача до місця короткого замикання [11]:

$$L = \frac{0,3 \cdot 6,1}{2} = 0,92 \text{ км.}$$

Обчислюємо швидкість перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії:

$$S_L = U_L / t_L = 8,9 \text{ кВ/мкс, а з боку мережі } S = 2 \text{ кВ/мкс.}$$

На рисунку 1.7 приведено нормовані криві перехідної відновлюваної напруги.

1.5.3 Розрахунок перехідної відновлювальної напруги для режиму близького короткого замикання при $p^* = 0,3$. Аналізоване значення струму близького короткого замикання становить:

$$I_L = 50 \cdot 0,3 = 15 \text{ кА.}$$

Амплітудне значення напруги мережі відносно землі становить:

$$U_m = 121 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 99 \text{ кВ.}$$

Значення напруги на лінії при нульовому значенні струму становить:

$$U_0 = 99 \cdot (1 - 0,3) = 69 \text{ кВ.}$$

Амплітудне значення перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії становить:

$$U_L^* = 1,6 \cdot 69 = 110 \text{ кВ.}$$

Обчислюємо час до першого пікового значення перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії:

$$t_L = \frac{110}{0,2 \cdot 5} = 110,5 \text{ мкс.}$$

Обчислюємо відстань від вимикача до місця короткого замикання:

$$L = \frac{0,3 \cdot 110,5}{2} = 16,6 \text{ км.}$$

Обчислюємо швидкість перехідної відновлюваної напруги зі сторони лінії:

$$S_L = U_L / t_L = 3 \text{ кВ/мкс, а з боку мережі } S = 2 \text{ кВ/мкс.}$$

На рисунку 1.8 приведено нормовані криві перехідної відновлюваної напруги.

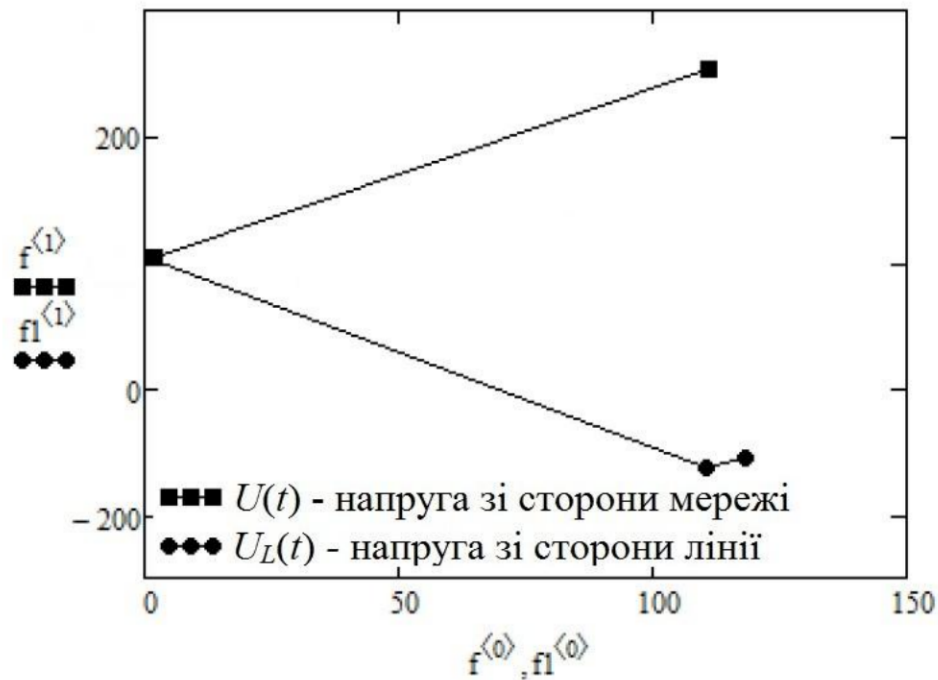


Рисунок 1.8 – Нормовані значення перехідної відновлюваної напруги при близькому короткому замиканні $p^* = 0,3$

У цьому розділі подано комплексний аналіз конструктивно-технологічних особливостей елегазових вимикачів, які сьогодні є ключовими комутаційними апаратами високовольтних електроенергетичних мереж. Розглянуто принципи роботи дугогасильного вузла автокомпресійного типу, особливості пружинного приводу та взаємодію вимикача з електричною мережею за нормальних і аварійних режимів. Значну увагу приділено характеристикам перехідної відновлюваної напруги при різних типах коротких замикань, що визначає умови гасіння дуги та діелектричну витримку апарата.

Проведений огляд засвідчує, що ефективність роботи елегазового вимикача визначається поєднанням механічних, електричних та термогазодинамічних процесів у дугогасильному пристрої. Отримані теоретичні залежності та аналіз нормованих параметрів ПВН створюють основу для подальшого математичного моделювання динаміки тиску, температури та масових потоків газу у камері стиснення й автогенерації, що є предметом наступного розділу.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОКОМПРЕСІЙНОМУ ДУГОГАСИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА

2.1 Аналіз схеми дугогасильного пристрою елегазового вимикача

Розрахункова схема автокомпресійного дугогасильного пристрою з камерою автогенерації подана на рисунку 2.1 [12].

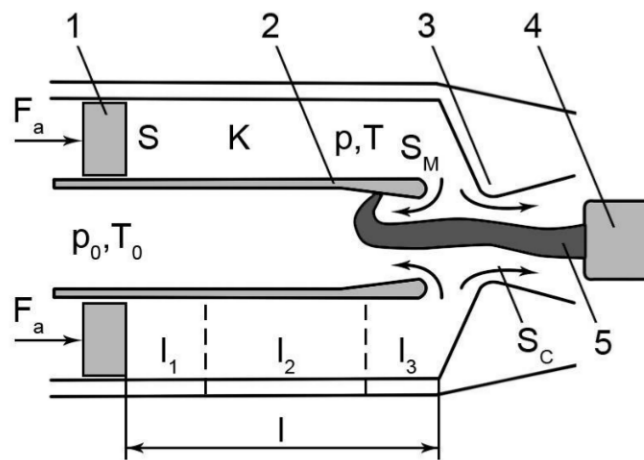


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема автокомпресійного дугогасильного пристрою з камерою автогенерації

Під час вимкнення номінальних струмів клапан, який розділяє камеру стиснення та камеру автогенерації, перебуває у відкритому стані. У цьому випадку під камерою стиснення розуміється сумарний об'єм власне камери стиснення та приєднаної до неї камери автогенерації. Початкові значення тиску та температури елегазу в цій камері приймаються рівними нульовим.

Рухомий поршень 1 з ефективною площею перерізу S моделює переміщення рухомої системи вимикача з приведеною масою m під дією активного зусилля приводу F_a . У процесі вимкнення номінального струму поршень стискає елегаз у спільному об'ємі камер, що призводить до зростання тиску p .

Сопло рухомого контакту 2 із площею перерізу M відкривається після того, як поршень проходить початковий хід l_1 . На цьому етапі нерухомий контакт 4 ще перекриває дугогасні сопла, і рухомий контакт 2 ковзає по його поверхні

(див. рис. 2.1). Подальше переміщення поршня призводить до відкриття ізоляційного сопла 3 з площею перерізу S_c . Дуга 5, яка виникає під час розмикання контактів 2 та 4, інтенсивно охолоджується потоками стисненого елегазу.

Імпульсний характер зміни тиску у камері – зростання та подальший спад уздовж ходу поршня l , а також витрата газу через сопла дугогасильного пристрою визначаються геометрією дугогасильного пристрою, масою рухомих елементів вимикача та газодинамікою у камері стиснення. Саме ці процеси забезпечують надійне згасання дуги при номінальних параметрах мережі на контрольному відрізку переміщення контактів $l_2 = l - l_3 - l_1$, де l_3 – гальмівний шлях поршня; l – довжина камери стиснення К.

Після розмикання дугогасних контактів (див. рис. 2.2, PK – момент контактного розриву) для підвищення ефективності дії газового потоку на дугу потрібно забезпечити режим граничної (критичної) витрати елегазу через сопла дугогасної камери (див. рис. 2.1). Такий режим настає за умови досягнення тиску $p > p_{кр}$ (для елегазу $p_{кр} = 1,69 p_0$).

На рисунку 2.2 представлено графічні залежності струму, тиску та ходу поршня від часу [13].

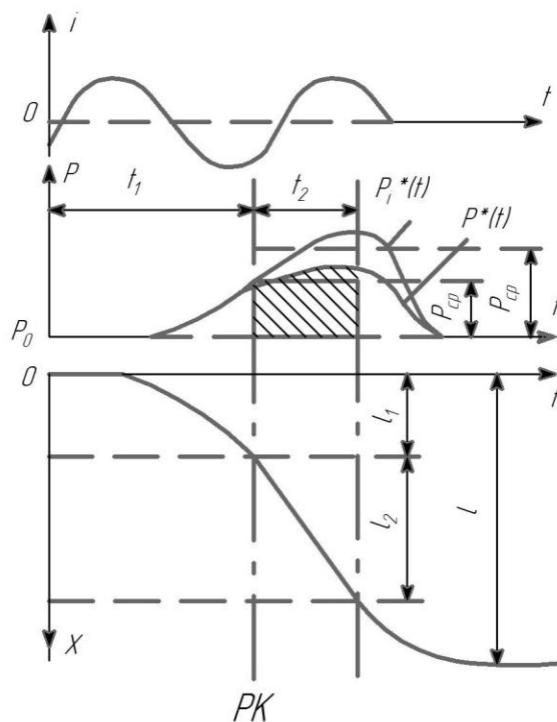


Рисунок 2.2 – Залежність струму, тиску та ходу поршня

Додаткове зростання тиску p (див. рис. 2.2, крива $p(t)$) виникає під час горіння дуги у міжконтактному проміжку вимикача. Частина енергії дуги, позначена як Q^D , витрачається на нагрівання елегазу в камері K , що призводить до підвищення тиску. Зі збільшенням енергії Q^D процес вимкнення звичай полегшується завдяки посиленому задуванню дуги.

Водночас, за високої потужності дуги, коли її стовп перекриває горловини сопел, здатність вимикача до ефективного відключення зменшується. У практичних конструкціях високовольтних вимикачів тиск p^* при успішному гасінні дуги перевищує номінальний тиск p не більш ніж у 2,5 раза (за даними зарубіжних джерел) [14].

2.2 Математична модель динамічних процесів дугогасильного пристрою при розрахунку номінальних струмів

У спрощеній математичній моделі, яка описує термогазодинамічні процеси у камері стиснення, застосовується енергетичний підхід, а елегаз розглядається як ідеальне робоче середовище. Оскільки енергія дуги істотно впливає на термодинамічний стан газу, до рівняння енергетичного балансу вводиться додатковий член, який враховує тепловий вплив дуги:

$$dQ_d = k_d U_d I_d dt. \quad (2.1)$$

Під час розроблення моделі приймається, що динаміка автокомпресійного дугогасильного пристрою подібна до процесу витікання стисненого газу з замкнутого об'єму через еквівалентний прохідний переріз вимикача. Канал зі змінною площею:

$$S_{BB} = S_C + S_M, \quad (2.2)$$

імітує зміну прохідних перетинів сопел дугогасного пристрою відповідно до переміщення рухомої системи вимикача. Об'єм камери стиснення вважається змінним у часі й визначається поточним положенням поршня.

Згідно з першим законом термодинаміки, зміна внутрішньої енергії газу під час його стиснення в об'ємі V у наслідок руху поршня та одночасного витікання через ефективний переріз супроводжується роботою сил тиску та надходженням тепла від дуги. У загальному вигляді це можна описати співвідношенням:

$$d(w_r m_r) = d(Q + Q_d + pV), \quad (2.3)$$

де $dQ = h \dot{m}_r dt$ – позначає кількість теплоти, яка відводиться з камери стиснення разом із потоком газу, який проходить через ефективний прохідний переріз. Своєю чергою, $dQ_d = k_d U_d I_d dt$ характеризує теплову енергію, яка надходить у робоче середовище внаслідок нагрівання елегазу дугою у фазі значних струмів.

Далі, для подальшого опису процесу використовуються стандартні термодинамічні співвідношення, які справедливі для ідеального газу:

$$h = c_p T, \quad w_r = c_v T. \quad (2.4)$$

Тоді, рівняння (2.3) може бути перетворене до вигляду:

$$dQ_d - c_p T \dot{m}_r dt = \frac{c_v}{R} V dp + p dV, \quad (2.5)$$

де R – газова постійна. Враховувавши, що об'єм камери змінюється за законом:

$$V(t) = S(l - x(t)) + V_a, \quad (2.6)$$

де V_a – постійний за величиною об'єм камери автогенерації. Рівняння (2.5) буде виглядати так:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k}{S(l - x(t)) + V_a} \left[\frac{k-1}{k} k_d U_d I_d - \dot{m} R T + p S \dot{x} \right]. \quad (2.7)$$

Щоб отримати рівняння для температури T у камері стиснення, про диференціюємо рівняння стану ідеального газу:

$$T dm_r + m_r dT = \frac{(p dV + V dp)}{R}. \quad (2.8)$$

Оскільки зміна кількості газу пов'язана з масовою витратою за співвідношенням:

$$T \dot{m}_r = \dot{m}_r dt, \quad (2.9)$$

то кінцево отримаємо [15]:

$$\frac{dT}{dt} = T \left[-\frac{\frac{dx}{dt}}{(l-x) + \frac{V_a}{S}} + \frac{\frac{dp}{dt}}{p} - \frac{\dot{m}_r RT}{p[V_a + S(l-x)]} \right]. \quad (2.10)$$

Витрата газу $\dot{m}_r(p/p_0)$ через сумарний ефективний переріз сопел $S_{BB} = S_C + S_M$ визначається різницею тисків між камерою стиснення та дуговою камерою. Залежно від цього перепаду тиску витрату знаходять за такою формулою:

$$\dot{m}_r = \begin{cases} S_{BB} p_0 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R_r T_0} \left(Y^{2/k} - Y^{\frac{k+1}{k}} \right)} \text{ при } Y > Y_{кр} \\ \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{2/(k-1)} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)} S_{BB} p_0 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)R_r T_0}} \text{ при } Y > Y_{кр} \end{cases}. \quad (2.11)$$

де $Y = p/p_0$, p_0 – початковий тиск у камері стиснення, який рівний тиску у дуговій камері.

В даному випадку, система рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{k}{S(l-x(t)) + V_a} \left[\frac{k-1}{k} k_d U_d I_d - \dot{m}_r RT + p S \dot{x} \right] \\ \dot{T} = T \left[-\frac{\dot{x}}{(l-x) + \frac{V_a}{S}} + \frac{\dot{p}}{p} - \frac{\dot{m}_r RT}{p[V_a + S(l-x)]} \right] \\ m \ddot{x} = F_a - (pS - p_0 S) \end{cases}, \quad (2.12)$$

Система диференціальних рівнянь розв'язується при таких початкових умовах:

$$\begin{cases} x|_{t=t_0} = 0 \\ \dot{x}|_{t=t_0} = 0 \\ T|_{t=t_0} = T_0 \\ p|_{t=t_0} = p_0 \end{cases}.$$

2.3 Математична модель динамічних процесів дугогасильного пристрою при вимкненні струмів коротких замикань

Під час вимкнення струмів короткого замикання у дуговому проміжку формується надзвичайно висока густина струму. За таких умов матеріал стінки каналу, зазвичай, характеризується малою теплопровідністю, тому лише незначна частина енергії дуги відводиться через стінки. Основний же обсяг теплової потужності витрачається на нагрівання, плавлення та випаровування матеріалу стінки. Внаслідок цього при відключенні струмів КЗ тиск у камері автогенерації зростає не лише через збільшення температури газу під дією дугового випромінювання, але й за рахунок абляційного руйнування стінок (див. рисунок 2.1).

Одним із перших теоретичних підходів до опису впливу абляції стінки на підвищення тиску у дугогасильному пристрої є робота швейцарського дослідника Л. Німейєра [16]. У ній наведено основні фізичні механізми, які визначають поведінку дуги під час випаровування матеріалу стінки у дугогасний потік, а також отримано критеріальні залежності, які дають змогу кількісно оцінити цей вплив.

Згодом в [17] розвинуто підхід, представлений у [16], розглянувши його на більш детальному рівні. У роботі [17] тепловий потік, який надходить до стінок каналу внаслідок випромінювання дуги, визначається у припущенні осьової симетрії та використанні моделі чорного тіла. При цьому передбачається, що частина енергії випромінювання обов'язково досягає поверхні стінки.

У межах кваліфікаційної роботи наведено модифікацію математичної моделі (2.12), що дає змогу якісно оцінити вплив абляції стінки на зростання тиску у дугогасильному пристрої. З цією метою у рівнянні (2.3) внесемо такі уточнення:

$$d(w_r m_r) = d(Q + Q_d + Q_w), \quad (2.13)$$

де Q_w – це кількість тепла, яка надходить у камеру автогенерації разом із газовим потоком, що утворюється внаслідок абляції стінки. У виразі (2.13) вра-

ховано важливу особливість процесу: під час вимикання струмів короткого замикання підвищення тиску відбувається виключно в області автогенерації, об'єм якої є фіксованим (див. рис. 2.1). Тиск у камері стиснення K у цьому режимі істотно не впливає на характер витікання газу через соплові отвори до загального об'єму дугогасної системи.

Спираючись на підхід, викладений у попередньому підрозділі, можна отримати систему рівнянь такого вигляду:

$$\begin{cases} \dot{T}_w = q(t) \\ \dot{p} = \frac{k}{V_a} \left[\frac{k-1}{k} k_d U_d I_d - \dot{m}_r RT + k_w \dot{m}_w R_w T_w \right], \\ \dot{T} = T \left[\frac{\dot{p}}{p} - \frac{(\dot{m}_r - k_w \dot{m}_w) RT}{pV} \right] \end{cases}, \quad (2.14)$$

де

$$q(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } T_w \geq T_{\text{випр}} \\ \frac{U_d I_d (1 - k_d)}{c p_w \rho_w} & \text{при } T_w < T_{\text{випр}} \end{cases}; \quad (2.15)$$

$$\dot{m}_w = \begin{cases} 0 & \text{при } T_w < T_{\text{випр}} \\ \frac{f [U_d I_d (1 - k_d)]}{c p_w T_{\text{випр}} - H} & \text{при } T_w \geq T_{\text{випр}} \end{cases}, \quad (2.16)$$

де f – емпіричний коефіцієнт, значення якого в межах цієї роботи прийнято рівним 0,005; H – питома ентальпія утворення CF_4 , який є газоподібною фракцією матеріалу фторопластової стінки; $c p_w$ – питома теплоємність фторопласту; $T_{\text{випр}}$ – температура випаровування фторопласту; ρ_w – густина фторопласту; k_d – емпіричний коефіцієнт (у розрахунках прийнятий рівним 0,0005); k_w – коефіцієнт, який визначає внесення маси газу зі стінки в основний потік: значення 1 відповідає врахуванню абляції в моделі, а значення 0 – її відсутності.

У розділі було розглянуто принцип роботи автокомпресійного дугогасильного пристрою елегазового вимикача та побудовано математичну модель процесів, які відбуваються у його камерах під час вимикання струму. На основі конструктивних особливостей дугогасного вузла сформовано розрахункові схеми, які дають змогу описати зміну тиску, температури та витрати газу в часі, а також вплив руху поршня на ці параметри.

Для номінальних струмів використано модель, яка ґрунтується на енергетичному підході з урахуванням стиснення елегазу та його витікання через соплові канали. Дуга у цьому режимі розглядається як додаткове теплове навантаження, яке змінює термодинамічний стан газу та формує умови, необхідні для відновлення діелектричної міцності вимикача.

Окремо проаналізовано режим вимкнення струмів короткого замикання. У цьому випадку у роботу вступають процеси, які не проявляються при номінальних струмах: абляційне руйнування стінок каналу, різке збільшення кількості гарячих газів та швидке наростання тиску в камері автогенерації. На основі підходів, запропонованих у роботах Л. Німейєра та подальших дослідженнях, до моделі було введено додаткові члени, які враховують тепловий внесок випромінювання дуги та масу газоподібної фракції, яка утворюється від випаровування фторопластових елементів.

У результаті побудована система рівнянь описує як нормальний режим роботи дугогасного вузла, так і аварійні процеси, характерні для КЗ. Така модель дає можливість кількісно оцінювати поведінку дуги та параметри газового середовища, а також створює основу для подальшого комп'ютерного моделювання, яке наведено у наступному розділі.

З РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОКОМПРЕСІЙНОМУ ДУГОГАСИЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ

3.1 Реалізація математичної моделі в *MathCad*

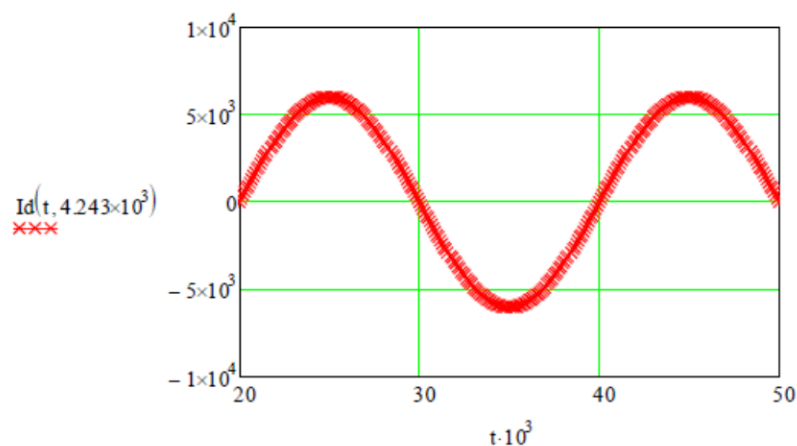
У сучасних високовольтних комутаційних апаратах процес гасіння дуги визначається насамперед тим, як змінюються параметри газового середовища у зоні її горіння. Під час комутації у вимикачі формуються швидкоплинні теплофізичні та газодинамічні явища: різке підвищення тиску, нагрів та розширення газу, інтенсивні масові потоки та локальне руйнування поверхні ізолюючих деталей. Сукупність цих процесів суттєво впливає на можливість успішного збільшення діелектричної міцності апарата в момент переходу струму через нуль. Тому точне математичне моделювання параметрів газового середовища становить ключову задачу під час дослідження та проектування комутаційних пристроїв [18].

Оскільки більшість параметрів дугогасної камери під час роботи змінюються у часі та залежать одне від одного, їх аналітичний опис зводиться до системи нелінійних диференціальних рівнянь. Без спеціалізованих числових методів таку систему розв'язати практично неможливо. Тому у цій роботі для реалізації математичної моделі обрано середовище *MathCad*, яке дає змогу виконувати розрахунки із великою кількістю рівнянь, гнучко задавати граничні умови та будувати графіки для подальшого аналізу [19].

Розроблена модель описує газодинамічну поведінку середовища у каналі, через який протікає струм електричної дуги. До моделі включено тепловий вплив дуги, зміну тиску, витік газу через сопло, охолодження стінок, а також геометричну деформацію каналу, зумовлену локальним випаровуванням матеріалу. У цілому така модель дає змогу відтворити характерні процеси, які відбуваються всередині дугогасної камери під час комутації, та оцінити їхній вплив на ефективність гасіння дуги.

Нижче представлено розроблену математичну модель у програмному комплексі *MathCad*. Розроблена модель дає змогу здійснювати аналіз динамічних процесів у дугогасильній камері елегазового вимикача при відмиканні вимикачем номінальних струмів.

$$\begin{aligned}
 p_a &:= 10^5 \\
 d_1 &:= 20 \cdot 10^{-3} && \text{діаметр металевого сопла} \\
 d_2 &:= 18 \cdot 10^{-3} && \text{діаметр ізоляційного сопла} \\
 m &:= 30 && \text{маса поршня} \\
 l &:= 0.1 && \text{хід поршня} \\
 Rg_{sB} &:= \frac{848 \cdot 9.81}{146} = 56.979 \\
 k(g) &:= 1.1 \\
 p_0 &:= 4.5 \cdot 10^5 && \text{початковий об'єм} \\
 T_0 &:= 293 && \text{початкова температура} \\
 F_a &:= 7 \cdot 10^3 && \text{активне зусилля на поршень} \\
 d &:= 160 \cdot 10^{-3} = 0.16 && \text{оптимальний діаметр поршня} \\
 S_s &:= \frac{\pi d^2}{4} = 0.02 \\
 Rg(g) &:= Rg_{sB} \\
 p_{kr}(g) &:= \left(\frac{2}{k(g) + 1} \right)^{\frac{k(g)}{k(g) - 1}} \\
 p_{kr}(g) &:= \left(\frac{2}{k(g) + 1} \right)^{\frac{k(g)}{k(g) - 1}} \\
 U_d(t) &:= 110 \cdot 10^3 && f := 50 \quad \omega := (2\pi) \cdot f = 314.159 \\
 I_d(t, I_a) &:= I_a \cdot \sqrt{2} \cdot \sin[\omega \cdot (t)] && t := 0, 0.1 \cdot 10^{-3} \dots 400 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}$$



$$da(t, Ia, p, g) := \left| \begin{array}{l} a \leftarrow 0.5 \cdot 0.0057 \cdot \left(\frac{1.5}{\frac{1}{pa} \cdot \left| \begin{array}{l} p \text{ if } p \leq p_{kr}(g) \cdot p0 \\ p_{kr}(g) \cdot p0 \text{ otherwise} \end{array} \right|} \right)^{0.25} \cdot \sqrt{|Id(t, Ia)|} \cdot 10^{-3} \\ a \leftarrow \min(d1, d2) - 2 \cdot 10^{-3} \text{ if } a > \min(d1, d2) - 2 \cdot 10^{-3} \\ \text{return } a \end{array} \right|$$

$$tk := 0.1$$

$$N_{\text{max}} := 200$$

$$kd := 5 \cdot 10^{-4} \quad l = 0.12$$

$$Seff(x, t, Ia, p, g) := \left| \begin{array}{l} 0 \text{ if } x < 0.03 \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \frac{\pi \cdot d1^2}{4} + \frac{\pi \cdot d2^2}{4} - \frac{\pi \cdot da(t, Ia, p, g)^2}{4} \\ \text{return } a \text{ if } a > 0 \\ \text{return } 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \end{array} \right|$$

$$dm(p, T, x, t, Ia, g) := \left| \begin{array}{l} R \leftarrow Rg(g) \\ m \leftarrow p \cdot Seff(x, t, Ia, p, g) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k(g)}{(k(g) - 1) \cdot R \cdot T}} \cdot \left| \begin{array}{l} \sqrt{\left(\left(\frac{p0}{p} \right)^{\frac{2}{k(g)}} - \left(\frac{p0}{p} \right)^{\frac{(k(g)+1)}{k(g)}} \right)} \text{ if } 1 \geq \frac{p0}{p} \geq p_{kr}(g) \\ \sqrt{\left(\left(\frac{2}{k(g)+1} \right)^{\frac{2}{(k(g)-1)}} \cdot \left(\frac{k(g)-1}{k(g)+1} \right) \right)} \text{ if } 0 \leq \frac{p0}{p} < p_{kr}(g) \\ 0 \text{ if } \frac{p0}{p} > 1 \vee \frac{p0}{p} < 0 \end{array} \right. \\ \text{return } m \end{array} \right|$$

$$tk_{\text{max}} := 8 \cdot 10^{-2} = 0.08$$

$$lsb := 0.8 = 0.096 \quad lse := 0.9 = 0.108$$

$$a(u, x) := \frac{0 - u}{lse - x}$$

$$Fc(u, x, u0) := m \cdot u \cdot a(u0, lsb)$$

$$RHS(t, x, u, p, Fa, u0) := \left| \begin{array}{l} \text{if } x \leq lsb \\ \left| \begin{array}{l} rhs \leftarrow Fa - (p - p0) \cdot Ss \text{ if } [Fa - (p - p0) \cdot Ss] \geq 0 \\ rhs \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ rhs \leftarrow Fc(u, x, u0) \text{ if } lsb < x \leq lse \\ rhs \leftarrow 0 \text{ otherwise} \\ \text{return } rhs \end{array} \right|$$

$$V_{\text{max}} := 0.5 \cdot 10^{-3}$$

Given

$$m \cdot \left(\frac{d}{dt} u(t) \right) = \text{RHS}(t, x(t), u(t), p(t), Fa, u0)$$

$$\frac{d}{dt} x(t) = \begin{cases} u(t) & \text{if } (x(t) \leq lse) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} p(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } p(t) < p0 \\ \frac{k(g)}{Ss \cdot (1 - x(t)) + V} \cdot \left[\frac{(k(g) - 1)}{k(g)} \cdot |Ud(t) \cdot Id(t, Ia)| \cdot (kd) - dm(p(t), T(t), x(t), t, Ia, g) \cdot Rg(g) \cdot T(t) + p(t) \cdot Ss \cdot (u(t)) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} T(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } T(t) < 0 \\ T(t) \cdot \left[\frac{\left(\frac{d}{dt} p(t) \right)}{p(t)} - \frac{\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)}{1 - x(t) + \frac{V}{Ss}} + \frac{Rg(g) \cdot T(t) \cdot dm(p(t), T(t), x(t), t, Ia, g)}{p(t) \cdot [V + Ss \cdot (1 - x(t))]} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$p(0) = p0 \quad T(0) = Tc \quad x(0) = 0 \quad u(0) = 0$$

$$\text{fil}(Ia, g, u0) := \text{Odesolve} \left[\begin{pmatrix} x \\ u \\ p \\ T \end{pmatrix}, t, tk, N \right]$$

$$\underset{\text{xxx}}{f}(Ia, g) := \begin{cases} z \leftarrow \text{fil}(Ia, g, 0) \\ x \leftarrow z_0 \\ u \leftarrow z_1 \\ t0 \leftarrow tk \text{ on error } t0 \leftarrow \text{root}(x(t) - lsb, t, 0, tk) \\ u0 \leftarrow u(t0) \\ z \leftarrow \text{fil}(Ia, g, u0) \\ \text{return } z \end{cases}$$

$$t := 0, \frac{tk}{150} \dots tk$$

$$\underset{\text{xxx}}{m} := f(0, "s\mathfrak{f}")$$

$$m1 := f(3.15 \cdot 10^3, "s\mathfrak{f}")$$

$$p := m_2$$

$$p1 := m1_2$$

$$x := m_0$$

$$x1 := m1_0$$

$$u := m_1$$

$$u1 := m1_1$$

$$\underset{\text{xxx}}{T} := m_3$$

$$T1 := m1_3$$

3.2 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції при відмиканні номінальних струмів

Під час чисельного моделювання геометричні параметри дугогасного устаткування вимикача не уточнювалися за методиками, наведеними у [19]. Це пов'язано з тим, що головною метою кваліфікаційної роботи є вивчення динаміки параметрів дугогасного середовища в камерах стиснення та автогенерації для конкретного, реально існуючого вимикача. Усі розрахунки виконувалися з використанням фактичних геометричних розмірів дугогасного пристрою:

- діаметр ізоляційного сопла: $d_1 = 18$ мм;
- діаметр металевого сопла: $d_2 = 20$ мм;
- діаметр поршня: $d_n = 160$ мм;
- хід поршня: $l = 0,15$ м;
- об'єм камери автогенерації: $V_a = 0,5$ л;
- початковий тиск у системі: $p_0 = 4,5$ Па;
- початкова температура: $T_0 = 293$ К.

Ми згадували у першому розділі, що у вимикачі застосовується пружинний привод. За умов вимикання ємнісних струмів швидкість руху поршня обмежується величиною не більше ніж 5 м/с. З цієї причини в моделюванні прийнято значення сили привода $F_a = 7$ кН, що забезпечує швидкість переміщення поршня, наближену до встановленої вимогами.

Результати комп'ютерної симуляції представлено на рисунках 3.1 – 3.4.

На рисунку 3.1 представлено залежність переміщення поршня від часу. На графіку представлено траєкторії руху для двох режимів: за відсутності дугового струму $I = 0$ кА та при номінальному струмі $I = 3,15$ кА. Різниця між кривими є незначною, однак у режимі $I = 0$ кА поршень сягає максимального ходу дещо швидше, оскільки рух не ускладнюється додатковим тепловим опором, пов'язаним із протіканням дуги.

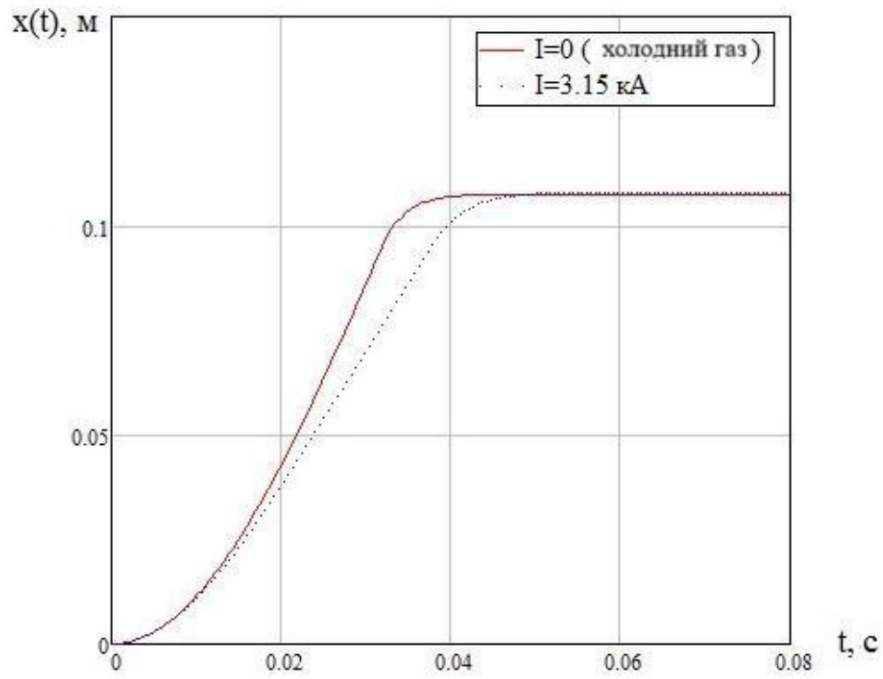


Рисунок 3.1 – Переміщення поршня в часі

На рисунку 3.2 представлено залежність тиску від часу.

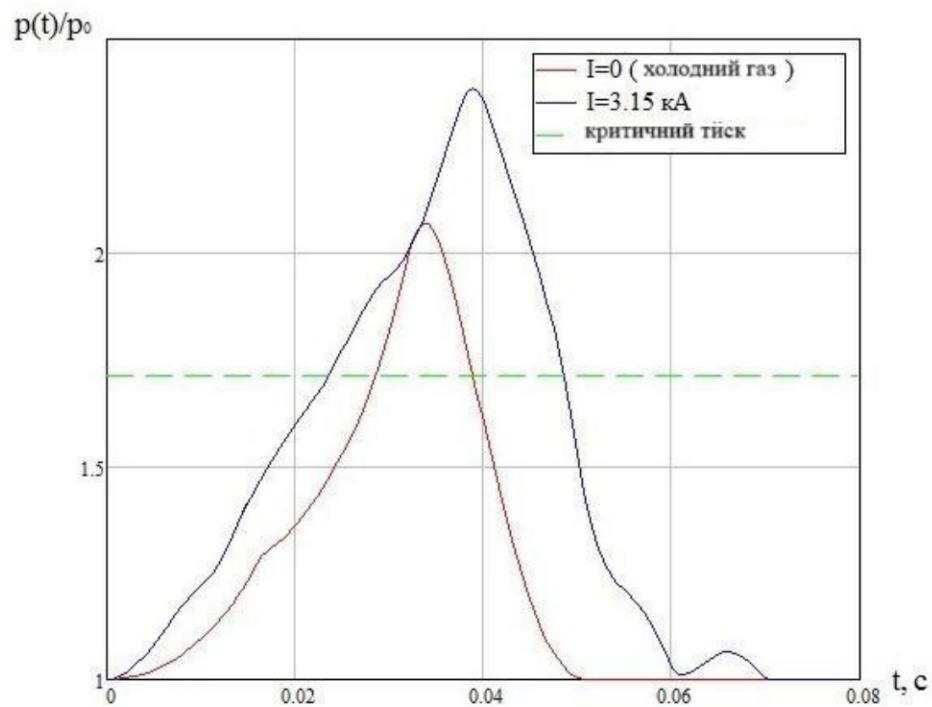


Рисунок 3.2 – Зміна тиску у камері від часу

При комутації ємнісних струмів максимальне підвищення тиску у камері становить приблизно $p / p_0 = 2$, тоді як середнє значення тиску протягом процесу дорівнює близько $1,4 p_0$.

У режимі відмикання номінальних струмів тиск у камері стиснення та в камері автогенерації зростає інтенсивніше: максимальна величина досягає приблизно $p / p_0 = 2,5$, а середній рівень тиску становить $1,69 p_0$. Це значення відповідає критичному перепаду тиску для елегазу.

Відтак, протягом практично усього контрольного ходу поршня забезпечується критичний режим витікання елегазу через сопла. У таких умовах досягається максимальна інтенсивність тепловідведення від дуги, що забезпечує найсприятливіші умови для її ефективного гасіння.

На рисунку 3.3 представлено залежність температури від часу. При відключенні при $I = 0$ кА температура газу у камері практично не змінюється: вона залишається близькою до початкової й лише незначно коливається навколо значення $T = 300$ К. Натомість у режимі при $I = 3.15$ кА спостерігається інтенсивне зростання температури. Уже до моменту $t = 0.08$ с температура у камері сягає величини $T = 1.8 \cdot 10^3$ К, що відображає суттєве тепловиділення дуги та активний нагрів елегазу.

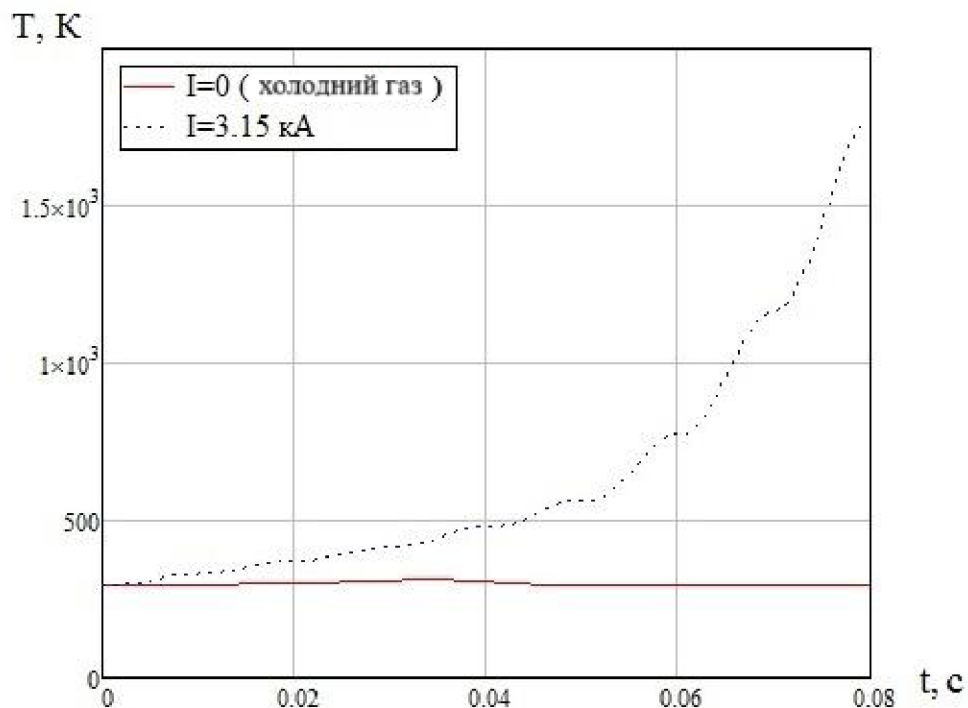


Рисунок 3.3 – Залежність температури від часу

На рисунку 3.4 представлено зміну швидкості руху поршня в часі. Як видно з графіка, у режимі $I = 0$ кА швидкість руху поршня дещо вища, ніж

при $I = 3,15$ кА, але все ж не перевищує 5 м/с, що є типовим для приводу пружинного типу.

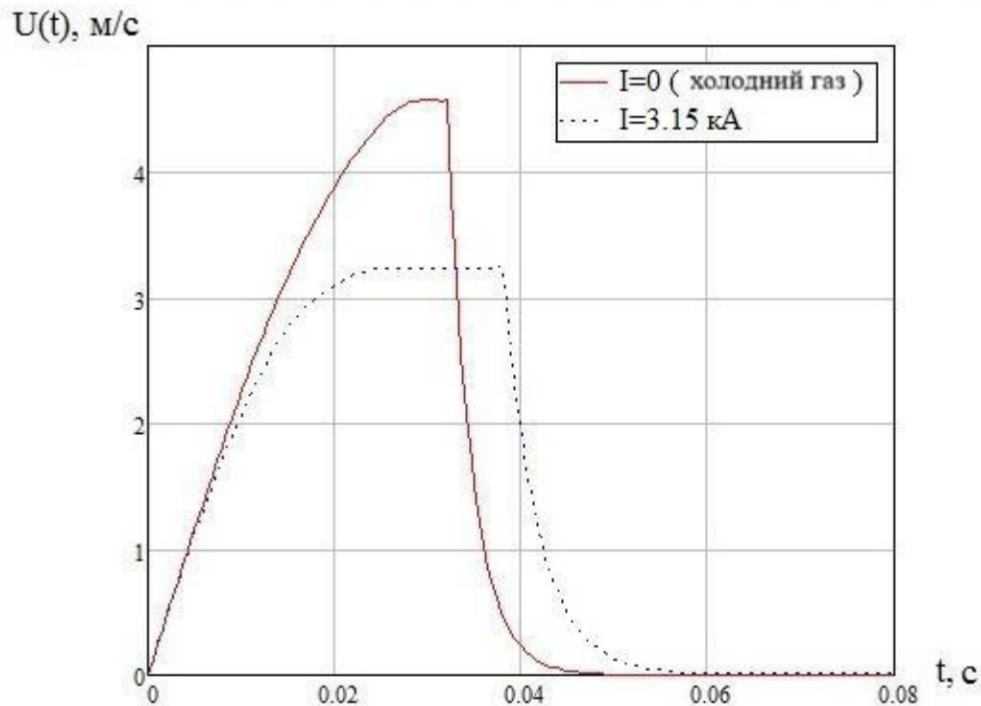


Рисунок 3.4 – Зміна швидкості руху поршня в часі

Під час відмикання номінального струму швидкість поршня зменшується порівняно з режимом $I = 0$ кА. Це пояснюється тим, що за наявності дуги тиск у камері стиснення є більшим (див. рисунок 3.2), ніж при її відсутності. Вищий тиск створює додатковий протитиск на поршень, що призводить до помітного його уповільнення.

3.3 Аналіз результатів комп'ютерної симуляції при відмиканні струмів короткого замикання

Для відмикання струмів короткого замикання розрахунки виконували для трьох варіантів роботи камери автогенерації:

- перший режим – камера функціонує як автокомпресійна, при цьому абляційне руйнування стінок не враховувалось ($k_w = 0$);
- другий режим – у моделі передбачено вплив абляції стінок камери ($k_w = 1$);

- третій режим – аналогічний до попереднього, але зі зменшеним об'ємом камери до $0,5V_a$ ($k_w = 1$).

Графічні результати розрахунків представлено на рисунках 3.5 – 3.8.

На рисунку 3.5 представлено періодичний процес струму короткого замикання.

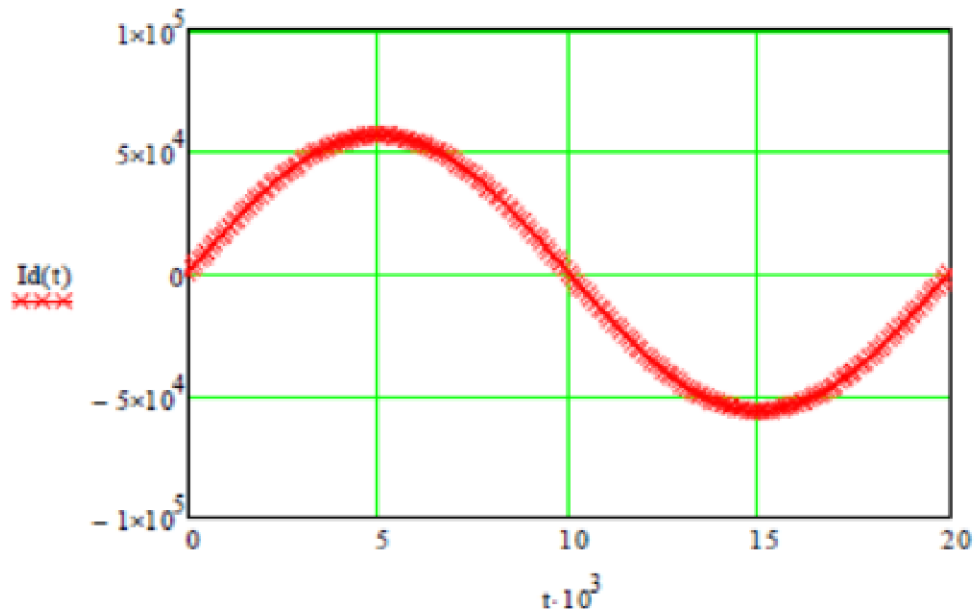


Рисунок 3.5 – Періодичний процес струму короткого замикання

Для функції струму короткого замикання, представленої на рисунку 3.5, будемо здійснювати розрахунки решти функціональних залежностей для дугогасильного пристрою елегазового вимикача.

На рисунку 3.6 представлено зміну тиску у камері автогенерації після відмикання струмів короткого замикання у конструкції дугогасильного пристрою та динаміку струму у часі. Із графіка видно, що формування тиску у камері суттєво залежить й від появи абляції стінки, та від її об'єму. За умови об'єму, рівного V_a , наявність абляції приводить до збільшення максимального тиску приблизно у 1,3 раза (з $1,8p_0$ до $2,3p_0$), що відповідає різниці між червоною та синьою кривими. Додаткове зменшення об'єму камери на 50 % спричиняє подальше підвищення пікового тиску приблизно в 1,2 раза (з $2,3p_0$ до $2,8p_0$), що відображено на синій та зеленій лініях.

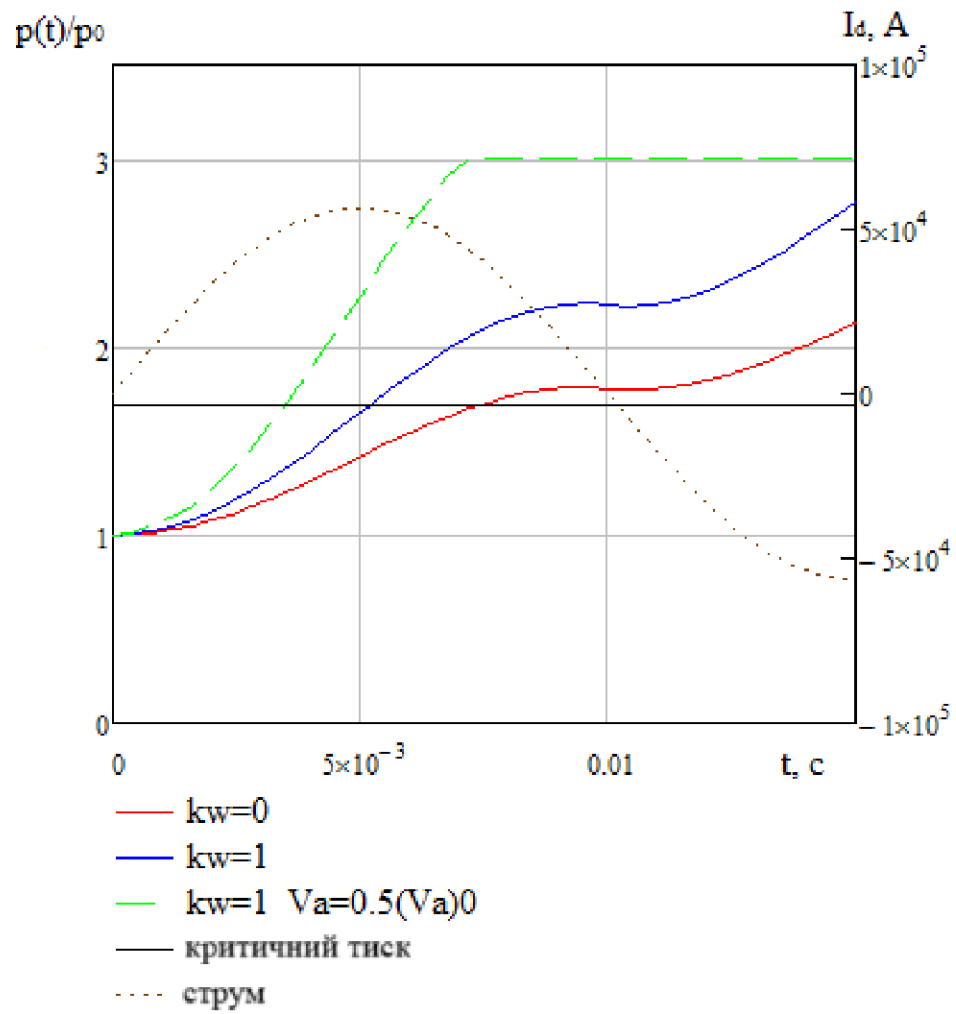


Рисунок 3.6 – Функціональні залежності тиску від часу

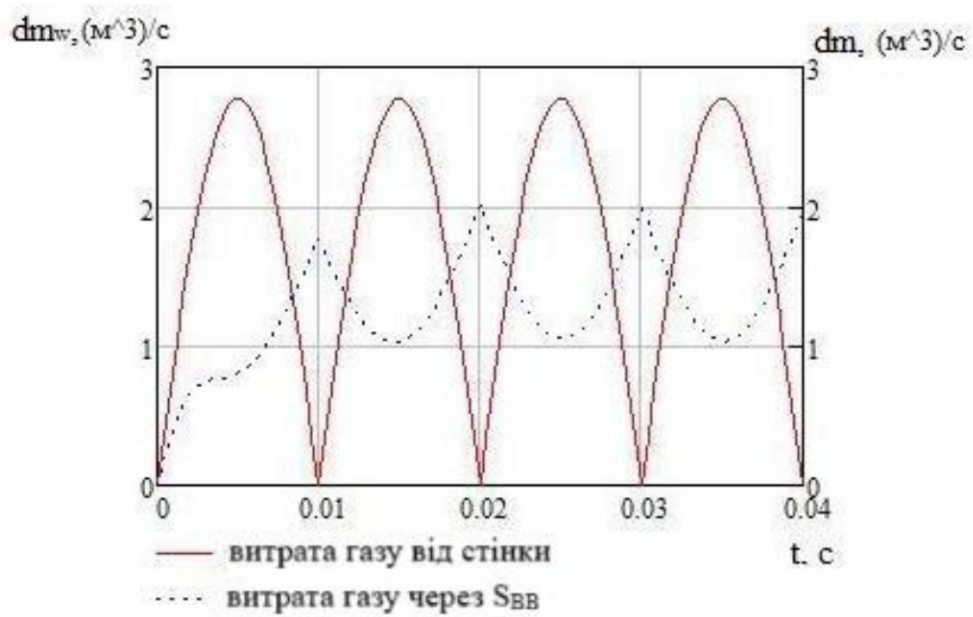


Рисунок 3.7 – Залежність витрати газу від часу

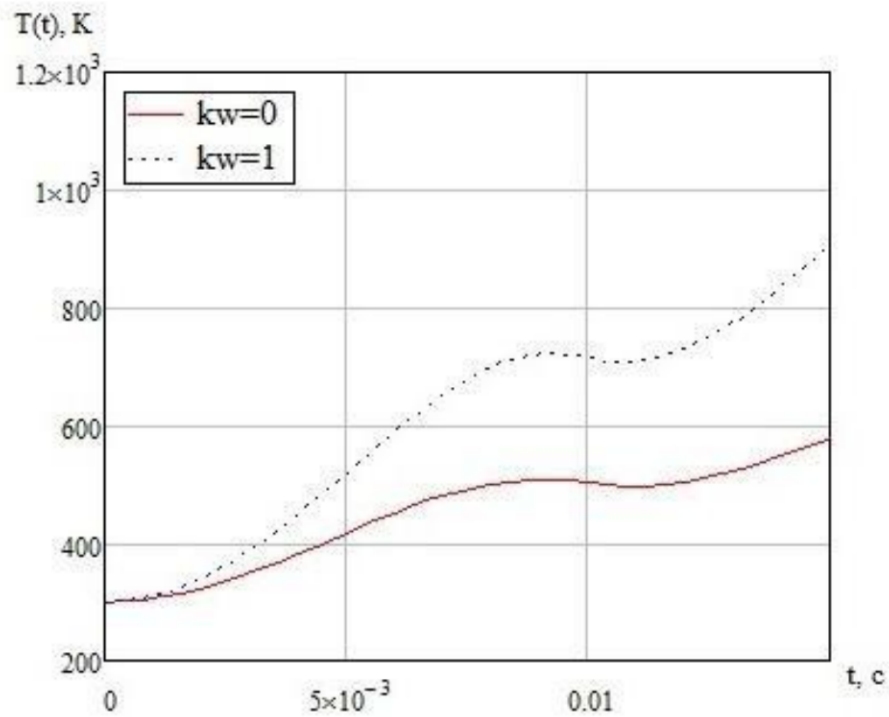


Рисунок 3.8 – Залежність температури від часу

Зміна температури в камері представлена на рисунку 3.8. Із графіка видно, що за умови врахування абляції стінок ($k_w = 1$) температура суттєво вища, ніж у випадку її відсутності ($k_w = 0$). Наприклад, у момент часу $t = 0,015$ мс температура при моделюванні з урахуванням абляції становить приблизно $T = 1,08 \cdot 10^3$ К, тоді як без врахування цього ефекту вона підвищується лише до близько $T = 590$ К.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Електричні небезпеки при експлуатації елегазового вимикача 110 кВ

Елегазові вимикачі класу напруги 110 кВ належать до високовольтного обладнання підвищеної небезпеки, і тому під час їх експлуатації та технічного обслуговування персонал зазнає впливу низки електричних факторів, потенційно небезпечних для здоров'я та життя. Основні з них наведені нижче.

1. Ураження електричним струмом. Робота на обладнанні, що перебуває під напругою 110 кВ, пов'язана з безпосередньою загрозою проходження струму через тіло людини при випадковому доторканні до струмопровідних частин або зон з небезпечною напруженістю електричного поля. Навіть короточасний контакт у таких умовах є смертельно небезпечним, оскільки величина струму значно перевищує пороги фізіологічного впливу на організм. Особливу небезпеку становлять робочі місця у відкритих РП та КРУЕ, де наявність відкритих струмопровідних частин поєднується з обмеженим простором для переміщення персоналу [20].

2. Можливість виникнення крокової та дотикової напруги. У разі однофазного замикання на землю або пробією ізоляції у зоні розташування вимикача можливе формування небезпечного розподілу потенціалів на поверхні ґрунту. Це призводить до виникнення крокової напруги, здатної спричинити ураження струмом навіть без безпосереднього контакту з обладнанням. Аналогічно, при наближенні або доторканні до металевих конструкцій, що випадково опинилися під напругою через пошкодження ізоляції, персонал зазнає ризику дотикової напруги. У середовищах КРУЕ цей фактор підсилюється високою провідністю металевих конструкцій та невеликою відстанню між ними.

3. Небезпека залишкового заряду на ємнісних елементах. Після вимкнення вимикача та зняття робочої напруги окремі частини електрообладнання можуть зберігати значний залишковий заряд, обумовлений ємнісними властивостями комірки, трансформаторів напруги, кабельних вставок та вла-

сне конструкції вимикача 110 кВ. За відсутності своєчасного заземлення цей заряд здатен викликати електричний удар під час доторкання до струмопровідних або конструктивно пов'язаних частин. Особливо актуальним цей ризик є під час відкриття газової камери, проведення ревізії дугогасильного пристрою чи демонтажних операцій.

4.2 Засоби та заходи безпеки при роботі з елегазовим обладнанням

Газ SF_6 поставляється в балонах у рідкому вигляді. Тиск SF_6 становить приблизно 22 атмосфери. З цим газом можна працювати на відкритому повітрі без будь-яких спеціальних засобів захисту. При роботі в закритому приміщенні з газом SF_6 необхідно враховувати наступне [21]:

- граничне порогове значення TLV для нового газу SF_6 дорівнює 6000 мг/м³, а це означає, що робітники можуть перебувати у середовищі з концентрацією газу до даного рівня протягом восьми годин на добу, не більше чим раз на тиждень. TLV не є показником потенційної токсичності, скоріше це значення, що присвоюється газам, яких не існує в атмосфері при нормальних умовах;

- необхідно дотримуватися звичайних застережних заходів при роботі з балонами зі стисненим повітрям. Наприклад, раптовий випуск стисненого газу створює низькі температури, що можуть викликати швидке заморожування. Обслуговуючий персонал, який працює з таким обладнанням, повинен використовувати теплоізолюючі рукавички;

- якщо обладнання необхідно заповнити новим газом SF_6 то необхідно дотримуватися інструкцій в наступному порядку:

- 1) переконатися в належній якості газу SF_6 в обладнанні;
- 2) усунути будь-який ризик створення надмірного тиску в заповненому корпусі.

Крім того, під час заповнювання обладнання необхідно уникати витоку газу SF_6 в атмосферу. Герметичне обладнання середньої напруги не потребує обслуговування частин, що знаходяться всередині елегазових вимикачів. Од-

нак для деяких конструкцій КРУЕ середньої напруги може знадобитися обслуговування, а для більшості вимикачів середньої напруги обслуговування повинно здійснюватися на періодичній основі. Розширення розподільного щита КРУЕ як середньої, так і високої напруги може вимагати виділення SF_6 . Для надання інформації щодо безпечних методів роботи в даних умовах існує багато норм і правил, а також рекомендації виробника. Також можливі нештатні ситуації, що виникають хоч і дуже рідко, проте можуть призвести до неконтрольованого випуску газу SF_6 і виникнення ризику для обслуговуючого персоналу. До них належать:

- нештатний витік газу внаслідок розгерметизації корпусу, в якому міститься газ SF_6 ;
- внутрішнє коротке замикання – наслідок неконтрольованого утворення дуги в корпусі, в якому міститься газ SF_6 ;
- зовнішнє загоряння, що приводить до нештатного витоку.

При позаштатному витоку методи оцінки ризику подібні до методу, який відноситься до звичайного витоку. Якщо витік всього газу SF_6 в одному з вимикачів відбувся раптово, при цьому приміщення підстанції герметичне, а вентиляція не працює, то у цьому випадку концентрація продукту розпаду SO_2F_2 досягла б $54,0 \text{ мг/м}^3$, тобто приблизно в 6 разів більше граничного порогового значення TLV . Однак на практиці вимикачі забезпечені датчиками зниження тиску, які спрацьовують при падінні тиску до 80 % від величини нормального тиску заповнення. Тоді лише 20 % газу SF_6 потрапляє в приміщення підстанції, внаслідок чого концентрація SO_2F_2 стає рівною $10,8 \text{ мг/м}^3$. Отже, TLV для SO_2F_2 ($9,6 \text{ г/м}^3$) може бути перевищений, але не критично. За цих обставин вплив протягом короткого часу представляє незначний ризик. Гострий неприємний запах SO_2F_2 можна відчуту при концентрації приблизно 6 мг/м^3 , і це означає, що більшість людей негайно відчує присутність газу при концентраціях, що наближаються до TLV . Однак для того, щоб визначити наявність газу, повітря вдихати не рекомендується. Внутрішнє коротке замикання може статися, якщо дуга неправильно виникла між головними контак-

тами комутаційного пристрою або між головним контактом і заземленням. Такі замикання відбуваються дуже рідко.

Неправильне виникнення дуги призводить до швидкого збільшення тиску, що може призвести до викиду гарячих газів та інших продуктів розпаду. Існують три можливі причини виникнення таких замикань:

1) внутрішнє коротке замикання, яке не призводить до нештатному викиду газу SF_6 . Це може статися, якщо енергія, обумовлена коротким замиканням, недостатня для того, щоб викликати загоряння або спрацювання запобіжного клапана (пристрої розвантаження тиску);

2) внутрішнє коротке замикання, при якому енергія дуги призводить до розплавлення стінки (зазвичай металевої, що утворює один з електродів дуги) або її випаровуванню, в результаті чого в стінці утворюється отвір. Цей тип замикання відноситься головним чином до КРУЕ високої напруги;

3) внутрішнє коротке замикання, при якому підвищення тиску в корпусі є достатнім для спрацювання пристрою розвантаження тиску. Цей процес керується перепускним клапаном або відбувається руйнування спеціально ослабленої області корпусу, що призводить до спрямованого викиду гарячого газу.

Займання на відкритому повітрі рідко створює проблеми внаслідок відсутності вогнебезпечного матеріалу поруч з комутаційним обладнанням. Для обладнання всередині приміщення, особливо для підстанцій середньої напруги, існує великий ризик загоряння поруч з комутаційним обладнанням. Дослідження показали, що температура загоряння рідко перевищує $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура поряд з корпусами елегазового обладнання, захищеного зовнішньою металевою обшивкою, буде набагато нижче цього значення. Тому дуже малоймовірно, щоб викид SF_6 був викликаний загорянням. Якщо загоряння все ж сталося, середні температури, будуть занадто низькими, щоб привести до істотного розпаду, для якого потрібна температура не менше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. SF_6 не запалюється і гаситиме загорання. Робітники, що беруть участь у боротьбі з пожежею, повинні використовувати відповідне спорядження для захисту від парів палаючої пластмаси.

Контроль елегазу (SF_6) здійснюється датчиками густини - густиноміром (денсиметром), з декількома рівнями спрацьовування:

I ступінь спрацьовування – падіння тиску SF_6 (оранжевий колір шкали). При 1 ступені «зняття напруги з відсіку з падаючим тиском не потрібно». Рекомендується: почати підготовчі заходи щодо забезпечення виведення відсіку в ремонт в разі подальшого падіння тиску.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд денсиметра

II ступінь – мінімальний робочий тиск (червоний колір шкали). Якщо цей рівень виникає у вимикачі - відбувається автоматичне блокування функцій. При подальшому витокі тиск падає до 1 Бар. При цьому тиску зберігається здатність витримувати номінальну робочу напругу. Ізоляційна здатність для перенапруг не зберігається. Загальний вигляд денсиметра показано на рис. 5.1.

4.3 Механічні та експлуатаційні небезпеки

Під час експлуатації елегазового вимикача 110 кВ персонал стикається не лише з електричними, а й із низкою механічних та технологічних небезпек, що зумовлені конструктивними особливостями апарата, підвищеним тиском робочого середовища та наявністю рухомих елементів приводу.

1. Високий тиск SF_6 у газовій комірці. Елегазовий вимикач працює при надлишковому тиску газу, який зазвичай становить 0,5 – 0,7 МПа, залежно від конкретної моделі та температурних умов. Наявність у камері такого тиску створює потенційно небезпечні умови для обслуговуючого персоналу: будь-яке порушення герметичності ущільнень, різке механічне пошкодження або неправильне поводження з газовою системою може призвести до раптового викиду газу та отримання травм від дії ударної хвилі чи уламків конструктивних елементів [20].

2. Небезпека вибуху або розгерметизації бака. Пошкодження корпусу бака або внутрішніх елементів вимикача може спричинити швидке вивільнення енергії, що накопичена у вигляді тиску SF_6 . Хоч елегаз є негорючим і термічно стабільним, руйнування оболонки апарата здатне супроводжуватися різким розривом металу та розльотом фрагментів, що становить серйозну небезпеку для персоналу в зоні обслуговування. Подібні ситуації можуть виникати при дефектах зварних швів, механічному зношенні, корозії або порушенні правил технічного обслуговування.

3. Викид газу через запобіжний клапан. У конструкції вимикача передбачені запобіжні клапани, які відкриваються при критичному підвищенні тиску. Спрацювання клапана супроводжується різким та інтенсивним виходом газу, що створює локальний надлишковий тиск і сильний звуковий вплив. В окремих випадках газ може переносити частинки продуктів розкладу SF_6 , що додатково підвищує ризики для здоров'я. Персонал має перебувати поза зоною можливого викиду та не проводити роботи поблизу клапанів під час увімкненого обладнання.

4. Рухомі частини електромагнітного або пружинного приводу. Конструкція вимикача містить потужні механізми керування – пружинні, електромагнітні або гідравлічні приводи, які під час спрацювання здійснюють швидке переміщення контактів. Неправильне поводження з приводом, перебування в зоні його роботи або втручання під час заряджання пружин може призвести до механічних травм. Крім того, під час ремонтних робіт існує небез-

пека неконтрольованого спрацювання механізму через помилку оператора або залишковий запас енергії у приводі.

4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

У процесі роботи елегазових вимикачів 110 кВ можливе виникнення ситуацій, що виходять за межі нормального режиму експлуатації і потребують негайного реагування персоналу. До таких належать аварійні витoki SF_6 , різкі зміни тиску в газовій камері, спрацювання запобіжних клапанів, пошкодження корпусу бака, а також нештатна робота приводу. Своєчасне виявлення та правильні дії персоналу дозволяють мінімізувати ризики для здоров'я та запобігти поширенню аварії [22].

1. Дії при аварійному падінні або зростанні тиску SF_6 . Різке зниження тиску газу свідчить про значний витік або розгерметизацію газової системи. У такому разі вимикач підлягає негайному виведенню з роботи, а комірка – відключенню від джерела живлення з подальшим заземленням. Персонал повинен залишити зону можливого витoku, забезпечити доступ свіжого повітря та викликати аварійну бригаду для локалізації ушкодження. При швидкому підвищенні тиску персонал також має покинути небезпечну зону, не допускаючи перебування перед вихідним каналом клапана.

2. Дії при спрацюванні запобіжного клапана. Спрацювання клапана супроводжується різким викидом газу під тиском, що може бути небезпечним як механічно, так і токсикологічно (у разі вмісту продуктів розкладу SF_6). Персонал повинен негайно відійти на безпечну відстань, не наближатися до апарата до повного припинення виходу газу та забезпечити інформування оперативного персоналу. Заборонено проводити будь-які роботи поблизу клапана одразу після його спрацювання, доки тиск у системі не буде стабілізований і не буде виконана відповідна діагностика.

3. Локалізація аварійного витoku SF_6 у приміщеннях КРУЕ. У разі витoku SF_6 у закритому середовищі існує ризик витіснення кисню та накопи-

чення газу у нижній частині приміщення через його значну густину. При появі характерного звуку витоку, запаху продуктів розкладу або спрацюванні датчиків персоналу забороняється залишатися в приміщенні без засобів індивідуального захисту органів дихання. Необхідно негайно відчинити вентиляційні канали, увімкнути аварійну вентиляцію та покинути приміщення до стабілізації параметрів атмосфери. Роботи з локалізації витоку мають проводитися у протигазах відповідного типу із знеструмленням обладнання.

4. Дії при імовірному викиді продуктів розкладу SF_6 . У разі аварійного гасіння дуги або внутрішнього пошкодження вимикача можливе утворення токсичних і корозійно-активних сполук, зокрема HF , SOF_2 та інших. При підозрі на присутність таких речовин персонал повинен негайно залишити приміщення, а доступ у зону аварії дозволяється лише у повному захисному комплекті (ізолювальний протигаз, хімічностійкий костюм, окуляри). Заборонено торкатися внутрішніх елементів вимикача без попередньої нейтралізації відкладень та проведення дегазації.

5. Нештатна робота або заклинювання приводу. У випадку ненормального звучання механізму приводу, затримки ходу контактів або неможливості виконання операції вмикання/вимикання необхідно припинити дистанційні команди, вивести вимикач у ремонт та заблокувати ручний привід. Заборонено перебувати поблизу механізму у момент ймовірного повторного автоматичного спрацювання, оскільки це може спричинити раптовий рух елементів з високою кінетичною енергією.

6. Загальні правила поведінки персоналу в аварійних ситуаціях. Усі дії мають виконуватися відповідно до оперативних інструкцій та планів ліквідації аварій. Не допускається проведення робіт одному працівнику. Заборонено намагатися усунути витік газу або відкривати елементи вимикача без повного знеструмлення обладнання, заземлення та перевірки відсутності залишкового заряду. Про всі прояви нештатної роботи негайно повідомляється диспетчер оперативної служби.

5 ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА НАСЛІДКІВ ВІДМОВИ ЕЛЕГАЗОВОГО ВИМИКАЧА 110 КВ

5.1 Постановка завдання економічної оцінки

Метою розділу є кількісна оцінка прямого й непрямого економічного збитку, який виникає внаслідок аварійної відмови елегазового вимикача 110 кВ, а також визначення заходів для мінімізації таких збитків. Завдання: розробити методику оцінки, обґрунтувати основні компоненти збитків, провести числові приклади й сформулювати рекомендації.

5.2 Компоненти економічних збитків

Економічний збиток S від одиначної аварії представляється як сума прямих та непрямих витрат [23]:

$$S = S_{\text{рем}} + S_{\text{зам}} + S_{\text{ен}} + S_{\text{НПО}} + S_{\text{штраф}} + S_{\text{ек}}, \quad (5.1)$$

де

$S_{\text{рем}}$ – витрати на аварійний ремонт (запчастини, робота, логістика);

$S_{\text{зам}}$ – витрати на заміну (якщо потрібно повна заміна вимикача);

$S_{\text{ен}}$ – втрачені доходи/вартість неотриманої електроенергії (ринкова ціна) або вартість невідпущеної енергії;

$S_{\text{НПО}}$ – витрати на незадоволений попит/вартість незабезпеченої енергії – економічний збиток споживачів;

$S_{\text{штраф}}$ – компенсації/штрафи/адміністративні витрати;

$S_{\text{ек}}$ – екологічні/додаткові витрати (дегазація, утилізація продуктів розпаду SF_6 , тощо).

Значення втраченої енергії (ринкова втрата/втрачений дохід) обчислюється за формулою:

$$S_{\text{ен}} = P_{\text{вт}} \cdot T \cdot c_{\text{ринок}}, \quad (5.2)$$

де $P_{вт}$ – значення потужності, що відключилась; T – тривалість відключення; $c_{ринк}$ – ринкова ціна на електроенергію).

Вартість незабезпеченої енергії обчислюється за формулою:

$$S_{НПО} = P_{вт} \cdot T \cdot VOLL, \quad (5.3)$$

де $VOLL$ – економічна оцінка збитку споживачів при відсутності електропостачання. Для різних категорій споживачів беруть різні $VOLL$ (промисловість, критична інфраструктура, побут).

Прямі ремонтні витрати – сума рахунків за заміну вузлів, робіт аварійної бригади, логістику. Для 110 кВ SF_6 вимикача типові оцінки (орієнтир): ремонт – десятки тисяч грн; повна заміна – сотні тисяч грн.

Інші статті – екологічні (дегазація, утилізація), штрафи, компенсації, транспортні втрати, репутаційні й організаційні витрати.

За умовами обчислення прийнято значення потужності, яка відключилась $P_{вт}$ – 100 МВт. Це значення прийнято, як середнє значення потужності, яке передається лінією електропередачі 110 кВ.

Тривалість відмикання T ми приймаємо 3 доби, які необхідні для повної заміни та налаштування вимикача (за умови його наявності на складі).

Ринкова ціна втрат електроенергії $c_{ринк}$, згідно з даними Market Operator, становить 4 878,06 грн/МВт·год.

Вартість незабезпеченої електроенергії ми прийняли за мінімальним значенням для населення у розмірі 10000 грн/МВт год.

Ну і цілком очевидно, що також, потрібно врахувати вартість повної заміни вимикача та додаткові супутні витрати (доставка, демонтаж, монтаж, пуск, налаштування, тощо). Вартість вимикача фірми АВВ ми прийняли 500 тис. грн., а додаткові супутні витрати у розмірі 300 тис. грн. Тобто, сумарне значення становить 800 тис. грн.

Врахувавши прийняті вище дані, ми здійснили обчислення за формулами (5.1) – (5.3). Результати проведених обчислень ми звели до таблиці 5.1, яка репрезентує збитки від аварії.

Таблиця 5.1 – Обчислені збитки

Компонент збитку	Формула	Значення, грн
Для енергопостачальної компанії		
Втрачений ринковий дохід	$S_{en} = 100 \cdot 72 \cdot 4878$	35 122 032 грн
Вартість повної заміни $S_{зам}$, (вимикач+додаткові витрати)	згідно прайсу [8]	800 000 грн
Разом (загальні збитки)	$S = S_{зам} + S_{en}$	35 922 032 грн
Для споживачів		
Збитки для споживачів	$S_{VOLL} = 7200 \cdot 10000$	72 000 000 грн

5.3 Практичні рекомендації для зменшення економічних ризиків

1. Доставка запасного вимикача / гарячий запас у регіоні – скорочує час відновлення з кількох тижнів до днів.
2. Контракти на аварійне сервісне обслуговування (SLA з чітким часом виїзду бригади та часом відновлення).
3. Системи дистанційного моніторингу стану SF_6 (денсиметри, аналізатори) – раннє виявлення витоків та планова заміна ущільнень.
4. Резервні лінії та дублювання ключових комутацій – мережеві заходи для зменшення відключеної потужності при виході з ладу одного вимикача.
5. Страхування ризиків від відмови обладнання та покриття втрат від незабезпеченої енергії (для критичних об'єктів).
6. План аварійного реагування та тренування персоналу – зменшує людські помилки та час усунення несправності.
7. Моделювання та оптимізація конструкції – показати виробнику/замовнику, які вузли слід укріпити чи замінити, щоб зменшити ймовірність відмови.

ВИСНОВКИ

У роботі було досліджено особливості роботи елегазового вимикача 110 кВ та поведінку газового середовища у його дугогасильному пристрої при різних режимах комутації. Здійснене математичне моделювання дало змогу простежити динаміку ключових параметрів та оцінити їхній вплив на можливість успішного гасіння дуги.

1. Проаналізовано конструктивні особливості елегазових вимикачів та принцип роботи автокомпресійного дугогасильного вузла. Також, розглянуто режими взаємодії вимикача з мережею та характеристики перехідної відновлювальної напруги, які визначають умови гасіння дуги.

2. Побудовано математичні моделі динаміки тиску, температури та масових витрат елегазу для номінальних та короткозамикальних струмів. Окремо враховано вплив абляції стінок каналу, що дало змогу точніше описати поведінку дуги під час КЗ.

3. Виконано чисельні розрахунки на основі побудованих моделей та здійснено аналіз отриманих графічних залежностей. Порівняння режимів показало, що наявність дуги та абляції суттєво змінює тиск та температуру у камері, яка впливає на ефективність відновлення діелектричної міцності.

4. Розглянуто фактори небезпеки, пов'язані з експлуатацією елегазових вимикачів, та наведено рекомендації щодо безпечної роботи й дій у надзвичайних ситуаціях. Особливу увагу приділено ризикам, пов'язаним з витоком SF_6 , підвищенням тиску та появою продуктів розкладу газу.

5. Здійснено техніко-економічні розрахунки збитків при аварії лінійного елегазового вимикача 110 кВ. Обчислення показали, що збитки при аваріях будуть становити 36 млн. грн.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Казанський С. В., Матеєнко Ю. П., Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник. Київ: Вид-во «Політехніка», 2017. 456 с.
2. Чабан В. Й. Математичне моделювання в електротехніці. Львів: Вид-во Т. Сороки., 2010. 284 с.
3. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова книга, 2004. 656 с.
4. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Харків: Вид-во «Точка», 2012. 340 с.
5. Лесько В. О., Комар В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати. Вінниця: ВНТУ, 2018. 102 с.
6. Бахор З. М., Журахівський А. В. Проектування підстанцій електричних мереж. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. 308 с.
7. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106159
8. <http://eknis.net/uploads/files/sf6-switch.pdf>
9. Лук'яненко Ю. В., Остапчук Ж. І., Кулик В. В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Вінниця: ВДТУ, 2002. 116 с.
10. Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Козловський О. А. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання: навч. посіб. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. 272 с.
11. Чолпан П. П. Фізика: підручник. Київ: Вища школа, 2004. 567 с.
12. Чабан А. Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Т. Сороки., 2015. 488 с.
13. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: підручник. Львів: В-во НУ»ЛП», 2009. 488 с.
14. Маліновський А. А., Хохулін Б. К. Основи електропостачання. Львів: Львівська політехніка, 2005. 324 с.
15. Бахрушин В. Є. Математичне моделювання: навч. посіб. Запоріжжя, 2003. 140 с.

16. Бардик Є. І. Експлуатація та режими роботи електростанцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 73 с.
17. Василега П. О. Електропостачання. Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. 415 с.
18. Гаряжа В. М., Карюк А. О. Електрична частина станцій та підстанцій: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 149 с.
19. Кундрат А. М., Кундрат М. М. Науково-технічні обчислення засобами MathCAD та MS Excel: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2014. 252 с.
20. Тимочко В.О., Городецький І. М., Березовецький А. П. та ін. Безпека життєдіяльності та охорона праці: навч. посібн. Львів: Сполом, 2022. 376 с.
21. Бондаренко В. О., Ганус О. І. , Старков К. О., Шевченко С. Ю. Охорона праці в електроенергетиці: навчальний посібник. Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2014. 286 с.
22. Касьянов М. А., Ревенко Ю. П., Тищенко Ю. А. Захист населення в умовах надзвичайних. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля., 2003. 183 с.
23. Мірошник О. О., Черкашина В. В., Мороз О. М., Черемісін М. М. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків: ФЛП Панов А. Н., 2018. 214 с.

ДОДАТКИ

Додаток А Реалізація математичної моделі в *MathCad* для струмів короткого замикання

$$p_a := 10^5$$

$$d1 := 40 \cdot 10^{-3}$$

$$d2 := 42 \cdot 10^{-3}$$

$$m := 80$$

$$l := 0.25$$

$$R_g := \frac{848 \cdot 9.81}{146} = 56.979 \quad k := 1.1 \quad p_{kr} := 0.59$$

$$p0 := 0.7 \cdot 10^6$$

$$T0 := 293$$

$$F_a := 30 \cdot 10^3$$

$$d := 220 \cdot 10^{-3} = 0.22$$

$$f := 50$$

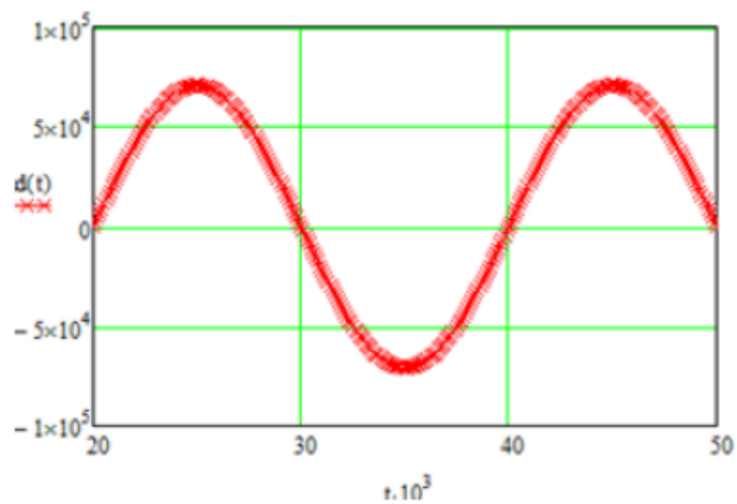
$$U_d(t) := 330 \cdot 10^3$$

$$I_a := 1 \cdot 50 \cdot 10^3$$

$$\omega := (2\pi) \cdot f = 314.159$$

$$Id(t) := I_a \cdot \sqrt{2} \cdot \sin[\omega \cdot (t)]$$

$$t := 0, 0.1 \cdot 10^{-3} .. 400 \cdot 10^{-3}$$



$$da(t) := 0.0057 \cdot \left(\frac{2}{\frac{p0}{pa}} \right)^{0.25} \cdot \sqrt{|ld(t)| \cdot 10^{-3}}$$

$$tk := 0.1$$

$$\underline{\underline{N}} := 100$$

$$tm := 0$$

$$kd := 5 \cdot 10^{-4}$$

$$\underline{\underline{tm}} := \text{root}(ld(tm) - la \cdot \sqrt{2}, tm) = 5 \times 10^{-3}$$

$$l = 0.25$$

$$Seff(x,t) := \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0.3 \cdot l \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} a \leftarrow \frac{\pi \cdot d1^2}{4} + \frac{\pi \cdot d2^2}{4} - \frac{\pi \cdot da(t)^2}{4} \\ \text{return } a \text{ if } a > 0 \\ \text{return } 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \end{cases}$$

$$dm(p,T,x,t) := p \cdot Seff(x,t) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-1) \cdot Rg \cdot T}} \cdot \begin{cases} \left[\left(\frac{p0}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p0}{p} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right] & \text{if } 1 \geq \frac{p0}{p} \geq p_{kr} \\ \sqrt{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{(k-1)}} \cdot \left(\frac{k-1}{k+1} \right)} & \text{if } 0 \leq \frac{p0}{p} < p_{kr} \\ 0 & \text{if } \frac{p0}{p} > 1 \vee \frac{p0}{p} < 0 \end{cases}$$

$$t := 0.005$$

$$ls := 0.98 \cdot l$$

$$\underline{\underline{tk}} := 6 \cdot 10^{-2} = 0.06$$

$$l = 0.25$$

Given

$$m \cdot \left(\frac{d}{dt} u(t) \right) = \begin{cases} [Fa - (p(t) - p0) \cdot S] & \text{if } u(t) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} x(t) = \begin{cases} u(t) & \text{if } x(t) < ls \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} p(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } (p(t) < p0) \vee (x(t) \geq ls) \\ \frac{k}{S \cdot (1 - x(t))} \cdot \left[\frac{(k-1)}{k} \cdot Ud(t) \cdot ld(t) \cdot (kd) - dm(p(t), T(t), x(t), t) \cdot Rg \cdot T(t) + p(t) \cdot S \cdot \left(\frac{d}{dt} x(t) \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{d}{dt} T(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } (T(t) < 0) \vee (x(t) \geq ls) \\ T(t) \cdot \left[\frac{\left(\frac{d}{dt} p(t) \right)}{p(t)} - \frac{\left(\frac{d}{dt} x(t) \right)}{1 - x(t)} + \frac{Rg \cdot T(t) \cdot dm(p(t), T(t), x(t), t)}{p(t) \cdot S \cdot (1 - x(t))} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$p(0) = p0$	$x(0) = 0$	
$T(0) = T0$	$u(0) = 0$	
$f(S) := \text{Odesolve}\left[\begin{pmatrix} x \\ u \\ p \\ T \end{pmatrix}, t, tk, N\right]$		
2	3	4
$\underline{d} := 256 \cdot 10^{-3}$	$dd1 := 209 \cdot 10^{-3}$	$dd2 := 181 \cdot 10^{-3}$
$\underline{S} := \frac{\pi \cdot (d)^2}{4}$	$S1 := \frac{\pi \cdot (dd1)^2}{4}$	$S2 := \frac{\pi \cdot (dd2)^2}{4}$
$z := f(S)$	$z1 := f(S1)$	$z2 := f(S2)$
$x := z_0$	$x1 := z1_0$	$x2 := z2_0$
$u := z_1$	$u1 := z1_1$	$u2 := z2_1$
$p := z_2$	$p1 := z1_2$	$p2 := z2_2$
$\underline{T} := z_3$	$T1 := z1_3$	$T2 := z2_3$