

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 120 с., 17 рис., 19 табл., 46 джерел.

### **АКТИВНА ЧАСТИНА, МАГНІТОПРОВІД, КОТУШКА, ОБМОТКА, ВИПРОБУВАЛЬНА НАПРУГА, КЛАС ТОЧНОСТІ, ПОХИБКА, ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ, ЗАКОН РОЗПОДІЛУ.**

Об'єкт дослідження – каскадний маслonaповнений трансформатор напруги на номінальну напругу 500 кВ.

Мета роботи – удосконалення структури трансформатора напруги і дослідження впливу параметрів електричного поля на експлуатаційну надійність опорної ізоляційної конструкції.

Метод дослідження – розрахунково–графічний.

Виконано розрахунок головних елементів електромагнітної частини та зроблено конструкцію вимірювального трансформатора напругою 500 кВ, з класом точності 0,2 і номінальною потужністю навантаження 500 ВА. Проведено аналіз методів розрахунку напруженості електричного поля, а також ефективності її зниження в умовах різко неоднорідного електричного поля. За результатами отриманих даних проведено комплекс досліджень з оцінки впливу факторів електричного навантаження на показники експлуатаційної надійності опорної ізоляційної покришки. Втілення отриманих результатів дозволяє підвищити конкурентоспроможність конструкції на сучасному ринку електротехнічної продукції.

Виконана оцінка показників економічної ефективності, а також розглянуті питання охорони праці в процесі виготовлення і експлуатації трансформатора напруги.

## ЗМІСТ

Реферат .....	3
Вступ.....	6
1 Техніко–економічне обґрунтування необхідності удосконалення трансформатора напруги .....	8
1.1 Особливості функціонування трансформаторів напруги.....	8
1.2 Порівняльний аналіз маслонаповнених і інших видів вимірювальних трансформаторів напруги .....	10
1.3 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів напруги .....	14
1.4 Техніко–економічне обґрунтування необхідності розробки та технічне завдання на проведення досліджень .....	21
2 Вибір основних конструктивних форм трансформатора напруги.....	23
3 Проектування та розрахунок магнітної системи трансформатора напруги.....	30
4 Розрахунок елементів ізоляційної конструкції.....	40
4.1 Розрахунок елементів внутрішньої ізоляції.....	41
4.2 Розрахунок елементів зовнішньої ізоляції .....	45
5 Дослідження впливу параметрів системи екранування на розподіл напруженості поля уздовж ізоляційної конструкції .....	49
6 Дослідження впливу електричного навантаження на показники надійності зовнішньої ізоляції .....	65
6.1 Аналіз імовірнісних характеристик оцінки надійності .....	65
6.2 Оцінка показників надійності для твердої ізоляції.....	71
6.3 Оцінка показників надійності газової ізоляції.....	74
6.4 Оцінка показників надійності в умовах розряду по поверхні ізоляційної конструкції в повітрі .....	77
6.5 Дослідження впливу параметрів електричного навантаження на показники надійності опорно–ізоляційної конструкції трансформатора напруги .....	80
7 Економічна ефективність виробництва вимірювального трансформатора напруги 500 кВ.....	82

7.1	Техніко–економічних показників трансформатора.....	82
7.2	Оцінка ринку збуту та стратегія маркетингу.....	84
7.3	Розрахунок собівартості і ціни трансформатора .....	84
7.4	Розрахунок експлуатаційних витрат .....	91
7.5	Розрахунок економії.....	94
7.6	Розрахунок беззбитковості виробництва .....	95
8	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	98
8.1	Аналіз потенційних небезпек .....	98
8.2	Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці.....	100
8.3	Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях .....	108
	Висновки.....	115
	Перелік джерел посилань .....	116

## ВСТУП

Швидкий розвиток енергетики внаслідок подальшого збільшення вжитку електроенергії викликають відповідне зростання потужностей генеруючих електричних станцій. Для сучасного промислово розвиненого міста економічно виправдана напруга в розподільній мережі складає (110–330) кВ. Постійне зростання потужності електроустановок і номінальної напруги приводять до підвищення ролі трансформаторів напруги які мають функції як вимірювальних, так і захисних пристроїв. Крім того, у сучасних електричних мережах підвищуються вимоги до точності вимірювань, особливо в разі вживання трансформатора напруги для обліку електричної енергії, що відпускається споживачам. Зі становленням сучасних ринкових відносин в провідних галузях економіки України значно зростають вимоги до достовірності, точності та оперативності обліку електричної енергії. Ці вимоги можуть бути задоволені шляхом створення автоматизованих систем контролю і обліку електроенергії, оснащених сучасною обчислювальною технікою.

Основною метою обліку електричної енергії є отримання достовірної інформації про кількість виробленої, переданої, розподіленої і спожитої електричної енергії та потужності на оптовому і роздрібному ринку. При високій напрузі вимірювальні прилади і апарати включаються за допомогою вимірювальних проміжних апаратів, які мають назву трансформатори напруги. Для досягнення цієї мети необхідні високоточні та високонадійні вимірювальні апарати. Тобто існує реальна потреба у випуску трансформаторів напруги на високі напруги та класи точності 0,2 і 0,2S.

В галузі конструювання і розрахунків трансформаторів напруги відбуваються значні зміни, що спричинило постійне підвищення вимог до їх конструкцій. У зв'язку з цим, в області вітчизняного та зарубіжного апаратобудування проводиться великий комплекс досліджень особливостей роботи трансформаторів напруги в різних режимах експлуатації. Одним з напрямків є пошуки нових тех-

нічних рішень з метою поліпшення їх конструкцій. Ці завдання стають важче розрахованими при вирішенні традиційними методами, тому потрібні нові підходи до їх реалізації.

У поточний час в області електроапаратобудування майже всі провідні закордонні виробники високовольтного обладнання приділяють достатню увагу подальшому вдосконаленню маслонаповнених конструкцій трансформаторів напруги. Зокрема, вдосконалення цих апаратів здійснюється застосуванням нових ізоляційних полімерних матеріалів, розробляються нові технології виробництва, системи діагностики і управління.

З урахуванням вище сказаного, в магістерській роботі вирішуються два основних завдання. По–перше, це дослідження впливу параметрів системи екранування на розподіл електричного поля і, як наслідок цього, електричного навантаження на опорну ізоляційну конструкцію трансформатора напруги. По–друге, це оцінка експлуатаційної надійності в різних умовах експлуатації трансформатора напруги. Для цього отримані на наступному етапі досліджень результати використовуються в якості вихідних даних для оцінки експлуатаційної надійності та вироблення рекомендацій для підтримки її на високому рівні в процесі функціонування трансформатора напруги.

# 1 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ

## 1.1 Особливості функціонування трансформаторів напруги

В умовах високої номінальної напруги електричної мережі безпосереднє приєднання вимірювальних приладів неприпустимо, як за умовами ізоляції, так і за умовами безпеки обслуговуючого персоналу. У зв'язку з цим при високій напрузі вимірювальні прилади і апарати включаються за допомогою вимірювальних проміжних апаратів, які мають назву трансформатори напруги [1, 3, 44]. Трансформатором напруги називається вимірювальний трансформатор, в якому при нормальних умовах експлуатації вторинна напруга практично пропорційно первинній напрузі, а фазовий зсув між ними близький до нуля. Трансформатори напруги служать для перетворення високої напруги в низьку напругу стандартної величини, зручне для вимірювання, що дозволяє для вимірювання будь-якої високої напруги застосовувати один і той же вимірювальний прилад.

Трансформатори напруги крім вимірювання напруги також застосовуються для живлення ланцюгів автоматики, сигналізації і релейного захисту ліній електропередач від замикання на землю і здійснюють ізоляцію вимірювальних приладів і захисних реле, до яких мають доступ обслуговуючий персонал від ланцюгів високої напруги. Трансформатори напруги найчастіше підключаються одним кінцем первинної обмотки до фазного проводу, а іншим до землі або ж двома кінцями первинної обмотки – до фазових проводів лінії.

Інформація про кількість виробленої, переданої, розподіленої і спожитої електричної енергії та потужності на оптовому і роздрібному ринку дозволяє здійснювати такі дії:

- сприяти виробленню фінансових розрахунків між учасниками енергоринку, тобто забезпечити точний облік, своєчасність, правильність і повноту платежів за електроенергію шляхом впливу на цей процес в рамках діючого закону;

- керувати режимами енергоспоживання, виявляти і запобігати розкраданням електроенергії в електричних мережах;
- визначати і прогнозувати всі складові балансу електроенергії в мережі (вироблення, реалізація зі збірних шин, втрати та ін.);
- визначати і прогнозувати питому витрату палива на електростанціях і виконувати фінансові оцінки процесів виробництва, передачі і розподілу електроенергії;
- контролювати технічний стан систем обліку в електроустановках і відповідність їх вимогам нормативно–технічних документів, а у разі потреби захистити електричне устаткування споживача в аварійних режимах;
- забезпечити функції оперативного, дистанційного індивідуального диспетчерського управління в системі і забезпечити достатню технологічну надійність і захист від несанкціонованих дій на систему.

Відображую реально існуючу ситуацію в електричній галузі, необхідно відзначити наступні проблеми, зв'язані з використанням вимірювальних трансформаторів в системах обліку:

- посилювання вимог до точності обліку електроенергії;
- впровадження автоматизованої інформаційно – вимірювальної системи комерційного обліку електроенергії на об'єктах, які вже знаходяться в експлуатації;
- невідповідність номінальних параметрів електроустаткування і реальних експлуатаційних параметрів діючим регламентним нормам, у тому числі і змінний характер експлуатаційних параметрів;
- обмежений простір розподільних пристроїв;
- обмежене фінансування.

Одним з найбільш простих і економічно доцільних способів задоволення високим вимогам до точності є заміна існуючих трансформаторів напруги на нові. При цьому існує можливість не тільки підвищення класу точності даного трансформатора (тобто переходу наприклад від 0,2 до класу 0,2S), але і у виборі, трансформатора з підвищеною кількістю вторинних обмоток, зокрема в переході

від трансформатора напруги з двома вторинними обмотками до трансформатора з трьома обмотками [1, 44].

Наявна і вигода від застосування трансформатора з великим числом обмоток, як варіанти вирішення проблеми впровадження АИИС КУЄ на вже існуючих енергетичних об'єктах, оскільки сумарні витрати на трансформатори з трьома (а в деяких випадках і з чотирма) вторинними обмотками є менш за рахунок скорочення кількості трансформаторів при колишньому числі обмоток. Слід також зазначити, що зі зменшенням кількості елементів мережі зростає її надійність, тобто при подібній заміні вимірювальних трансформаторів підвищується надійність роботи електричної мережі. Тому існує реальна необхідність виробництва високоточних вимірювальних трансформаторів на різні класи номінальної напруги.

Трансформатори напруги на класи напруги 220, 330 та 500 кВ складаються з двох, трьох або чотирьох двоступеневих каскадних блоків, з'єднаних послідовно. На місці розташування блоки встановлюються один на інший у вертикальній площині. З урахуванням вище сказаного, трансформатори напруги на 400 кВ мають три модуля, що складаються з шести каскадів, розміщених на трьох двострижневих магнітопроводах.

## 1.2 Порівняльний аналіз маслонаповнених і інших видів вимірювальних трансформаторів напруги

На ринку високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги, головним чином, присутні два типи трансформаторів – один з масляною ізоляцією, а інший з елегазовою, причому кожен з них має свою власну нішу на ринку, яка визначається його конструктивними та іншими особливостями.

Елегазові вимірювальні трансформатори напруги були розроблені більш 40 років тому в якості альтернативи масляним [45]. Кількість вироблених елегазових трансформаторів постійно зростає, однак їх застосування в різних країнах відбувається по-різному. Найбільша кількість трансформаторів з елегазовою ізоляцією



було впроваджено в Європі, де їх кількість складає (15–25)% від загального числа застосовуваних високовольтних вимірювальних трансформаторів і постійно зростає. З іншого боку, в США і Канаді за весь цей час їх кількість не перевищила 10%. Що стосується українського електротехнічного ринку, то застосування елегазових вимірювальних трансформаторів тут почалося не так давно і інтерес до них підвищений.

Сучасні, як масляні високовольтні вимірювальні трансформатори, так і елегазові, можна з упевненістю стверджувати, є цілком надійними і мають термін служби більше (30–40) років. Однак таку надійність можна досягти лише за рахунок високої якості виготовлення трансформаторів, із застосуванням новітніх технологій. Тим більше, це дуже актуально стало зараз, коли коефіцієнт запасу обладнання значно знизився за рахунок зменшення розмірів трансформаторів, економії матеріалів і т.д.

При не якісному виготовленні можуть вибухати в процесі експлуатації як масляні, так і елегазові трансформатори. Погана герметизація високовольтних трансформаторів, механічні пошкодження, наявність сторонніх домішок в ізоляційній середовищі і т.д., незалежно від типу трансформатора, можуть привести до короткого замикання всередині його і як наслідок, до вибуху.

На відміну від застарілих типів масляних високовольтних трансформаторів, виникнення вибуху в елегазових трансформаторах не приводить до повного руйнування їх ізолятора на розлітаються в усі сторони шматки, а викид в атмосферу елегазу, на відміну від масла, не приводить до виникнення пожежі. У цьому сенсі елегазові трансформатори вважаються вибухо- і пожежобезпечними і, саме, в цьому і була їхня основна перевага в порівнянні з масляними трансформаторами. Однак викид елегазу в атмосферу, хоча і не призводить до пожежі, але це створює нову вельми небезпечну проблему. Реагуючи з повітрям, елегаз утворює дуже отруйні гази, наявність яких в атмосфері становить серйозну проблему для здоров'я і екології.

Подальший розвиток масляних вимірювальних трансформаторів дозволило виготовити і їх вибухобезпечні типи. Це сучасні трансформатори з паперово–масляною ізоляцією, виникнення вибуху в яких через їх спеціальної конструкції не призводить до руйнування фарфорового ізолятора. Крім того, дедалі частіше стали застосовуватися в трансформаторобудуванні ізолятори з композиційних матеріалів, особливо для використання на атомних електростанціях, в принципі виключають виникнення розлітаються шматків внаслідок вибуху в середині трансформатора і, тим самим, що виключають небезпеку пошкодження прилеглого обладнання.

Що стосується пожежезахищеності, то сучасні паперово–масляні високовольтні вимірювальні трансформатори є мало масляними. Це робить їх менш пожеже небезпечними через малу міру локалізованої площі горіння.

Досвід застосування масляних високовольтних вимірювальних трансформаторів при низьких температурах навколишнього середовища ( $-50^{\circ}\text{C}$  і нижче), вельми позитивний і досить великий. На відміну від них, звичайні елегазові трансформатори при таких умовах експлуатувати неможливо через те, що чистий елегаз (SF<sub>6</sub>) при таких температурах переходить у рідкий стан, що є недопустимим внаслідок погіршення його ізоляційних властивостей. Проте, проблему що виникає можна вирішити, якщо застосовувати суміш різних газів з більш низькою температурою конденсації, ніж яку має чистий елегаз, наприклад елегаз + азот.

В даний час, на українському ринку пропонуються такі елегазові трансформатори, що дозволяють працювати при дуже низьких температурах, однак досвід їх застосування поки дуже незначний. Крім того, застосування суміші газів, призводить до збільшення розмірів високовольтного трансформатора, а отже і до підвищення його вартості.

Сьогодні у всіх країнах, де присутня арктичний клімат, застосовуються в переважній більшості, а іноді виключно, лише масляні високовольтні трансформатори напруги. Таким чином, що стосується роботи вимірювальних трансформаторів при низьких температурах, в даний час перевага віддається маслonaповненим трансформаторам напруги.

Сучасні масляні трансформатори провідних світових виробників практично не вимагають спеціального обслуговування. Потрібно лише в рамках регламентованих регулярних перевірок проводити такі дії:

- перевірку рівня масла;
- візуальний контроль на наявність масляних плям;
- контроль міцності електричних контактів;
- очищати клемник від можливих забруднень.

Взяття проби масла або її доливку рекомендується здійснювати лише в особливих, екстремальних випадках (наприклад, зниження рівня масла та ін.). Також бажано проводити такі дії за допомогою або в присутності фахівця з підприємства – постачальника або їх представника, що забезпечить гарантію подальшої безвідмовної роботи трансформатора напруги.

Що стосується елегазових трансформаторів, то в даному випадку спеціальне обслуговування необхідно. Воно проводиться згідно з діючими інструкціями по експлуатації, що додаються постачальником трансформаторів, що вимагає додаткових витрат.

У поточний час електротехнічна промисловість виробляє як масляні, так і елегазові вимірювальні трансформатори напруги, які дозволяють забезпечити всі необхідні класи точності: для вимірювань – 0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5 та ін. і для живлення систем релейного захисту – 5P; 10P. У цьому сенсі між масляними і елегазовими трансформаторами різниці практично немає. Однак в ціні трансформатори з ідентичними параметрами все ж відрізняються. Масляні трансформатори коштують дешевше, причому, якщо ця різниця на напругу 110 кВ не надто значна і складає близько (5...10) %, то з підвищенням номінальної напруги різниця в ціні стає більш істотною. Вона виглядає тим більше, якщо потрібно кліматичне виконання УХЛ1.

Як показує проведений вище огляд, попит на трансформатори з масляною ізоляцією на світовому ринку стабільно зростає. Це пов'язано, перш за все, зі значним підвищенням якості масляних трансформаторів напруги. Сучасні високовольтні вимірювальні трансформатори з масляною ізоляцією після модернізації стали вибухобезпечними. Великий позитивний досвід їх застосування при низьких

температурах, а також порівняно низька ціна в багатьох випадках зробила їх незамінними. Так, наприклад, поблизу житлових масивів доцільніше застосовувати маломасляні вимірювальні трансформатори, щоб виключити можливість появи небезпечних отруйних газів у повітряному просторі населених пунктів.

З усього вище сказаного можна зробити висновок, що сучасні маслонаповнені трансформатори напруги є важливим елементом існуючих розподільних пристроїв і їх подальше вдосконалення є завдання вельми актуальне.

### 1.3 Огляд існуючих конструкцій трансформаторів напруги

Основними особливостями конструкцій трансформаторів напруги є їх невелика потужність при високому значенні номінальної напруги первинної обмотки, а також мінімальне падіння напруги в первинній та вторинній обмотках [3]. Це необхідно для отримання меншої похибки коефіцієнта трансформації і кута зсуву між векторами первинної і вторинної напруг.

Трансформатори напруги класифікуються наступним чином [3]:

- за кількістю фаз розрізняють однофазні та трифазні трансформатори;
- за кількістю обмоток розрізняють двох обмоткові та трьохобмоткові;
- за класом точності існують (0,2; 0,5; 1,0);
- за родом встановлення розрізняють для внутрішнього або зовнішнього встановлення та для комплектних розподільних пристроїв.

Масляне заповнення трансформаторів напруги призначене головним чином для ізоляції обмоток від заземлених частин і запобігає потраплянню вологи в обмотки в процесі експлуатації. Внаслідок відносно малих втрат в трансформаторах напруги масляне охолодження має другорядне значення. Трансформатори з масляною ізоляцією випускаються як баковими, так і каскадних конструкцій.

Бакові трансформатори напруги серії ЗНОМ з масляним охолодженням, представник якої показано на рисунку 1.1, виконуються стрижневими з котушками на кожному стрижні або броньового типу, їх активна частина знаходиться в баку з

трансформаторним маслом. Баківі масляні трансформатори випускаються на клас напруги до 35 кВ включно. Трансформатор типу ЗНОМ – 35 (див. рисунок 1.1) має позначення: З – заземлений вивід первинної обмотки, Н – трансформатор напруги, О – однофазний, М – з природним масляним охолодженням, підвищеної точності на Уном – 35 кВ. У цього трансформатора один вивідний кінець (Х) обмотки високої напруги заземлений. Тому ця обмотка з боку заземленого кінця має знижену ізоляцію щодо обмотки низької напруги і корпусу. Обмотка високої напруги на 35 кВ в своєму перетині має ступеневу форму. По мірі збільшення напруги між обмоткою і ярмом ізоляційна відстань між обмоткою і ярмом також збільшується. Останній шар обмотки, який має найбільший потенціал по відношенню до землі, є найбільш віддалений від ярма магнітопроводу.



Рисунок 1.1 – Вид загальний трансформатора напруги серії ЗНОМ – 35

Форма баків трансформаторів напруги типів НОМ – 35 і ЗНОМ – 35 має складну форму, близьку до форми своїх активних частин, з метою зменшення обсягу масла, що використовується.

Вивідні кінці обмоток високої напруги цих трансформаторів проходять крізь прохідні порцелянові ізолятори, які встановлюються на кришці бака. Виводи обмоток низької напруги приєднані до панелі клем, яка закріплена на боковій стінці бака. Ці трансформатори мають у своїй конструкції масло розширювачі.

Каскадні масляні однофазні трансформатори напруги серії НКФ (напруги, каскадний, у порцеляновій покривці) призначені для зовнішнього встановлення і виготовляються на класи номінальних напруг від 66 до 500 кВ. Каскадна конструкція являє собою систему з кількох трансформаторів (модулів) з послідовно з'єднаними первинними обмотками. При цьому, ізоляція первинної обмотки від магнітопроводу повинна відповідати тільки частині загальної первинної напруги, яка зворотнє пропорційна кількості ступенів каскадної схеми. Ступенем каскаду можна назвати частину первинної обмотки, у відповідності до напруги, що ізолює обмотку від магнітопроводу. Однак сам магнітопровід повинен бути також ізольований від заземлених частин трансформатора. У каскадних трансформаторах використовують двострижневі магнітопроводи з котушками на кожному стрижні. Кількість каскадів залежить від класу номінальної напруги.

Масляний каскадний трансформатор напруги типу НКФ–110 кВ, який є складовою частиною трансформатора що проектується типу НКФ–525, показано на рисунку 1.2. Даний трансформатор, розроблений Всеукраїнським інститутом трансформаторобудування (ВІТ, м.Запоріжжя) та випускається Запорізьким заводом високовольтної апаратури (КО ЗЗВА). Його активна частина розташовується всередині порцелянкової покривки, і трансформатор випускається для зовнішнього встановлення. Він складається з двох котушок, виконаних на одному загальному магнітопроводі. Обмотка високої напруги (ВН) розділена на дві однакові послідовно з'єднані секції, що представляють собою перший і другий каскади. Магнітопровід з'єднано гальванічно з серединою обмотки ВН і знаходиться під напругою, що дорівнює половині робочої напруги. Завдяки цьому ізоляція обмотки ВН кожного

каскаду може бути виконана наполовину робочої напруги, що істотно зменшує розміри і масу трансформатора напруги в порівнянні з конструкцією звичайного (не каскадного) виконання.

Маслорозширювач розташовано у верхній частині порцелянової покривки. Він призначений для компенсації температурних змін об'єму трансформаторного масла трансформатора в процесі експлуатації, наприклад, при коливаннях температури. Розширювач трансформатора напруги має показчик рівня масла.

Повітряосушувач – це волого поглинаючий фільтр, що запобігає вільному доступу повітря в трансформатор напруги. Верхня частина скляного циліндра повітряосушувача заповнена силікагелем – індикатором, який при насиченні вологою змінює своє забарвлення. Крізь масловипускний патрубок цоколя проводиться злив і відбір проб масла у процесі експлуатації.



Рисунок 1.2 – Вид загальний трансформатора напруги серії НКФ–126

Технічні дані зарубіжних аналогів трансформатора напруги на 110 кВ представлені в додатку А.

Масляний каскадний трансформатор напруги типу НКФ–242 виробництва КО ЗЗВА показаний на рисунку 1.3. Конструктивно він складається з двох модулів, з'єднаних послідовно у вертикальній площині. Вторинні обмотки розміщені на нижньому стрижні нижнього магнітопроводу, який має найменший потенціал щодо землі. Комплект вторинних обмоток включає в себе три обмотки: для живлення систем захисту і одну – для вимірювань. Первинна обмотка складається з чотирьох каскадів, які розміщуються на двох двострижневих магнітопроводах, розміщених кожен в своєму модулі. З'єднання обмоток двох модулів між собою здійснюється перемичками, які з'єднують шпильки прохідних ізоляторів на розширнику нижнього блоку і на дні верхнього блоку. До цих же шпильок підведені вивідні кінці від електростатичних екранів і від сполучних обмоток.

Таким чином, каскадна схема дає можливість зменшити ізоляційні відстані кожного ступеня каскаду окремо пропорційно числу ступенів каскаду. Внаслідок цього відносний обсяг ізоляції зменшується і трансформатор виходить менших розмірів і маси, а також має більш низьку вартість в порівнянні з трансформатором звичайної конструкції.

Активна частина трансформатора типу НКФ–252–58 встановлюється на плиті – підставці. Підставка зварена з листової сталі. До неї знизу приварена коробка затискачів, патрубок з спускним краном для масла і рама (підставка). У підставці є отвори для кріплення всього трансформатора. Активна частина закривається порцеляноюю циліндричною покришкою з ребрами на зовнішній поверхні. Після збиранні конструкції внутрішній об'єм покришки заповнюється трансформаторним маслом. Зверху покришка закрита звареним з листової сталі маслорозширювачем, на якому встановлено покажчик рівня масла, контактна шпилька і пробка для долівки масла.



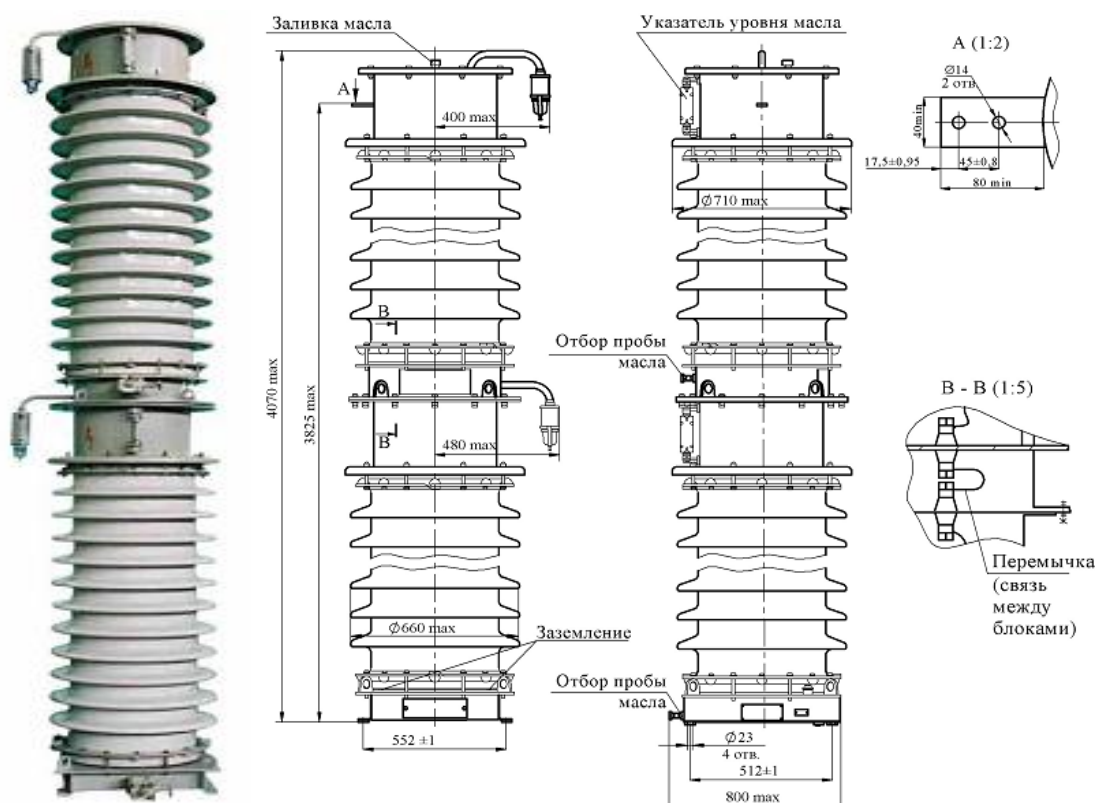


Рисунок 1.3 – Вид загальний трансформатора напруги серії НКФ–252–58

На масло розширювачі кожного блоку трансформатора напруги на 220 кВ встановлено повітряосушувач. Повітряосушувач уявляє собою прозору ємність з силікагелем, яка встановлена на стінці маслорозширювача.

Лінійний затискач А обмотки ВН каскадних трансформаторів напруги розміщується на верхньому розширювачі. Затиск обмотки ВН, який заземлюється Х, а також затискачі обмоток низької напруги а, х, ад і хд обох вторинних обмоток (НН) і два болта для заземлення обмоток розміщуються на гетинаксовій пластині затискачів, розміщеної в коробці затискачів нижньому модулю. Коробка затискачів закривається дверцятами, на яких прикріплено щиток з основними технічними даними трансформатора.

Маслонаповнений каскадний трансформатор напруги типу НКФ–420 виробництва КО ЗЗВА показано на рисунку 1.4. Конструктивно він складається з трьох модулів, з'єднаних послідовно і відрізняється від трансформатора типу НКФ–252 наявністю додаткового модулю з обмотками високої напруги.

На базі конструкції трансформатора НКФ–420 розроблена конструкція трансформатора типу НКФ–525, який відрізняється від аналога лише підсиленою ізоляцією (внутрішньою та зовнішньою).

Елегазові трансформатори напруги мають габаритні розміри менше, ніж маслonaповнені [45]. Вони призначені як для внутрішнього, так і зовнішнього встановлення. Ці трансформатори зазвичай мають концентричну обмотку, виконану на бронестрижневом магнітопроводі, а їх активна частина встановлюється в металевий бак, заповнений елегазом під тиском (0,28...0,4) МПа.

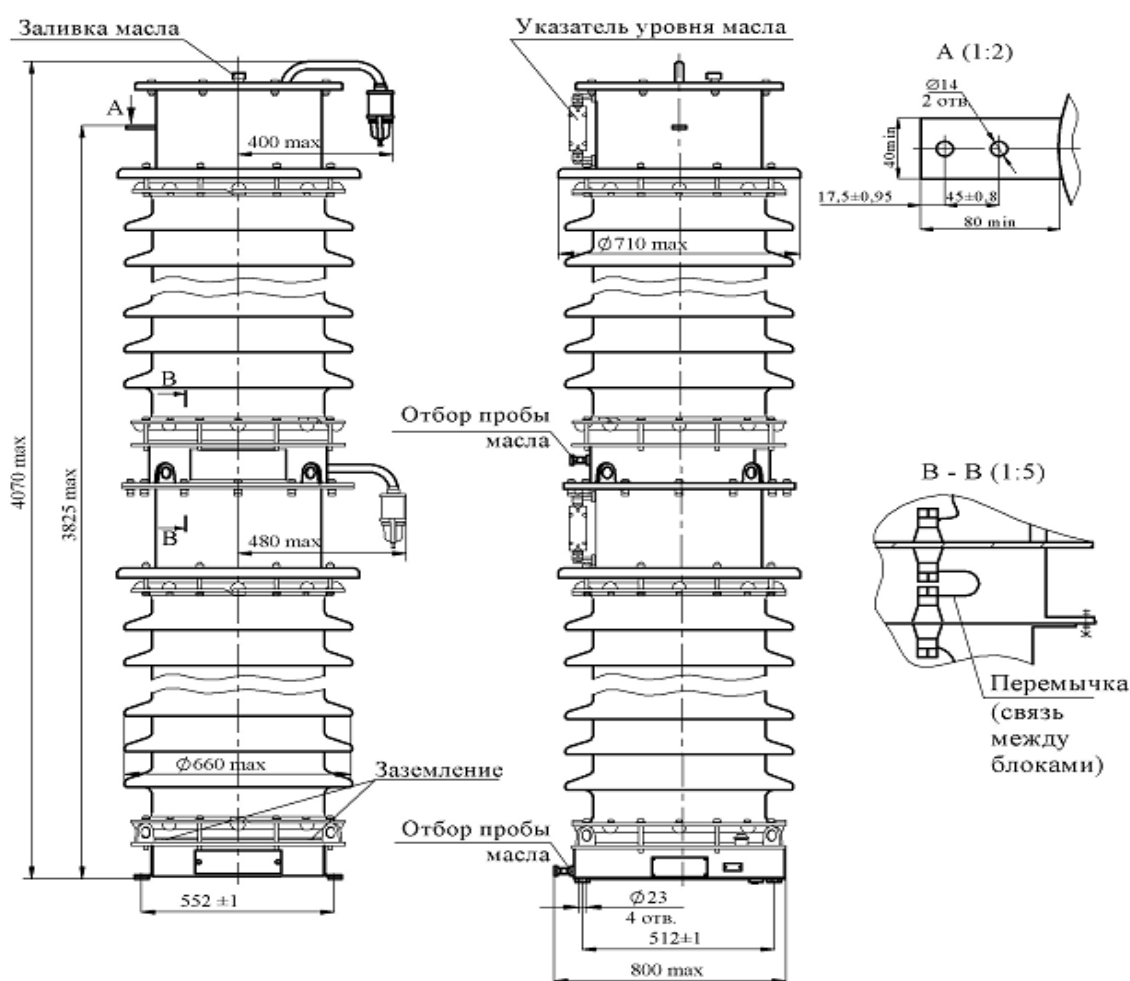


Рисунок 1.4 – Вид загальний трансформатора напруги серії НКФ–420

На підставі вище наведеного огляду існуючих конструкцій для подальшого проведення досліджень в якості аналога вибирається трансформатор напруги серії НКФ–525 виробництва Запорізького заводу високовольтної апаратури (КО ЗЗВА).

#### 1.4 Техніко–економічне обґрунтування необхідності розробки та технічне завдання на проведення досліджень

Для подальшого проектування трансформатора та проведення плануємих досліджень необхідно задатися початковими даними, які були обрані на основі дослідження ринку трансформаторів напруги та визначення необхідних якісних і кількісних показників, які повинна мати конструкція трансформатора напруги, що досліджується. Вихідні дані для проектування та дослідження трансформатора напруги наводяться в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні вихідні дані для проектування та проведення досліджень трансформатора напруги

Найменування параметра	Роз- мірність	Вели- чина
1.Клас номінальної напруги	кВ	500
2.Номінальна напруга обмоток низької напруги: – основна; – додаткова	В В	$100/\sqrt{3}$ 100
3.Номінальна потужність навантаження	ВА	500
4.Кількість фаз	–	1
5.Клас точності	–	0,2
6.Частота напруги мережі	Гц	50
7.Категорія виконання згідно довжині шляху виток по поверхні покритишки	–	Б

Одним з найбільш простих і економічно доцільних способів задоволення високим вимогам що до точності вимірювань є заміна існуючих трансформаторів

напруги на нові з більш високою точністю вимірювань. При цьому існує можливість не тільки поліпшення класу точності даного трансформатора (тобто переходу наприклад від 0,2 до класу 0,2S), але і вибору трансформатора з великою кількістю вторинних обмоток, зокрема в переході від трансформатора напруги з двома вторинними обмотками до трансформатора з трьома обмотками при одночасному зниженні матеріалоемності конструкції. З урахуванням вище сказаного в даній магістерській роботі в якості основних завдань на проектування ставляться такі:

- за допомогою застосування найбільш досконалих матеріалів, зокрема електротехнічної сталі, знизити масогабаритні розміри магнітної системи трансформатора;

- оцінити можливість і ефективність застосування більш досконалих ізоляційних матеріалів в конструкції головної ізоляції, що дозволить знизити її масогабаритні розміри і похибки вимірювань;

- визначення реальних показників надійності проектного трансформатора напруги на підставі аналізу статистичних даних про відмови, отриманих в процесі експлуатації аналогічних конструкцій трансформаторів напруги;

- провести комплекс досліджень з оцінки способів регулювання електричного навантаження і його впливу на показники експлуатаційної надійності опорної ізоляційної покришки трансформатора напруги.

## 2 ВИБІР ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ФОРМ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ

На підставі проведеного вище огляду існуючих конструкцій в якості базової конструкції для проектуваного трансформатора напруги вибирається маслонаповнений каскадний трансформатор серії НКФ–525 виробництва КО ЗЗВА, загальний вигляд якого показаний на рисунку 2.1.

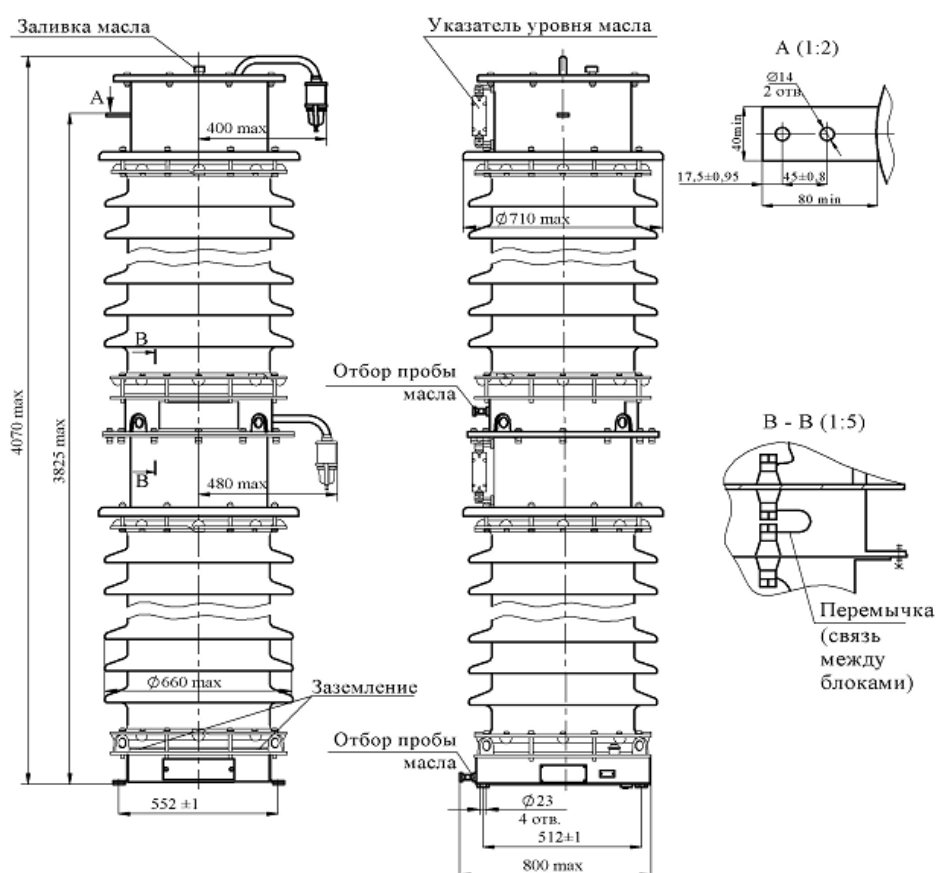


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд каскадного трансформатора напруги на номінальну напругу 500 кВ

Трансформатор на номінальну напругу 500 кВ проектується однофазним, каскадним, з масляною внутрішньою ізоляцією для зовнішньої установки у

розподільному пристрої. Трансформатор складається з трьох модулів (блоків), з'єднаних послідовно у вертикальному напрямку. Система підключення модулів показана на рисунку 2.2. Кожен модуль крім активної частини (магнітопроводу і обмоток), встановленої на підставі, має порцелянову покривку, зверху якої кріпиться кришка, повітря осушувач і маслопоказчик.

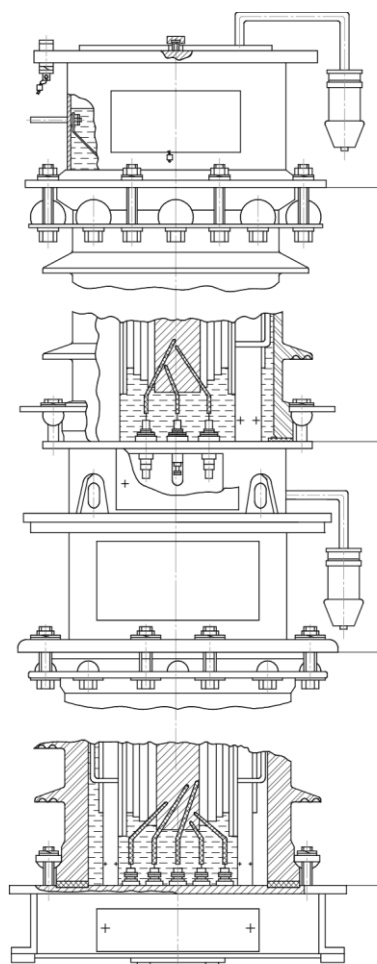


Рисунок 2.2 – Система підключення виводів окремих модулів трансформатора напруги типу НКФ–525

Загальний вигляд і структура нижнього модуля проєктованого трансформатора напруги показані на рисунку 2.3.

Окремі модулі трансформатора заповнюється трансформаторним маслом, яке служить для ізоляції обмоток від заземлених частин і для запобігання обмоток від попадання вологи.

Активна частина нижнього модуля трансформатора напруги показана на рисунку 2.4. Вона складається з комплексу вторинних обмоток, розміщеного на підставці, магнітопроводу і комплексу первинних обмоток, які електрично з'єднані між собою.

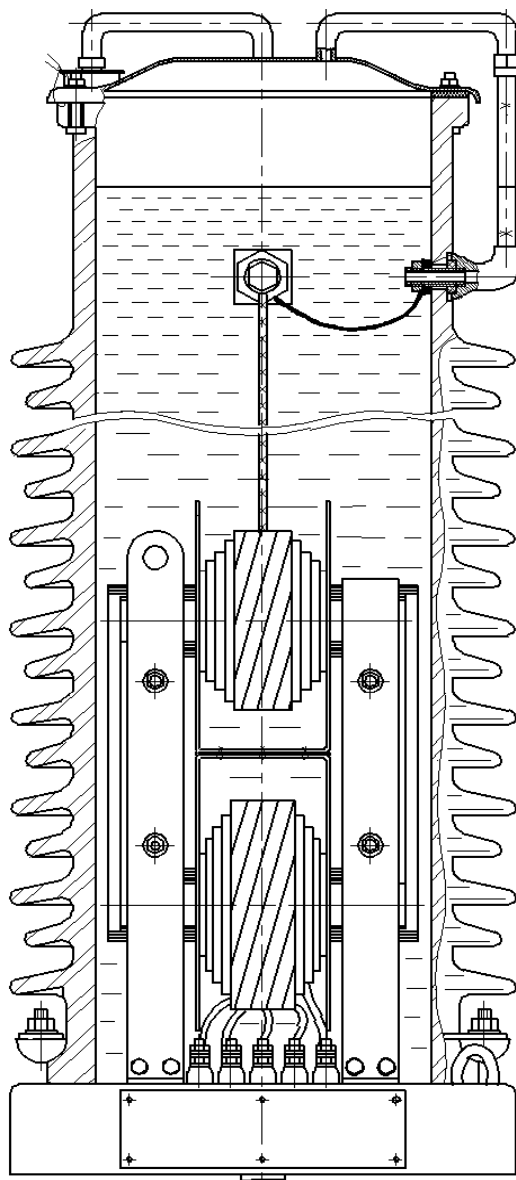


Рисунок 2.3 – Вид загальний і структура нижнього модуля трансформатора напруги на 500 кВ

У трансформаторі що проектується обмотки кожного ступеня розміщуються на двох стрижнях магнітопроводу. Вторинні обмотки розміщуються на нижньому

стрижні нижнього магнітопроводу, який має найменший потенціал щодо землі. Для рівномірного розподілу напруги і потужності в первинних обмотках каскадів одного магнітопроводу застосовуються вирівнювальні обмотки П. Для передачі потужності з одного магнітопроводу на другий (між модулями) застосовуються сполучні обмотки Р.

З'єднання обмоток передачі потужності Р двох модулів між собою здійснюється за допомогою гнучких проводів, які з'єднують шпильки прохідних ізоляторів на розширнику нижче розташованого модулю і на дні вищого модулю. До цих же шпильок підведені вивідні кінці від електростатичних екранів і від обмоток Р.

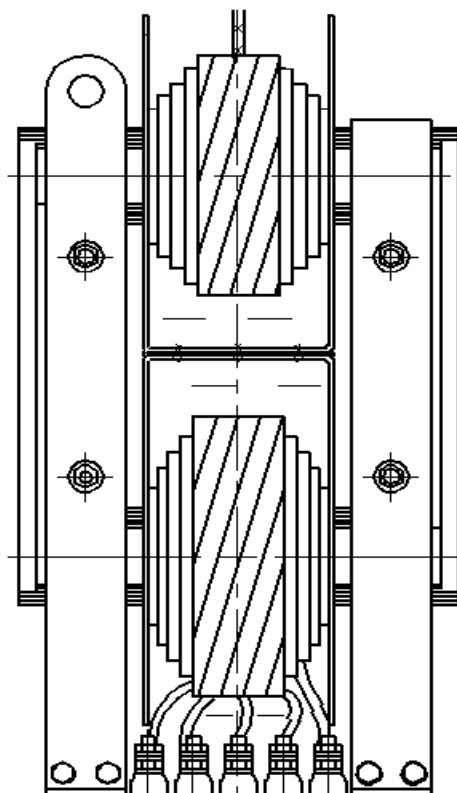


Рисунок 2.4 – Структура активної частини нижнього модуля трансформатора напруги

Кінець початку обмотки Р верхнього модуля підключений до плити підстави модуля (крім підключення до шпильки ізолятора). Це зроблено для того, щоб при



поточному огляді трансформатора в експлуатації можна було перевірити опір ізоляції обмоток, вимірюючи його між шпильками (при знятих перемичках).

Таким чином, каскадна схема дає можливість зменшити ізоляційні відстані в кожному каскаді пропорційно до їх кількості. Внаслідок цього, відносний обсяг ізоляції зменшується і весь трансформатор виходить менших розмірів, маси, має меншу вартість в порівнянні з трансформаторами звичайної конструкції.

Для проєктованого трансформатора застосовуються двострижневі магнітопроводи з обмотками на кожному стрижні. Перетин стрижнів має п'ятиступеневу форму, а перетин ярем – двоступеневу форму. Пластини магнітопроводу мають хімічне ізоляційне покриття.

Обмотки каскадного трансформатора після виготовлення просочуються гліфталевим лаком ГФ–95. Для кращого склеювання обмотки просочення здійснюється тричі, після намотування кожної з обмоток П і ВН.

Стрижні магнітопроводу пресуються дерев'яними клинами, які розклинюють одночасно і обмотку. Ярма стягуються товстими планками з склопластику за допомогою стяжних шпильок, які проходять крізь отвори в ярах магнітопроводу. Шпильки ізолюються паперово–бакелітовими трубками. Планки одночасно є стійками для встановлення активної частини трансформатора.

Активна частина трансформатора встановлюється на плиті підставки. Підставка зварена з листової сталі. До неї знизу приварена коробка контактних затискачів, патрубок зі спускним краном для трансформаторного масла та рама. У ній є отвори для кріплення всього трансформатора. Активна частина закривається порцеляноюю циліндричною покришкою, яка має зовнішні ребра. Після установки покришка всередині заповнюється трансформаторним маслом.

Зверху покришка закрита звареним з листової сталі масло розширювачем, на якому розміщений покажчик рівня масла, контактна шпилька та пробка. Підйом модулю здійснюється за сталеві гаки. Кріплення покришки до плити і масло розширювача здійснюється алюмінієвими кулачками, які пригвинчуються до плити і розширювача болтами. Кулачки за допомогою болтів притискають її нижній торець до плити. Щоб болти при їх затягуванні не відгиналися назовні кулачками, останні

охоплюються обмежуючим кільцем. В якості ущільнення використовується гумове кільце, вкладене між торцем покритишки і плитою.

На розширювачі кожного блоку трансформатора напруги, що проектується встановлюється повітряосушувач. Він являє собою ємність, яка містить спеціальний матеріал – силікагель, який має здатність поглинати вологу з повітря. Повітряосушувач встановлюється на стінці розширювача. При зниженні рівня масла в розширювачі зовнішнє повітря, яке входить в нього через повітряосушувач, осушується силікогелем. Повітря, що входить через нижній отвір підставки, проходить крізь шар масла (масляний затвор), який оберігає силікагель від постійного зволоження. Силікагель повинен систематично замінюватися в міру його насичення вологою: насичення визначається за зміною його кольору з блакитного на рожевий, що можливо побачити через скляний прозорий циліндр.

Лінійний затиск А обмотки ВН каскадного трансформатора напруги розміщується на верхньому маслорозширювачі. Затиск обмотки ВН, що заземлюється, затискачі а, х, ад и хд обох вторинних обмоток НН і два болта для заземлення обмоток розміщуються на гетинаксовій клемній пластині, яка знаходиться в коробці затискачів нижнього блоку трансформатора. Коробка затискачів закривається дверцятами, на яких прикріплено щиток з основними технічними даними трансформатора.

Основні технічні дані для проектування трансформатора напруги, який досліджується наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для проектування трансформатора напруги

Параметр	Умовне позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Номінальна напруга	U <sub>ном</sub>	кВ	500
Клас точності	–	–	0,5
Номінальна потужність	S <sub>2н</sub>	ВА	500
Частота струму в мережі	f	Гц	50

Продовження таблиці 2.1

Виконання головної ізоляції	паперово-масляна
Тип установки	зовнішня
Категорія ізоляції по зовнішній поверхні	Б

У трансформаторі напруги, що проектується передбачаються наступні види обмоток:

- високої напруги;
- основної низької напруги;
- додаткової низької напруги;
- обмотки узгодження;
- вирівнювальна.

Знизу на підставі закріплений клапан для заливки і зливу масла. Вивід первинної обмотки проходить крізь верхню частину порцелянової покритишки і з'єднується дротом з обмоткою високої напруги. Виходи вторинних обмоток і заземлений кінець X приєднуються до коробки виводів, яка встановлена в підставі трансформатора.

Підстава є штамповано-зварної конструкцією, яка має пластини для кріплення для активної частини, прохідні ізолятори, які виведуть кінці обмоток в коробку виводів для під'єднання вимірювальної та сигнальної апаратури.

Для того, щоб контролювати рівень масла в процесі експлуатації, в трансформаторі встановлюється показчик рівня масла.

Для кріплення порцелянової покритишки до цоколю застосовують напівхомути, які впираються напівсферичними виступами (сухарями) на кільцевий конусний виступ в нижній частині порцелянової покритишки. З'єднання порцелянової покритишки зі сталлю плити і кришки виконані через ущільнюючі прокладки з маслоупорної гуми. Для транспортування трансформатора на цоколі передбачається чотири підйомних кільця. При установці трансформатор напруги кріпиться до опорної конструкції болтами, які пропускають через монтажні отвори в рамі підставки.

### 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ

Активна частина трансформатора напруги на 500 кВ, що проектується складається з чотирьох магнітопроводів і комплекту обмоток, закріплених на магнітопроводах, які електрично з'єднані між собою. Як приклад розглянемо електромагнітний розрахунок нижнього модулю. Структура нижнього модулю показана на рисунку 2.3. Методика розрахунку приводиться у [1, 3, 27].

В якості магнітної системи в проектуваному трансформаторі напруги застосовується замкнутий магнітопровід, набраний з пластин електротехнічної сталі. За магнітними властивостями вибирається електротехнічна холоднокатана анізотропна сталь товщиною 0,35 мм марки 3413, яка виготовляється з показниками згідно з ГОСТ 21427.3–83. Конструктивно приймається магнітопровід стрижневого типу, зовнішній вигляд і основні параметри якого показано на рисунку 3.1.

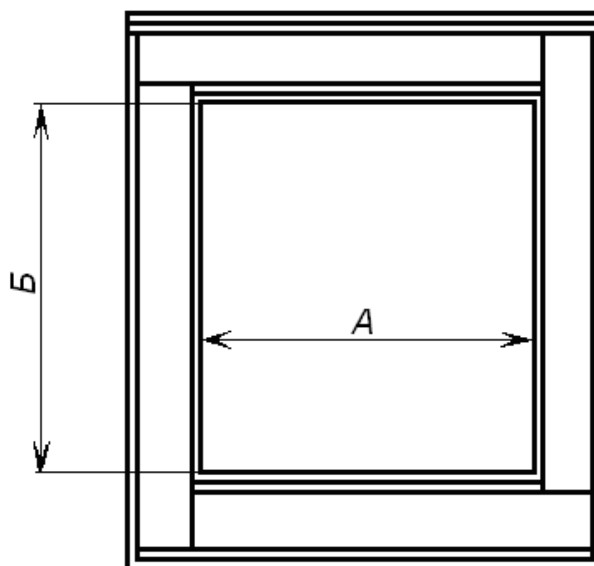


Рисунок 3.1 – Форма магнітопроводу з розмірами вікна

Стрижень магнітопроводу має ступінчасту форму для кращого заповнення площі кола геометричною фігурою, на що вказує відповідний коефіцієнт заповнення кіл. Ярма не мають обмоток і можна зменшити кількість сходинок, виконавши його двоступінчастим. У той же час, для зменшення додаткових втрат збільшується площа поперечного перерізу ярма на (10–15)%.

Для визначення перетину магнітопроводу попередньо визначається номінальна кількість витків первинної обмотки на підставі наступної умови:

$$w_{1\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{E_B}, \quad (3.1)$$

де  $U_{1\text{ном}}$  – номінальна напруга, що припадає на обмотку високої напруги нижнього модуля трансформатора, В

$$U_{1\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном.тр}}}{m},$$

де  $m$  – кількість модулів.

Отже маємо:

$$U_{1\text{ном}} = \frac{500}{4} = 125 \text{ кВ};$$

$E_B$  – електрорушійна сила (ЕРС), яка припадає на один виток обмотки, для даного класу напруги приймається 2 В [1, 27].

$$w_{1\text{ном}} = \frac{125000}{2} = 62500 \text{ вит}$$

Дійсна площа перетину стрижня визначається за формулою:

$$S_{д.с} = \frac{U_{ном}}{4,44 f_{ном} W_{ном} B_m}, \quad (3.2)$$

де  $f_{ном}$  – частота струму мережі, що дорівнює 50 Гц;

$B_m$  – ідукція в магнітопроводі, для сталі марки 3413 вибирається рівною 1,30 Тл [1, 3].

$$S_{д.с} = \frac{125000}{4,44 \cdot 50 \cdot 62500 \cdot 1,35} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Геометрична площа перетину стрижня вибирається з умови:

$$S_{г.с} = \frac{S_{д.с}}{\eta_m}, \quad (3.3)$$

де  $\eta_m$  – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю, рівний 0,91 [1, 27].

$$S_{г.с} = \frac{7,1 \cdot 10^{-3}}{0,91} = 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Еквівалентний діаметр стрижня визначається виходячи з площі поперечного перерізу за умовою:

$$D_c = \sqrt{\frac{4S_{г.с}}{\pi}}, \quad (3.4)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0079}{3,14}} = 0,103 \text{ м}$$

Для подальших розрахунків діаметр описаного кола стрижня приймається рівним 110 мм.

Число ступенів стрижня для трансформаторів малої потужності повинно бути не менше 4, щоб розрахунковий переріз наближався до оптимального значення. Конструктивно приймається число ступенів, рівне п'яти. На рисунку 3.2 приведена форма стрижня з п'ятьма сходинками і з певними значеннями коефіцієнта кожної сходинки кіл і коефіцієнта заповнення площі кола геометричною фігурою.

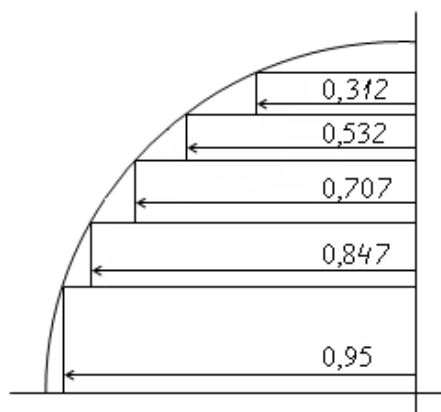
Магнітна система трансформатора виготовляється з рулонної електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм. Ширину пластин бажано вибирати з такого ряду значень: 25; 30; 40; 55; 65; 75; 85; 95; 105; 120; 135; 155 мм і т. Д. [1, 27]. Ширина пластин, з яких шихту стрижень магнітопроводу, знаходиться за формулою:

$$C_n = D_c \cdot K_c, \quad (3.5)$$

де  $C_n$  – ширина  $n$ -ної пластини;

$D_c$  – діаметр стрижня магнітопроводу, м;

$K_c$  – коефіцієнт кожного ступеня пластини відповідно до рисунку 3.2.



$$K_3 = 0,908$$

Рисунок 3.2 – П'ятиступенева форма стрижня з основними геометричними співвідношеннями

Тоді ширина найбільшої ступені буде складати:

$$C1 = 110 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 104,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Аналогічно визначаються значення ширини інших ступенів, з урахуванням відповідних коефіцієнтів вони складають:

$$C2 = 93,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C3 = 77,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C4 = 58,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C5 = 34,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Коригуються результати розрахунків відповідно з попередньо рекомендованими значеннями і вибираються остаточні розміри ступенів:

$$C1 = 95 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C2 = 85 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C3 = 75 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C4 = 55 \cdot 10^{-3} \text{ м}; C5 = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

З урахуванням вище наведених розрахунків перетин стрижня магнітопроводу показано на рисунку 3.3.

Розміри вікна магнітопроводу вибираються згідно з розрахунком обмоток трансформатора і ізоляційних проміжків, уточнені значення яких наводяться далі. Ширина магнітопроводу  $A$  з урахуванням товщини екрану конструктивно приймається рівною 195 мм



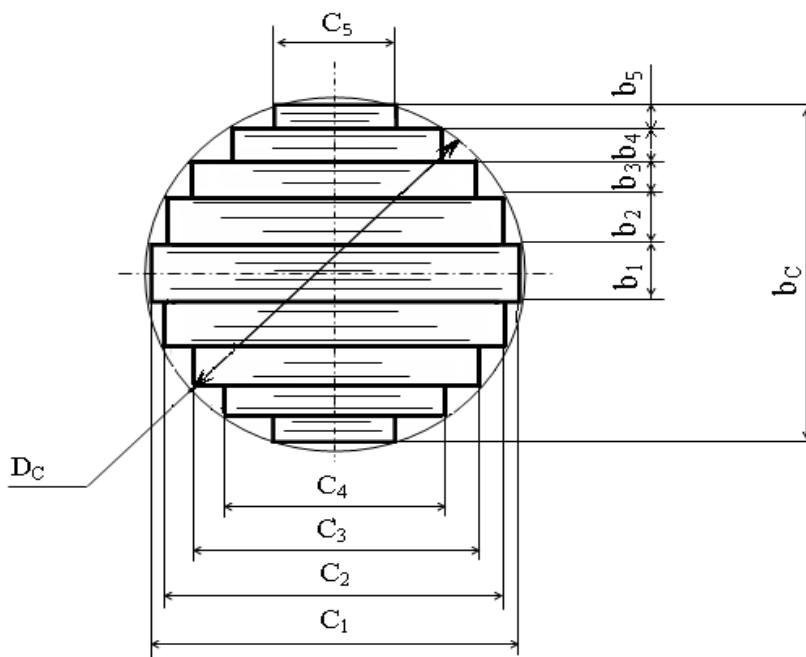


Рисунок 3.3 – Головні параметри перетину стрижня магнітопроводу

Висота вікна магнітопроводу визначається з урахуванням розмірів котушок трансформатора і ізоляції на підставі наступної формули:

$$B = \frac{d_{\text{вн}} - C_1}{2} + X_{\text{из}} + \frac{d_{\text{вн}} - C_1}{2}, \quad (3.6)$$

де  $X_{\text{из}}$  – ізоляційний проміжок, розраховується в подальшому і попередньо згідно даних аналогу вибирається рівним 27,5 мм;

$d_{\text{вн}}$ ,  $d_{\text{вн}}$  – відповідно зовнішні діаметри котушок високої та низької напруги, вибираються на підставі наступних розрахунків ізоляційної конструкції трансформатора.

$$B = \frac{285 - 95}{2} + 27,5 + \frac{245 - 95}{2} = 197,5 \text{ мм}$$

З урахуванням екрану між котушками з запасом приймається висота вікна магнітопроводу, що дорівнює 225 мм. Форма і розміри магнітопроводу, що проектується показані на рисунку 3.1.

Ярма магнітопроводу двоступеневі. Коефіцієнти ступенів складають:

$$K1 = 0,85; \quad K2 = 0,526.$$

Коефіцієнт заповнення ярма  $K\alpha$  вибирається рівним 0,786. Згідно з умовою (3.5) знаходиться ширина пластин ярма. Так як діаметр ярма становить 0,11м, отримуємо:

$$C\alpha1 = 0,0935 \text{ м}, \quad C\alpha2 = 0,0579 \text{ м}.$$

З огляду на рекомендовані стандартні розміри пластин, зазначені вище, для подальших розрахунків ширина пластин вибирається такою:

$$C\alpha1 = 0,095 \text{ м}, \quad C\alpha2 = 0,075 \text{ м}.$$

Крім того, можна визначити товщину пакета пластин стрижня, скориставшись геометричним співвідношенням прямокутника відповідно до рисунку 3.3. Для визначення товщини пакетів застосовується формула (3.7) і її різновиди:

$$b_1 = \sqrt{D_c^2 - C_1^2}, \quad (3.7)$$

$$b_2 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_2^2} - b_2}{2}, \quad (3.8)$$

$$b_3 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_3^2} - (b_1 + 2b_2)}{2}, \quad (3.9)$$

$$b_4 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_4^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3)}{2}, \quad (3.10)$$

$$b_5 = \frac{\sqrt{D_c^2 - C_5^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3 + 2b_4)}{2}, \quad (3.11)$$

де  $b_{1,2,3,4,5}$  – товщина відповідного пакета стрижня.

Тобто, для даного розрахунку отримуємо:

$$b_1 = \sqrt{0,11^2 - 0,095^2} = 55,45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Конструктивно приймається величина  $b_1$ , що дорівнює  $55 \cdot 10^{-3}$  м. Аналогічно обчислюються і приймаються інші значення параметрів:

$$b_2 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b_3 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b_4 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; b_5 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Товщина пакетів ярма розраховується за такими формулами:

$$b_{Я1} = b_1 + 2b_2, \quad (3.12)$$

$$b_{Я2} = b_3 + b_4 + b_5, \quad (3.13)$$

$$b_{Я1} = 0,055 + 2 \cdot 0,007 = 0,069 \text{ м},$$

$$b_{Я2} = 0,006 + 0,007 + 0,005 = 0,018 \text{ м}$$

Сумарна товщина пакетів стрижня, яка буде дорівнювати сумарній товщині пакетів ярма, визначається з умови:

$$b_{я} = b_{с} = b_1 + \sum_2^n 2b_n, \quad (3.14)$$

де  $b_{с}$  – сумарна товщина пакетів стрижня, м;

$b_{я}$  – сумарна товщина пакетів ярма, м;

$n$  – число пакетів пластин.

$$b_{с} = b_{я} = 55 + 2(7 + 6 + 7 + 5) = 105 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Визначивши ширину пластини і товщину пакетів, знаходиться площа поперечного перерізу стрижня магнітопроводу на підставі умови:

$$S'_c = S_1 + \sum_2^n 2S_n = C_1 b_1 + \sum_2^n 2C_n b_n, \quad (3.15)$$

де  $S'_c$  – повна площа поперечного перерізу стрижня, м<sup>2</sup>;

$S_1, S_n$  – повна площа поперечного перерізу кожного пакету пластин, м<sup>2</sup>.

$$S'_c = 0,095 \cdot 0,055 + 2(0,085 \cdot 0,007 + 0,075 \cdot 0,006 + 0,055 \cdot 0,007 + 0,03 \cdot 0,005) = 8,385 \cdot 10^{-3}$$

м<sup>2</sup>

Активна площа поперечного перерізу стрижня визначається з урахуванням коефіцієнта заповнення сталлю на підставі умови:

$$S_c = S'_c \cdot K_3, \quad (3.16)$$

де  $S_c$  – активна площа поперечного перерізу стрижня магнітопроводу;

$K_3$  – коефіцієнт заповнення сталлю. Згідно [1, 4, 44] для рулонної сталі товщиною 0,35 мм коефіцієнт заповнення знаходиться в межах (0,94–0,98). Для подальших розрахунків приймається рівним 0,95:

$$S'_c = 8,385 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 7,966 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Товщина ярма буде складатися з сумарної товщини пакетів стрижня, тобто буде мати розмір, що дорівнює  $105 \cdot 10^{-3}$  м.

За формулою (3.15) визначається повна площа поперечного перерізу ярма:

$$S'_я = 95 \cdot 10^{-3} \cdot 69 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 7,255 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Аналогічно за формулою (3.16) визначається активна площа поперечного перерізу ярма:

$$S_{\text{я}} = 7,255 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95 = 8,792 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Довжина кута стику стрижня і ярма розраховується з умови

$$L_y = (b_{\text{Я1}} + b_{\text{Я2}}) / 2 \quad (3.17)$$

Для подальших розрахунків вибирається  $L_y$ , що дорівнює 0,085 м

Масу стрижнів, ярем, кутів стику магнітопроводу можна визначити за такою формулою:

$$G = Y \cdot S \cdot l, \quad (3.18)$$

де  $G$  – маса стрижня ( $G_c$ ), ярма ( $G_{\text{я}}$ ), або кута стику ( $G_k$ ), кг;

$Y$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>, для даної сталі –  $7,65 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – активна площа поперечного перерізу стрижня ( $S_c$ ), ярма ( $S_{\text{я}}$ ), кута стику, яка відповідає для даної форми магнітопроводу площами активного перетину стрижня і ярма ( $S_{y1} = S_c$ ) та ( $S_{y2} = S_{\text{я}}$ ) (див. рисунок 3.1);

$l$  – середня довжина стрижня ( $l_c$ ), ярма ( $l_{\text{я}}$ ) або кута стику ( $l_y$ ).

$$G_c = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 7,966 \cdot 10^{-3} \cdot 0,195 = 11,88 \text{ кг},$$

$$G_{\text{я}} = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 8,792 \cdot 10^{-3} \cdot 0,285 = 15,13 \text{ кг},$$

$$G_y = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 7,986 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0835 = 5,18 \text{ кг}$$

Повна маса магнітопроводу визначається за формулою:

$$G = 2G_c + 2G_{\text{я}} + 4G_y, \quad (3.19)$$

$$G = 2 \cdot 11,88 + 2 \cdot 15,13 + 4 \cdot 5,18 = 74,74 \text{ кг}$$

#### 4 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ІЗОЛЯЦІЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Ізоляційна конструкція є найважливішою складовою частиною трансформатора напруги, що досліджується. Такі визначальні параметри, як масо–габаритні розміри, працездатність, термін служби, вартість багато в чому залежать від здібностей протистояти негативним факторам і від конструкції ізоляції [2, 3, 42]. В даному трансформаторі напруги повинен забезпечуватися відповідний рівень ізоляції між частинами, що перебувають під напругою і заземленими частинами, а також між струмоведучими частинами сусідніх полюсів, що знаходяться під напругою. У трансформаторі напруги, що досліджується (див. рисунок 2.2) можна виділити дві групи характерних ізоляційних проміжків: внутрішня ізоляція і зовнішня. Характерними представниками зовнішньої ізоляції є:

- повітряні проміжки між фазами виводів суміжних фаз, а також між фазою і заземленим корпусом;
- проміжки в повітрі по поверхні твердого діелектрика повітряному середовищі;
- проміжки крізь товщу твердого діелектрика.
- Характерними представниками внутрішньої ізоляції є:
  - проміжки крізь товщу трансформаторного масла;
  - проміжки крізь товщу паперово–масляної ізоляції;
  - проміжки по поверхні твердих діелектриків в середовищі трансформаторного масла.

Необхідний рівень ізоляції забезпечується вибором довжини відповідного проміжку. Ізоляційні відстані вибираються такими, щоб апарат витримував випробувальні напруги промислової частоти і грозовим імпульсом і при цьому залишався запас електричної міцності [2, 3, 42]. Електрична міцність ізоляції визначається пробивною напругою в повітрі, в твердій або рідкій ізоляційному середовищі і по поверхні твердого діелектрика. Електрична ізоляція проектується на заданий клас

напруги з урахуванням конкретних умов експлуатації (форма електродів, кліматичні умови, висота установки над рівнем моря та ін.).

У трансформаторів напруги є кілька найбільш важливих з точки зору електричної міцності ізоляційних проміжків як для внутрішньої, так і для зовнішньої ізоляції. Для внутрішньої ізоляції це визначення ізоляційних проміжків між обмоткою високої напруги (ВН) і ярмами магнітопроводу; визначення необхідної товщини міжшарової та міжкатушкової ізоляції. Для зовнішньої ізоляції: ізоляційний проміжок між основою і струмопровідним виводом високої напруги, тобто активна висота; довжина шляху витoku по поверхні ізолятора і його вибір.

#### 4.1 Розрахунок елементів внутрішньої ізоляції

Оскільки умови експлуатації елементів внутрішньої ізоляційної конструкції в верхніх і нижньому модулях трансформатора напруги, що досліджується приблизно однакові, то нижче розглянемо розрахунок ізоляційних проміжків для конструктивно більш насиченого нижнього модуля. В якості внутрішньої ізоляції в проектуваному трансформаторі застосовуються такі матеріали:

- кабельний папір типу К – 120;
- трансформаторне масло;
- електрокартон марки ЕВ;
- паперово–бакелітовий циліндр та інші матеріали.

У трансформаторі напруги спочатку на паперово–бакелітовий циліндр проводиться намотування обмоток С і Т, а поверх цих обмоток намотується обмотка вищої напруги. На основі попередніх розрахунків, а також даних аналогу встановлено, що діаметр стрижня магнітопроводу складає 110 мм, тому внутрішній діаметр паперово–бакелітового циліндра приймається 115 мм, товщина стінки 4 мм, отже, зовнішній діаметр циліндра буде 123 мм. Довжина повинна бути меншою за розмір вікна магнітопроводу щодо стрижня (див. рисунок 3.1), тому конструктивно приймається довжина циліндра  $l_{ц}$ , рівна 185 мм. Тобто ізоляційний циліндр має основні

геометричні розміри  $\varnothing$  (115/123×185) мм. Подальший розрахунок здійснюється на основі методик [1, 2, 3, 42].

Визначається напруга обмотки з урахуванням того, що трансформатор має однофазне виконання:

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot m \cdot n}, \quad (4.1)$$

де  $U_{\text{ф}}$  – фазна напруга обмотки трансформатора, кВ;

$U_{\text{л}}$  – номінальна напруга трансформатора, кВ;

$\sqrt{3}$  – коефіцієнт переведення лінійної напруги в фазну напругу;

$m$  – число обмоток в нижньому каскаді трансформатора, в проектуваному трансформаторі становить 2;

$n$  – кількість каскадів трансформатора, для проектуваного трансформатора дорівнює 3.

$$U_{\text{ф}} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 3} = 37 \text{ кВ}$$

Товщина паперово–масляної ізоляції вибирається за діючими значеннями випробувальної напруги частотою 50 Гц, тобто однохвилинне випробувального напрузі внутрішньої ізоляції, згідно ГОСТ 1516.1–76. З запасом можна прийняти найближче більше значення номінальної напруги над напругою обмотки (наприклад, в даному розрахунку найближче більше значення 35 кВ) і визначити відповідне йому однохвилинну випробувальну напругу внутрішньої ізоляції (тобто 95 кВ).



У той же час, щоб отримати більш точне значення і, відповідно, обачливо вибрати ізоляцію, користуються методом інтерполяції, алгебраїчне відображення якого в даному випадку має такий вигляд:

$$\frac{U_{об} - U_{ном\min}}{U_{ном\max} - U_{ном\min}} = \frac{U_{рас} - U_{пр\min}}{U_{пр\max} - U_{пр\min}}, \quad (4.2)$$

де  $U_{ном\min}$ ,  $U_{ном\max}$  – найближчі значення номінального напруги менше і більше, ніж значення напруги обмотки, які знаходяться у відповідності з ГОСТ 1516.1–76, тобто 27 і 35 кВ;

$U_{рас}$  – розрахункове діюче значення випробувального однохвилинного напруги промислової частоти, кВ;

$U_{пр\min}$ ,  $U_{пр\max}$  – найближчі значення однохвилинного випробувальної напруги внутрішньої ізоляції відповідні значенням  $U_{ном\max}$  і  $U_{ном\min}$  згідно ГОСТ 1516.1–76, тобто 80 і 95 кВ.

Тоді згідно (4.2) виходить:

$$\frac{37 - 27}{35 - 27} = \frac{U_{роз} - 80}{95 - 80},$$

$$U_{роз} = 80 + \frac{(37 - 27) \cdot (95 - 80)}{35 - 27} = 101 \text{ кВ}$$

Згідно [2] при розрахованому розрядному напрузі для кабельного паперу в трансформаторному маслі відстані між електродами (обмоткою ВН і ярмом) буде більше ніж 3 см, якому відповідала би розрядна напруга 96 кВ.

Скориставшись методом інтерполяції, для ізоляційного проміжку  $X_{із}$  виходить:

$$X_{із} = 3,09 \text{ см}$$

З конструктивних міркувань та з урахуванням попередніх розрахунків для подальших розрахунків приймається значення цього ізоляційного проміжку 31,7 мм, а бортик з кабельного паперу буде виконуватися довжиною 20 мм.

Розрахунок конструктивних ізоляційних проміжків в трансформаторному маслі полягає у визначенні довжини проміжку по заданому розрахунковому напрузі.

При розрахунковій напрузі частоти 50 Гц довжина ізоляційного проміжку при формі електродів голка – площина при значенні розрахункової напруги від 50 кВ до 750 кВ визначається з умови [2, 3]:

$$l = 0,0127 \cdot U_{роз}^{1,428},$$

де  $U_{роз}$  – розрахункова напруга частотою 50 Гц, на підставі даних вище наведених розрахунків для подальших розрахунків вибирається рівною 102 кВ.

$$l = 0,0127 \cdot 102^{1,428} = 14,5 \text{ см}$$

При повних грозових імпульсах позитивної полярності довжина ізоляційного проміжку з формою електродів голка – площина при розрахунковому грозовому імпульсі напругою від 58 до 1250 кВ визначається з умови [3]:

$$l_{и} = 0,001733 \cdot U_{роз.зр}^{1,562},$$

де  $U_{роз.зр}$  – розрахункова грозова напруга при повних грозових імпульсах, на підставі даних [3] вибирається рівною 225 кВ.

$$l_{и} = 0,001733 \cdot 225^{1,562} = 12,1 \text{ см}$$

Для подальших розрахунків вибирається більше з вище отриманих значень (промислової частоти та грозового імпульсу) ізоляційного проміжку в трансформаторному маслі, яке дорівнює 15 см.

#### 4.2 Розрахунок елементів зовнішньої ізоляції

Основою зовнішньої ізоляції є опорно–ізоляційна покривка, яка включає в себе чотири модулі, з'єднаних послідовно у вертикальній площині. Для розрахунку зовнішньої ізоляції приймається припущення, що номінальна напруга ділиться порівну між верхніми і нижнім модулями трансформатора напруги за рахунок застосування вирівнювальних обмоток, розміщених в кожному модулі. З метою уніфікації всі модулі в трансформаторі напруги розміщуються в однакових покривках. У цьому випадку розрахунок проводиться для однієї покривки нижнього модулю.

Повна довжина порцелянової покривки, верхня частина якої грає роль маслорасширювача, визначається згідно наступній умові [2, 3]:

$$L = l_{a.v} + l_m + l_1, \quad (4.3)$$

де  $l_{a.v}$  – активна висота частини ізолятора, см;

$l_m$  – маслорасширювач, приймається висотою 30 см;

$l_1$  – довжина ізолятора, яка визначається конструктивними вимогами; так як відбувається кріплення покривки зверху і знизу відповідно до кришки і до цоколю, приймається рівною 20 см.

При напрузі промислової частоти і номінальній напрузі до 220 кВ за умови відсутності екрану активна висота ізолятора визначається з наступної умови [3]:

$$l_{a.v} \geq 338,2 - \sqrt{111663 - 143 \cdot K_3 U_{сyx}}, \quad (4.4)$$

де  $U_{в.сух}$  – сухорозрядна напруга, згідно з ГОСТ 1516.1–76 та [3] становить 295 кВ;

$K_з$  – коефіцієнт запасу, приймається рівним 1,15.

Тоді на підставі (4.4) виходить:

$$l_{a.в.} \geq 338,2 - \sqrt{111663 - 143 \cdot 1,15 \cdot 295} = 86,9 \text{ см}$$

При імпульсній випробувальній напрузі активна висота ізолятора визначається з наступної умови [3]. Для сухої поверхні ізолятора:

$$l_{a.в.} \geq 0,167 \cdot K_з \cdot U_{\text{імп}}, \quad (4.5)$$

де  $U_{\text{імп}}$  – імпульсна напруга, згідно з ГОСТ 1516.1–76 приймається рівною 480 кВ.

$$l_{a.в.} \geq 0,167 \cdot 1,15 \cdot 480 = 93 \text{ см}$$

Для поверхні ізолятора під дощем виходить:

$$l_{a.в.} \geq 0,44 \cdot K_з \cdot U_{\text{імп}}, \quad (4.6)$$

де  $U_{\text{мокр}}$  – мокророзрядна напруга, згідно з ГОСТ 1516.1–76 вибирається рівним 215 кВ.

$$l_{a.в.} \geq 0,44 \cdot 1,15 \cdot 215 = 109,78 \text{ см}$$

Для подальших розрахунків приймається найбільше з двох розрахованих вище значень; з урахуванням конструктивних міркувань значення активної висоти приймається рівним 110 см.

Тоді на підставі (4.3) виходить:

$$L = 110 + 30 + 20 = 160 \text{ см}$$

Зовнішня поверхня ізолятора має ребристу поверхню. Згідно з даними [1, 3] для зовнішньої установки трансформаторів вибирається ребриста поверхня ізолятора з ребрами різновеликої величини, форма і параметри ребер показані на рисунку 4.1. Основними параметрами для розрахунку ізоляційної покришки при розряді по поверхні є наступні: виліт найбільшого ребра 75 мм, висота між парами ребер 112 мм, питома довжина витoku по одній парі ребер – 315 мм.

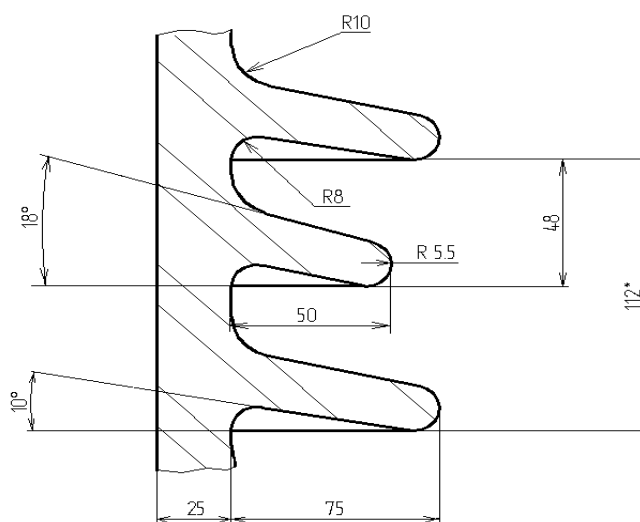


Рисунок 4.1 – Ескіз оребріння на покришці трансформатора

Визначається загальна довжина шляху витoku по поверхні ізолятора, який експлуатується в умовах відкритого розподільного пристрою, за такою формулою [3]:

$$L = l_{уд} \cdot U_{раб}, \quad (4.7)$$

де  $L$  – довжина шляху витoku по поверхні, см;

буд – питома довжина шляху витоку по зовнішній ізоляції, для категорії ізоляції А з урахуванням особливостей експлуатації вибирається рівною 2,25 см/кВ;

Раб – найбільша робоча напруга; з урахуванням можливого нерівномірного розподілу напруги між модулями вибирається рівним 156 кВ.

$$L = 2,25 \cdot 156 = 351 \text{ см}$$

Розраховується кількість пар ребер на поверхні ізолятора на підставі наступної умови [3]:

$$n = \frac{L - l_{ав}}{l_{уд,р} - h}, \quad (4.8)$$

де  $n$  – кількість пар ребер;

$l_{уд,р}$  – питома довжина шляху витоку по ребру, згідно попередніх розрахунків вибирається рівною 31,5 см;

$h$  – висота між парою ребер, складається 11,2 см (див. рисунок 4.1).

На підставі (4.8) визначається:

$$n = \frac{351 - 110}{31,5 - 11,2} = 12$$

З урахуванням конструктивних міркувань для подальших розрахунків для опорної ізоляційної покришки приймається дванадцять пар ребер.

Для модуля вимірювального трансформатора напруги, що досліджується вибирається порцелянова покришка для встановлення у відкритому розподільному пристрої з посиленою ізоляцією П–1 330/420 1У4, ГОСТ 3284–74 [3]. Для подальших розрахунків основними параметрами опорної ізоляційної конструкції є наступні: довжина шляху витоку становить 10540 мм, висота 4830 мм, внутрішній діаметр 420 мм, маса всієї ізоляційної конструкції 646 кг.

## **5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЕКРАНУВАННЯ НА РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНОСТІ ПОЛЯ УЗДОВЖ ІЗОЛЯЦІЙНОЇ КОНСТРУКЦІЇ**

Особливістю апаратів понадвисокої напруги є те, що їх ізоляційні конструкції працюють в умовах різко неоднорідного електричного поля. Електричну міцність таких ізоляційних конструкцій можна підвищити шляхом примусового вирівнювання поля уздовж ізоляційної конструкції. Одним із способів вирівнювання розподілу напруженості поля уздовж ізоляційної конструкції є підвищення напруженості в області, що примикає до заземленого електроду при одночасному відповідному зниженні її в області електроду з високим потенціалом. Це забезпечується шляхом встановлення поодиноких екранів або їх системи в зоні, наближеній до високовольтного електроду електричного апарату [2, 3, 42]. Таким чином, завданням досліджень на цьому етапі є вибір оптимальної системи екранування і оцінка розподілу напруженості поля уздовж опорно-ізоляційної конструкції трансформатора напруги, що досліджується. Отримані дані надалі будуть використані як початкові для оцінки показників експлуатаційної надійності.

Окрім вирівнювання розподілу напруженості уздовж опорної ізоляційної конструкції, захисні екрани служать для підвищення напруги, при якій з'являється коронний або стріммерний розряд на частинах апарату, що знаходяться під напругою. Це необхідно для зменшення радіоперешкод, а також для вирівнювання напруги по висоті ізоляційної конструкції. У апаратах високої напруги на клас 330 кВ і вище екрани виготовляються як із сталевих, так і алюмінієвих труб.

За способом встановлення на ізоляційній конструкції екрани підрозділяються на два види. До першого виду відносяться зовнішні екрани, які встановлюються поза зовнішніми конструктивними розмірами опорної ізоляційної конструкції, наприклад покриття трансформатора напруги або обмежувача перенапруг. До другого виду відносяться внутрішні екрани, які встановлюються усередині

ізоляційної конструкції, наприклад газонаповненого трансформатора струму, і можуть служити елементами конструкції апарату.

За конструктивним виконанням екрани можуть бути поодинокими, подвійними або просторовими, а також сферичними. При необхідності на ізоляційній конструкції можуть встановлюватися два екрани – поодинокий і подвійний. Поодинокий екран вирівнює розподіл напруги по висоті опорної ізоляції, а подвійний екранує механізм або окремі частини апарату, а також забезпечує більш однорідне електричне поле, наприклад між розімкненими контактами роз'єднувача [3, 4, 42].

При нормальній роботі електричного апарату, наприклад обмежувача перенапружень або трансформатора напруги, на його частинах, у тому числі і на екрані, не повинна з'являтися корона, яка є джерелом радіо і телевізійних перешкод, а також руйнівним джерелом зовнішньої ізоляції апарату [2, 11, 42]. Напруга, при якій виникає корона, називається критичною напругою корони  $U_k$ , а напруженість електричного поля, що відповідає йому, на поверхнях коронуючих частин – критичною напруженістю корони  $E_k$ .

Враховуючи можливі несприятливі зміни метеорологічних умов (атмосферний тиск, вологість і ін.), що викликають зниження критичної напруженості приблизно на 10%, умову відсутності корони можна виразити в наступному виді [3,42]:

$$U_k \geq 1,1 * U_{нр} / \sqrt{3}, \quad (5.1)$$

де  $U_{нр}$  – номінальна робоча напруга, рівна  $1,1U_{нр}$ .

Критична напруга корони на екрані залежить від геометричної форми і геометричних розмірів екрану, висоти установки, а також відстані до екранів сусідніх полюсів, конфігурації і розмірів шинування.

Як було відмічено раніше, об'єктом досліджень є маслонаповнений трансформатор напруги типу НКФ – 520. Його зовнішня ізоляція, роль якої виконує фарфорова покривка, має осьову симетрію, тому доцільно застосовувати екрани кільцевої форми. Приклади екранів кільцевої форми показані на рисунку 5.1. Особ-



ливістю конструкції досліджуваного трансформатора напруги є те, що він складається з трьох послідовно сполучених у вертикальній площині модулів, що мають ідентичні покоришки (див. рисунок 2.1).

Для проведення планованих досліджень впливу електричного навантаження на експлуатаційну надійність ізоляційної покоришки необхідно знати розподіл напруги і напруженості уздовж цієї покоришки. У аналога застосовується поодинокий кільцевий екран, показаний на рисунку 5.1.а. Для оцінки розподілу напруженості поля будується розрахункова модель опорної ізоляційної конструкції, яка приведена на рисунку 5.2. При цьому вводимо допущення, що проміжні фланцеві з'єднання окремих модулів не створюють електричну міцність ізоляційної конструкції і їх вплив на розподілення напруги і напруженості поля уздовж ізоляційної покоришки не враховується.

Розподіл напруженості електричного поля по висоті ізоляційної конструкції без екрану визначається таким чином [42]:

$$E_{zi} = R_1 \cdot U_{mp} / Z_i^2 \cdot \sqrt{3}, \quad (5.2)$$

де  $R_1$  – радіус кулі, яка апроксимує верхній електрод ізоляційної конструкції, см; з урахуванням конструктивних розмірів трансформатора напруги вибирається величина  $R_1$ , рівна 30 см;

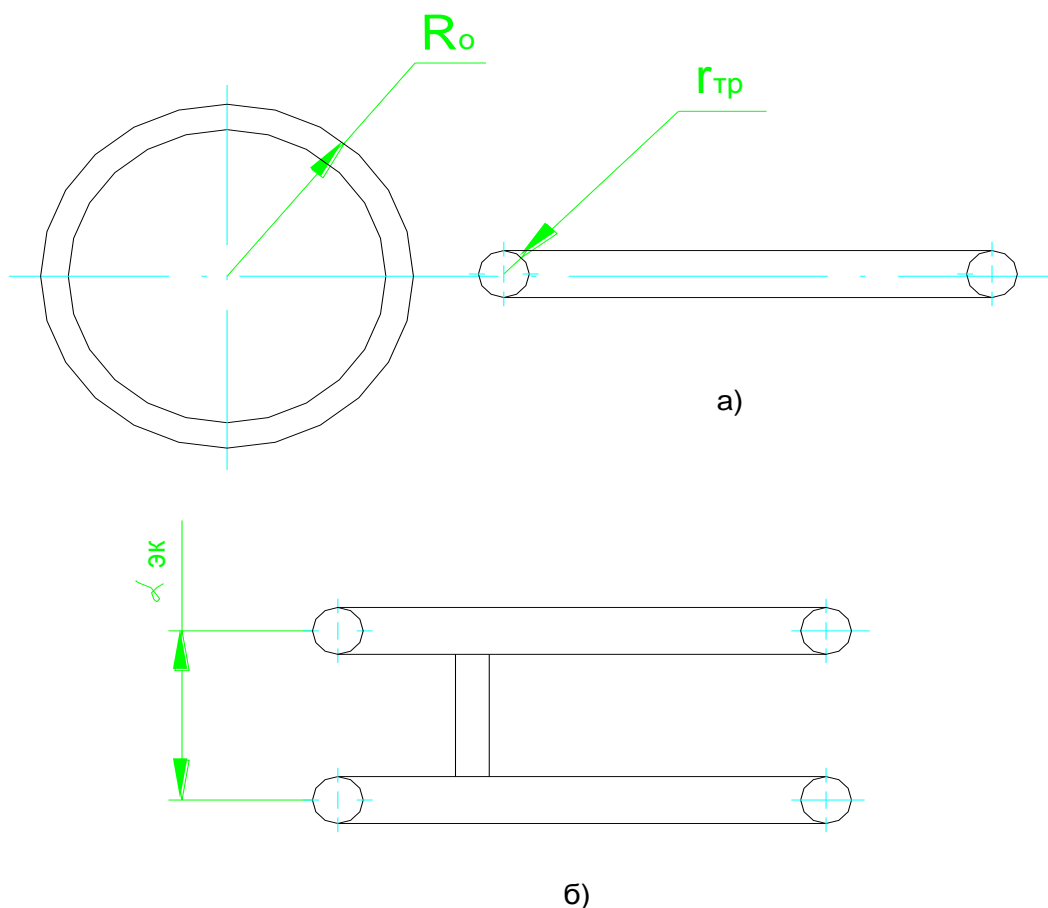
$U_{mp}$  – максимальна робоча напруга;

$Z_i$  – висота розташування умовного елемента ізоляційної конструкції, см. Її величина вимірюється від поверхні апроксимуючої кулі і до заземленого нижнього фланця.

Задаючись чисельними значеннями  $Z_i$  від 30 до 600 см, розраховується розподіл електричного поля уздовж поверхні опорної ізоляційної покоришки згідно (5.2). Визначається величина напруженості поля на поверхні верхнього електроду:

$$E_{30} = 30 \cdot 420363/302 \cdot \sqrt{3} = 7,1 \text{ кВ/см},$$

Для інших значень координати  $Z_i$  розрахунок проводиться аналогічно, і результати розрахунків зводяться в таблицю 5.1.



а – поодинокий кільцевий екран; б – подвійний кільцевий екран.

Рисунок 5.1 – Кільцевий поодинокий і подвійний (здвоєний) екрани

Напруженість електричного поля уздовж ізоляційної конструкції з тороїдальним екраном, яка показана на рисунку 5.2, визначається на підставі методики, приведеній в [4, 42] на підставі наступної умови:

$$E_{zi} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 Z^2} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Z - (H_2 - H_1)}{[(Z - H_2 + H_1)^2 + R_0^2]^{3/2}} +$$

$$+ \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} * \frac{R_1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_o^2}} * \frac{1}{\{ Z^2 * [(Z - A)^2 + B^2]^{3/2} \}} \quad (5.3)$$

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля по зовнішній ізоляції за відсутності екрану

Zi, см	30	32	35	40	45	100	200	324	600
Ezi	7,1	6,15	6,0	5,14	3,10	0,63	0,15	0,01	0,01

Заряди на екрані і апроксимуючій кулі, які входять як початкові параметри в рівняння (5.3) можна знайти на підставі рішення системи потенційних рівнянь [4, 42]:

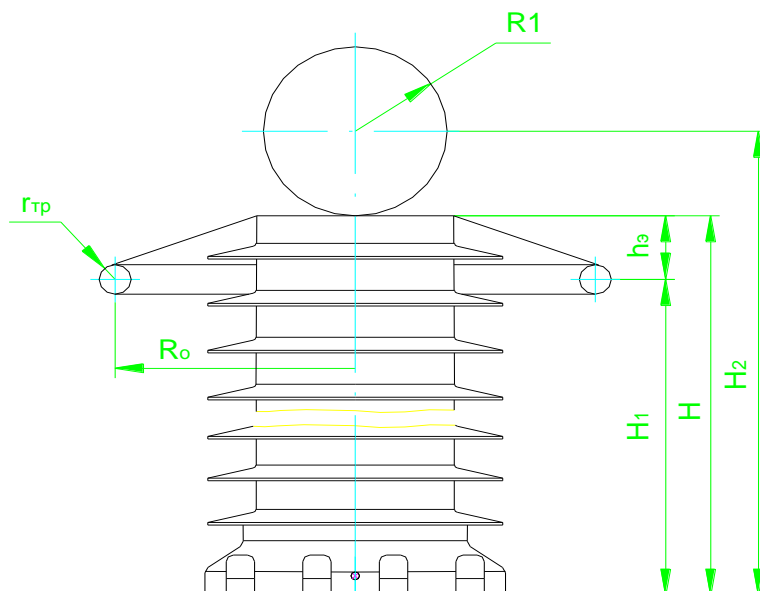


Рисунок 5.2 – Графічна модель для розрахунку розподілу напруженості електричного поля по зовнішній ізоляції для опорної ізоляційної покривки з тороїдальним екраном

$$U = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2,$$

$$U = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2,$$

$$q1 = \frac{U_{np}}{\alpha_{11}\sqrt{3}} * \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{22}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11} * \alpha_{22}}},$$

$$q2 = \frac{U_{np}}{\alpha_{22}\sqrt{3}} * \frac{1 - \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}}}{1 - \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{11}\alpha_{22}}}.$$

Власні і взаємні коефіцієнти  $\alpha_i$  для перелічених вище рівнянь можуть бути визначені по наступних формулах. Власний коефіцієнт для сфери радіусом R1 при висоті центру над землею H2 визначається:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_o} \left(1 - \frac{R_1}{2H_2}\right) \quad (5.4)$$

Для тороїдального екрану (тороида), що має радіус труби  $r_{tp}$  і радіус осьової лінії  $R_o$ , при висоті центру симетрії над землею H1 власний коефіцієнт виходить:

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4\pi^2 \epsilon_o R_o \left(1 + \frac{r_{mp}}{2R_o}\right)} * \frac{8R_o}{\ln \left[ \frac{r_{mp}}{r_{mp}} \left(1 + \frac{r_{mp}}{2R_o}\right) - \frac{\pi R_o}{2H_1} \right]} \quad (5.5)$$

Визначається взаємний коефіцієнт для сфери (апроксимуючий електрод) і тороїда (екран) (див. рисунок 5.2) з умови:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \left( \frac{1}{\sqrt{(H_2 - H_1)^2 + R_o^2}} - \frac{1}{\sqrt{(H_2 + H_1)^2 + R_o^2}} \right) \quad (5.6)$$

Коефіцієнти А і В, що враховують вплив другого екрану полюса, екранів крайніх фаз, шинування і відображення усієї системи електродів від землі визначаються таким чином:

$$A = \frac{R_1^2 (H_2 - H_1)}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2},$$

$$B = \frac{R_0 * R_1^2}{(H_2 - H_1)^2 + R_0^2}.$$

Величина відстані від землі до екрану Н1 і від землі до центра апроксимуючої кулі Н2 визначається з наступних умов (див. рисунок 5.2):

$$H1 = H - h_{эк}, \quad (5.7)$$

$$H2 = H + R1, \quad (5.8)$$

де Н – висота ізоляційної конструкції, см;

h<sub>эк</sub> – висота установки екрану, см.

Для кращого використання усієї зони вирівнювання поля тороїдального екрану, його слід розташувати на відстані h<sub>эк</sub> від поверхні сфери, що апроксимує верхній електрод. У загальному випадку величина цієї відстані визначається з наступного вираження:

$$h_{эк} = R_0 / \sqrt{2}, \quad (5.9)$$

де R<sub>0</sub> – радіус екрану, см.

Залежно від конструктивних особливостей величина h<sub>эк</sub> уточнюється з урахуванням такого критерію, як напруженість поля.

З метою визначення найбільш раціонального розподілу напруженості поля розглянемо, як впливає на розподіл напруженості електричного поля зміна геометричних розмірів екрану. Для першого випадку розглянемо вживаний у базовій конструкції трансформатора напруги стандартний тороїдальний екран радіусом  $R_0$ , рівним 100 см і радіусом труби  $r_{тр}$ , рівним 3 см. Підставляючи ці значення в рівняння (5.4), (5.8) а потім в (5.3), виходить наступне:

$$h_{эк} = 100 / \sqrt{2} = 69 \text{ см}$$

Оскільки отримане згодне (5.9) значення висоти установки екрану відрізняється від висоти установки екрану в аналогу, для подальших розрахунків набуває значення висота в аналогу, що дорівнює 35 см.

$$H_1 = 524 - 35 = 489 \text{ см,}$$

$$H_2 = 524 + 30 = 554 \text{ см.}$$

Для знаходження оптимального значення параметра  $h_{эк}$  необхідно зробити додаткові дослідження його впливу на розподіл напруженості поля уздовж ізоляційної конструкції.

Визначаються значення емпіричних коефіцієнтів  $A$  і  $B$

$$A = \frac{30^2 (554 - 489)}{(554 - 489)^2 + 100^2} = 4,11,$$

$$B = \frac{100 * 30^2}{(554 - 489)^2 + 100^2} = 6,32$$

Визначаються власні і взаємні коефіцієнти:

$$\alpha_{11} = \frac{1}{4 * 3,14 * 8,85 * 30} \frac{10}{14 \left( 1 - \frac{30}{2 * 554} \right)} = 2,99 \cdot 10^{10},$$

$$\alpha_{12} = \frac{1}{4 * 3,14 * 8,85} \frac{1}{1014} \left( \frac{1}{\sqrt{(554-489)^2 + 30^2}} - \frac{1}{\sqrt{(554+489)^2 + 30^2}} \right) = 1,17 \cdot 10^{10},$$

$$\alpha_{22} = \frac{1}{4 * (3,14)^2 * 8,85 * 30 \left(1 + \frac{4}{2 * 30}\right)} \frac{1}{1014} * \left[ \ln \frac{8 * 30}{4} \left(1 + \frac{4}{2 * 30}\right) - \frac{3,14 * 30}{2 * 489} \right] = 3,82 \cdot 10^{10},$$

$$q_1 = \frac{363}{2,99 * \sqrt{3}} \frac{1 - (7,86 * 10^9 / 2,41 * 10^{10})}{1 - \frac{(7,86 * 10^9)^2}{7,86 * 10^9 * 1,75 * 10^{10}}} \frac{1}{10^{-10}} = 4,55 \cdot 10^{-12},$$

$$q_2 = \frac{363}{3,82 * 10^{10} * \sqrt{3}} * \frac{1 - (11,7 * 10^9 / 2,99 * 10^{10})}{1 - \frac{(11,7 * 10^9)^2}{2,99 * 10^{10} * 3,82 * 10^{10}}} = 3,81 \cdot 10^{-9}.$$

Як показали розрахунки, результати яких приведені в таблиці 5.1 напруженість поля в нижній частині ізоляційної покришки дуже низька і практично не змінюється. В цьому випадку для спрощення аналізу доцільно обмежитися лише верхньою половиною ізоляційної покришки. Задаючись значеннями  $Z_i$  від 30 до 300 см, і підставляючи їх в (5.3), виходить наступне:

$$E_{z30} = \frac{4,55 * 10^{-12}}{4 * 3,14 * 8,85 * 10^{-14} (30)^2} + \frac{3,81 * 10^{-9}}{4 * 3,14 * 8,85 * 10^{-14}} * \frac{30 - (554 - 489)}{[(30 - 554 + 489)^2 + 30^2]^{3/2}} + \frac{3,81 * 10^{-9}}{4 * 3,14 * 8,85 * 10^{-14}} * \left\{ \frac{1}{30^2} - \frac{30 - 4,11}{[(30 - 4,11)^2 + 6,32^2]^{3/2}} \right\} = 3,76 \text{ кВ/см.}$$

Подальший розрахунок для інших значень  $Z_i$  проводиться з використанням ПК на підставі програмного забезпечення "Розрахунок і оптимізація екранів" для різних значень  $R_0$  і  $g_r$  і результати розрахунку зводяться в таблицю 5.2 і таблицю 5.3.

На підставі даних таблиці 5.3 побудовані графічні залежності впливу параметрів системи екранування на розподіл напруженості поля уздовж поверхні ізолятора, які показані на рисунку 5.3. Детальніше результати розрахунків показані в графічній частині роботи.

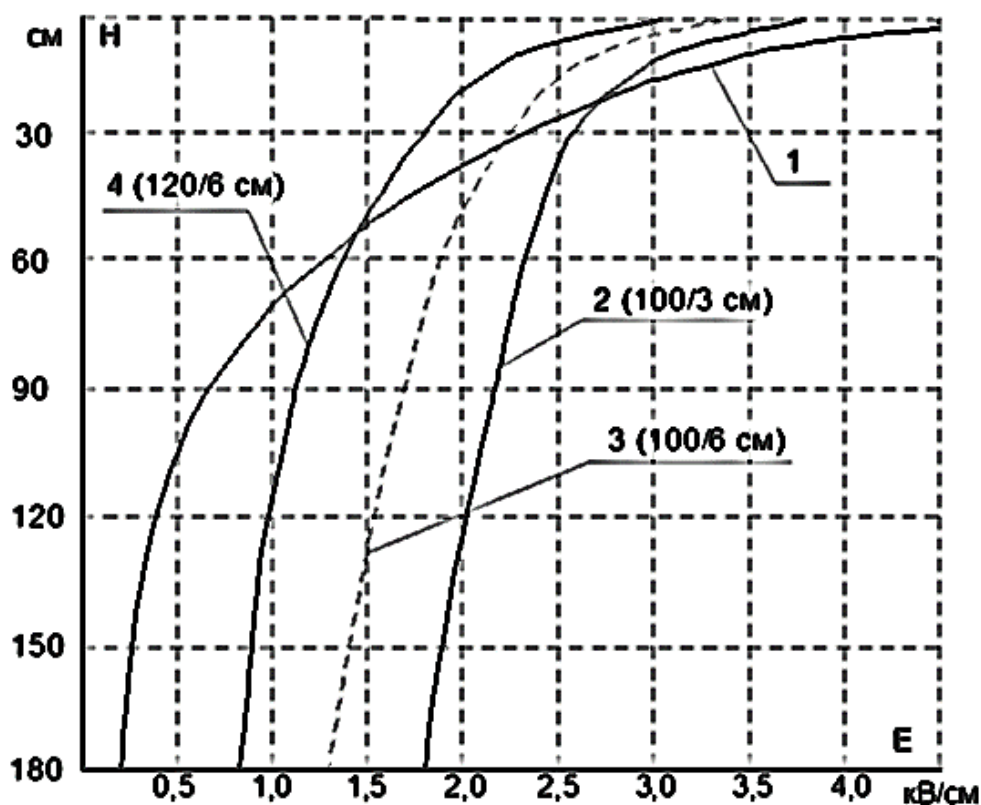
Таблиця 5.2 – Результати розрахунку розподілу напруженості поля по поверхні ізоляційної конструкції і критичної напруги корони при використанні тороїдального екрану з параметрами аналог.

Zi, см	30	60	90	120	150	180	210	300
Ezi	3,76	1,68	2,24	1,93	1,8	1,73	1,57	0,31

Таблиця 5.3 – Результати розрахунку розподілу напруженості поля по поверхні ізоляційної конструкції і критичної напруги корони при використанні тороїдального екрану з різними геометричними розмірами.

Ro, см	Rтр, см	Z, см									Uк, кВ
		30	60	90	120	150	180	210	240	300	
		Ez, кВ/см									
100	3	3,76	3,18	2,24	1,91	1,64	1,78	1,43	0,75	0,31	1297
	6	3,59	1,87	1,68	1,44	1,36	1,31	1,31	0,57	0,28	
120	3	3,51	1,15	2,05	1,81	1,46	1,68	1,18	0,62	0,21	1316
	6	3,35	1,31	1,12	1,04	1,11	0,91	0,9	0,53	0,18	





1 – без екрану; 2, 3, 4 – за наявності тороїдального екрану з відповідними параметрами (радіус екрану/радіус труби екрану).

Рисунок 5.3 – Розподіл напруженості поля уздовж поверхні ізолятора при різних параметрах системи екранування

Критична напруга корони (напруга при якій виникає коронний розряд) на поодинокому кільцевому екрані (див. рисунок 5.1.а), встановленому на опорній ізоляційній конструкції, визначається з наступного рівняння [3, 25]:

$$U_K = \frac{E_K * r_{mp}}{\frac{A_2(1 - \frac{A}{N})}{\ln \frac{8 * R_0}{r_{mp}} - 1} + \frac{r_{mp}}{NR_0}}, \quad (5.10)$$

де  $A$ ,  $A_2$ ,  $N$  – емпіричні коефіцієнти, що враховують вплив другого екрану, сусідніх полюсів і ін. обладнання розподільного пристрою;

$E_k$  – критична напруженість корони, кВ (напруженість, яка відповідає критичній напрузі), що визначається за умовою:

$$E_k = 16,5 \cdot k_{ш} \cdot \gamma \left( 1 + \gamma^{0,3} * r_{mp}^{\frac{0,62}{}} \right), \quad (5.11)$$

де  $k_{ш}$  – коефіцієнт нерівності поверхні екрану, з урахуванням кліматичних умов експлуатації вибирається в межах (0,75–0,8);

$\gamma$  – відносна густина повітря;

$r_{тр}$  – радіус труби екрану, см.

$$E_k = 16,5 \cdot 0,73 \cdot 1 \left( 1 + 1^{0,3} * 3^{0,38} \right) = 16,9 \text{ кВ/см},$$

$$A = \ln \frac{2H}{R_o} - \ln \left[ 0,5 + 0,5 \sqrt{1 + (2H / H_n)^2} \right], \quad (5.12)$$

$$A_2 = 1 + \frac{r_{mp}}{R_o} \ln \frac{8R_o}{r_{mp}}, \quad (5.13)$$

$$N = \ln \frac{2H}{Re}, \quad (5.14)$$

$$Re = \sqrt[m]{m * q * v^{m-1}},$$

де  $H$  – висота ізоляційної конструкції, см;

$H_n$  – відстань між сусідніми полюсами, см;

$R_o$  – радіус екрану, см;

$m$  – кількість проводів гнучкої шини полюса;

$q$  – радіус одного проводу гнучкої шини, см;

$v$  – радіус кола розташування дротів у фазі гнучкої шини.

Визначаються значення параметрів і коефіцієнтів, що позначені вище:

$$A = \ln \frac{2H}{Re} - \ln[0,5 + 0,5\sqrt{1 + (2 * 524 / 550)^2}] = 5,15,$$

$$A2 = 1 + \frac{4}{2 * 100} \ln \frac{8 * 100}{4} = 1,11,$$

$$Re = \sqrt[3]{1 * 2 * 2^{1-1}} = 2 \text{ см},$$

$$N = \ln \frac{2 * 534}{2} = 5,6$$

Підставляючи визначені вище коефіцієнти в рівняння (5.8), отримуємо:

$$U_k = \frac{\frac{16,9 * 3}{1,11(1 - \frac{5,15}{5,6})} + \frac{3}{5,6 * 100}}{3} = 1297 \text{ кВ}$$

Вище приведений розрахунок критичної напруги корони виконаний за умови, що радіус труби екрану складає 3 см і радіус екрану дорівнює 100 см. Змінюючи геометричні розміри екрану, можна підвищити значення  $U_k$ . Для проведення дослідження впливу параметрів екрану проведено необхідні розрахунки, які виконано на підставі розробленого автором програмного забезпечення "Розрахунок і оптимізація екрану" [39, 40]. Результати розрахунку зводяться в таблицю 5.3. Як показують дані таблиці 5.3, критична напруга корони перевищує максимальну робочу напругу на даній опорній ізоляційній конструкції. Величина коефіцієнта запасу визначається неврахованими раніше експлуатаційними чинниками, наприклад, атмосферними осіданнями (сніг, дощ і ін.), які знижують величину  $U_k$  на екранах з природно забрудненою поверхнею на (10–15) %.

При використанні подвійного екрану критична напруга корони відрізнятиметься від вище за розрахованих значення на величину емпіричного коефіцієнта сдв. ек, який визначається на підставі графічних залежностей, приведених в [7, 11]

і складає 0,91 – для радіусу труби екрану, рівного 3 см, і 0,93 – для радіусу труби екрану, рівного 4 см і 0,95 – для радіусу труби екрану, рівного 6 см.

Критична напруга корони за умови застосування подвійного екрану визначається на підставі наступного рівняння:

$$U_{к.дв} = \frac{E_k * r_{mp}}{c_{дв.эк} * A_2 (1 - \frac{A}{N})} + \frac{r_{mp}}{N * R_0} \quad (5.15)$$

Як що відомі значення геометричних розмірів подвійного екрану і підставляючи їх в (1.10), визначаються значення критичної напруги корони, які зведені в таблицю 5.4 і показані на рисунку 5.4.

За даними розрахунків, приведених в таблиці 5.3, перевіряється умова відсутності корони (5.1) при використанні вище:

$$U_{к.і} \geq 1,1 * 525 / \sqrt{3} = 340 \text{ кВ}$$

Таблиця 5.4 – Результати розрахунку критичної напруги корони

Экран	Радіус труби	Радіус екрану	Напруга корони
	гтр, см	Ro, см	Uк, кВ
Поодинокий екран	3	100	1297
	6		1324
	3	120	1316
	6		1342
Подвійний екран	3	150	1338
	6		1361

Аналіз таблиці 5.3 і таблиці 5.4 і графіків рисунок 5.3 і рисунок 5.4 показав, що зміна радіусу труби екрану  $r_{tr}$ , при постійному значенні радіусу екрану  $R_0$ , має більше значення напруги корони, чим при зміні радіусу екрану  $R_0$  при постійному значенні радіуса труби екрану. Використання подвійного екрану значно підвищує напругу корони та більш рівномірно розподіляє напруженість електричного поля по довжині поверхні опорної ізоляційної конструкції у зоні дії екрану при постійному значенні радіусу труби екрану. Застосування подвійного екрану значно збільшує напругу корони і більше рівномірно розподіляє напруженість електричного поля по довжині поверхні опорної ізоляційної конструкції в зоні дії екрану. З економічної точки зору подвійний екран на цьому класі напруги застосовувати нецільно, оскільки він має масу більше, ніж поодинокий екран, і внаслідок цього і велику вартість.

На підставі даних таблиці 5.3 і таблиці 5.4, а також результатів проміжних розрахунків побудовані графічні залежності, які приведені в графічній частині роботи. Отримані результати по розподілу напруженості поля уздовж опорно-ізоляційної конструкції трансформатора напруги є початковими даними для дослідження їх впливу на експлуатаційну надійність трансформатора напруга, яка буде проведена в наступній главі роботи.



Рисунок 5.4 – Порівняння критичної напруги а) критичній напруженості б) при різних параметрах системи екранування

## 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Надійність ізоляційної конструкції ця властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники у встановлених межах впродовж необхідного проміжку часу. Надійність ізоляційної конструкції така ж важлива фізична властивість, як і інші її показники, наприклад такі показники електричного навантаження, як пробивна або розрядна напруга, робоча і допустима напруженості поля і ін. Для конкретної ізоляційної конструкції, що працює в певних умовах, надійність характеризується такими показниками, як напрацювання до відмови і термін служби, які є цілком певними величинами. Зокрема, термін служби це календарна тривалість експлуатації виробу до моменту виникнення граничного стану, обумовленого в технічній документації, а напрацювання повністю це тривалість роботи ізоляційної конструкції.

### 6.1 Аналіз імовірнісних характеристик оцінки надійності

Для конкретного виробу, працюючого в певних умовах, напрацювання і термін служби є цілком певними величинами. Так, наприклад, термін служби конкретної ізоляційної конструкції (прохідний або опорний ізолятор, ізоляційна покришка трансформатора напруги і ін.) має абсолютно визначене, але заздалегідь невідоме значення. Термін служби залежить від якості матеріалу, товщини ізоляції, електричної, теплової і механічної навантажень і тому подібне. Точний вплив усіх чинників, від яких залежить термін служби нової ізоляційної конструкції, заздалегідь визначити не можна, можуть бути зроблені лише приблизні оцінки, що мають ту або іншу міру достовірності. Проте, середньо – статистичний термін служби для виробу однієї партії або типу цілком визначений. У цих умовах мірою оцінки надійності зручно використати імовірнісні характеристики, а саме:

вірогідність безвідмовної роботи – це вірогідність того, що на заданому інтервалі часу не виникне відмови виробу;

вірогідність відмови – це вірогідність того, що в заданому інтервалі часу станеться відмова виробу;

інтенсивність відмов – це вірогідність відмови виробу, що не ремонтується, в одиницю часу після цього моменту часу за умови, що відмова до цього моменту не виникла;

щільність вірогідності відмов.

Усі вищеперелічені характеристики надійності між собою пов'язані простими співвідношеннями, які наводяться в [5, 6, 16, 18] для різних теоретичних законів розподілу.

У електроізоляційних конструкціях за певних умов може відбуватися самовідновлення їх працездатності. Наприклад, канал пробою (перекриття) газової ізоляції після відключення її від джерела живлення ліквідується, і електрична міцність газового проміжку набуває первинного значення за невеликий проміжок часу. Самовідновлення первинної електричної міцності має місце для елементів зовнішньої ізоляції. Вірогідність безвідмовної роботи для ізоляції, що самовідновлюється, може бути визначена з умови [42]:

$$P(t) = 1 - Q(t)[1 - Q_v(t_v)], \quad (6.1)$$

де  $Q(t)$  – вірогідність відмови ізоляційної конструкції;

$Q_v(t_v)$  – вірогідність відновлення первинної електричної міцності за час  $t_v$ .

Час відновлення для газової ізоляції повітряних ліній електропередач і розподільних облаштувань підстанцій дорівнює часу між відключенням і повторним включенням ділянки, де мав місце пробій ізоляції. Зазвичай цей час складає порядку (2–3) с.



Однією з найважливіших імовірнісних характеристик електричної ізоляції є рівняння кривої життя. Воно характеризує залежність часу до руйнування твердої електричної ізоляції від тих чинників, що впливають на неї, наприклад електричного поля, механічної напруги, температури, агресивних середовищ і тому подібне [2, 42]. Теоретичне рівняння кривого життя базується на умові, що відмова ізоляції відбувається внаслідок розриву зв'язків в матеріалі на атомарному рівні. Поєднання механічної, теплової і електричної енергій призводить до того, що розривши зв'язки настане за умови, що сумарна енергія буде рівна або перевищить енергію взаємодії атомів в ізоляційному матеріалі.

Якщо теплове і механічні дії знаходяться в межах робочих значень, які обумовлені в технічних умовах на експлуатацію, то вони не можуть викликати руйнування матеріалу ізолятора. Розрив зв'язків в електричній ізоляції станеться в області найбільшої місцевої напруженості поля. Як правило, в реальній ізоляційній конструкції місцева напруженість поля перевищує її середнє значення. Це виникає за рахунок неоднорідності ізоляційного матеріалу і нерівномірності електричного поля, що створюється системою електродів. В цьому випадку виконується наступна умова:

$$E_m = \beta\eta E = \beta E_i, \quad (6.2)$$

де  $E_m$  – напруженість електричного поля в місці зв'язку (, що розривається, місцева напруженість поля);

$\beta$  – коефіцієнт неоднорідності ізоляційного матеріалу, чисельно рівний відношенню найбільшої напруженості поля, що має місце у неоднорідностей, до середньої для умов рівномірного поля, що створюється системою електродів;

$\eta$  – коефіцієнт нерівномірності поля, що створюється системою електродів; для електричного поля, близького до рівномірного, можна вважати, що  $\eta \leq 3$ ;

$E$  – середня напруженість поля, рівна відношенню прикладеної напруги до міжелектродної відстані;

$E_i$  – значення напруженості в  $i$  – й точці ізоляційної конструкції в умовах різко неоднорідного поля; її значення може бути визначене на підставі методик [3, 42, 43].

Таким чином, рівняння кривого життя електроізоляційної конструкції можна записати у такому вигляді [2, 42]:

$$t = t_0 \exp[D\varphi(x)/2hT], \quad (6.3)$$

де  $t_0$  – період власних коливань атомів;

$D$  – енергія дисоціації зв'язку між атомами;

$\varphi(x)$  – функція навантаження, що діє на зв'язок, який визначається з умови

$$\varphi(x) = \sqrt{1-2x} - x \ln\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{x} \sqrt{1-2x} - 1\right),$$

$$x = \frac{af}{D},$$

де  $f$  – розтягуюча сила, що діє на зв'язок;

$a$  – постійний коефіцієнт, пов'язаний з не гармонійністю коливань атомів;

$T$  – абсолютна температура.

Для полімерної ізоляції з урахуванням дії механічної розтягуючої напруги і електричного поля значення параметра  $x$  визначається з умови:

$$x = \frac{1}{D} \sqrt{\gamma^2 \sigma^2 + (A \exp(-eT) E_m)^2},$$

де  $\gamma$  – структурно – чутливий коефіцієнт, величина якого визначається з умови:

$$\gamma = \frac{e\alpha Ma}{N^A \rho R n_m \left(1 - \frac{2m}{m_y}\right)},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт впорядкованості структури полімеру;

$M$  – молекулярна маса ланки полімерної молекули;

$N_A$  – число Авогадро, рівне  $6,02 \cdot 10^{26}$  1/кмоль;

$\rho$  – щільність полімеру;

$R$  – рівноважна довжина зв'язку (рівноважна відстань між атомами основного ланцюга полімеру);

$n_m$  – число зв'язків в основному ланцюзі ланки полімерної молекули;

$m$  – молекулярна маса кінця полімерного ланцюга, що не сприймає навантаження;

$m_{\text{ц}}$  – середньозважена маса ланцюгів полімеру;

$\sigma$  – розтягуюча механічна напруга.

Оскільки метою роботи є дослідження впливу електричного навантаження на експлуатаційну надійність, вводиться наступна умова [25]:

$$A \exp(-bT) = \gamma \sqrt{\epsilon_a G_M},$$

де  $\epsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність;

$G_M$  – модуль пружності матеріалу діелектрика.

Загальний вигляд залежності  $\ln t = f(x)$ , побудованою на основі (6.3) показаний на рисунку 6.1.

Для реалізації умови (6.3) для конкретної ізоляційної конструкції, наприклад даного трансформатора напруги, необхідно знати велику кількість параметрів, які характеризують цю конструкцію. Дана опорно-ізоляційна покривка по своїй структурі і характеристикам є дуже неоднорідною. Для проведення досліджень в

першому наближенні її можна представити як систему, що складається з двох основних частин (елементів):

тверда ізоляційна конструкція, що виготовлена з фарфору або складається із склоепоксидного циліндра з нанесеним на його поверхню обрешенням з полімерного матеріалу на основі кремній–органічних гум;

газова ізоляція, утворена навколишнім повітрям.

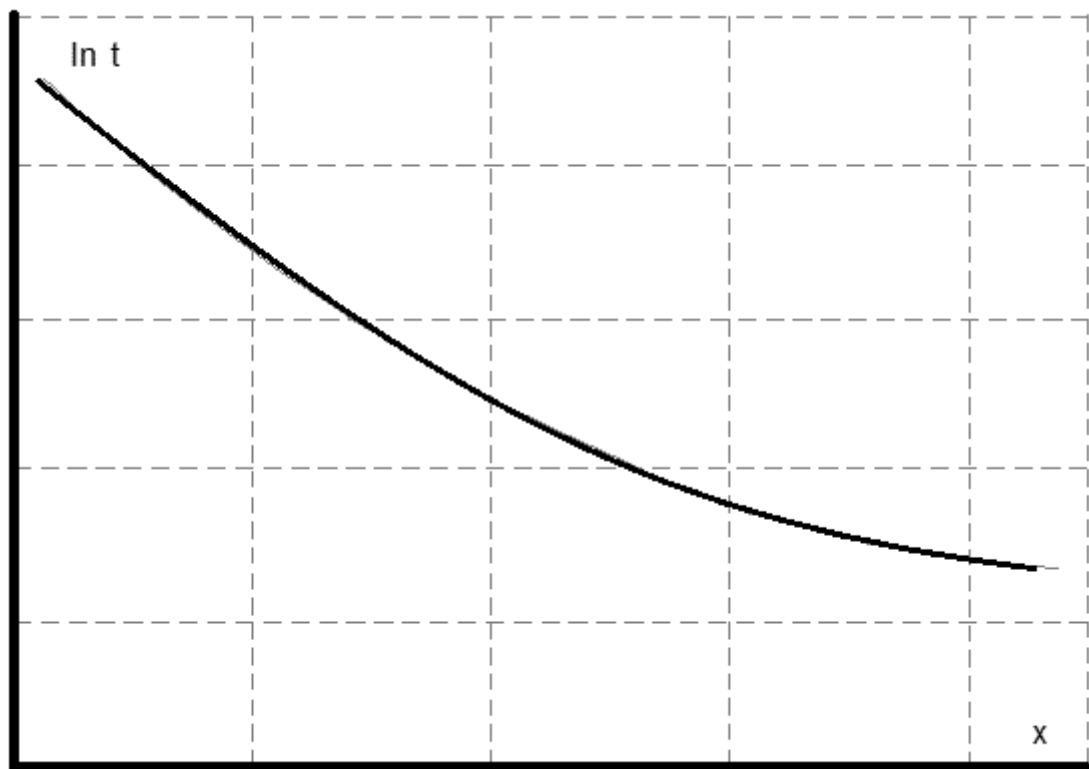


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд залежності  $\ln t = f(x)$

Вірогідність безвідмовної роботи такої системи визначається відмовою її складових елементів за умови, що відмова будь–якого з них призводить до відмови усієї системи.

В цьому випадку вірогідність безвідмовної роботи усієї системи визначиться з умови:

$$P(t) = P_T(T)P_G(T) = \prod_{i=1}^n P_i(T), \quad (6.4)$$

де  $P_T(t)$ ,  $P_G(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи відповідно до твердої і газової (повітряною) частини ізоляційної конструкції.

Тому подальшим завданням досліджень є розробка математичного апарату, який дозволить оцінити вірогідність безвідмовної роботи перерахованих що вище становлять результуючій вірогідності безвідмовної роботи.

## 6.2 Оцінка показників надійності для твердої ізоляції

Реальний ізоляційний матеріал відрізняється від ідеального діелектрика наявністю в ньому неоднорідностей: дефектів структури, наприклад мікропор, домішок, наповнювачів, пластифікаторів і ін. На зв'язки, розташовані біля таких неоднорідностей, діє підвищена напруженість поля, причому найбільша напруженість має місце у неоднорідностей, витягнутих у напрямі силових ліній електричного поля, тобто при максимальному значенні довжина ланцюжок неоднорідна  $\eta$ . Підвищення напруженості враховується коефіцієнтом  $\beta$ , як показано в (6.2). Величина параметра  $\beta$  обумовлена формою, розмірами і характеристиками неоднорідностей.

Неоднорідності в матеріалі діелектрика розподілені випадковим чином. В процесі виготовлення ізоляційного матеріалу і виробу з нього походять розділення і коагуляція неоднорідностей. Це призводить до того, що форма і розміри неоднорідностей є випадковими, отже, випадковим буде і параметр  $\beta$ . Для оцінки вірогідності безвідмовної роботи і терміну служби ізоляційної конструкції необхідно знайти функцію розподілу значень параметра  $\beta$ . Під терміном функція розподілу мається на увазі співвідношення між значеннями випадкової величини,

наприклад параметра  $\beta$ , і вірогідністю його виникнення. При цьому, для спрощення процесу аналізу, вводяться наступні допущення [42]:

елементарні неоднорідності мають сферичну форму з однаковим радіусом сфер;

у реальному тілі ізоляційного матеріалу зустрічаються неоднорідності, які мають різноманітну форму і досить сильно відрізняються по своїх розмірах. Проте будь-яку реальну неоднорідність можна представити як комбінацію елементарних неоднорідностей, що мають сферичну форму і однакові розміри.

Зроблені припущення дозволяють побудувати фізико-математичну модель неоднорідного діелектрика. Згідно з нею для товстого діелектрика рівняння вірогідності безвідмовної роботи матиме вигляд:

$$P(t) = \exp\left[\frac{lS}{0,482\eta V_0} z \exp\frac{0,83 \ln 1,3P}{z}\right], \quad (6.5)$$

де  $l$  – міжелектродна відстань;

$S$  – площа поперечного перерізу ізоляційної конструкції;

$V_0$  – середній об'єм матеріалу, в якому при рівномірному розподілі знаходиться б одна неоднорідність;

$\eta$  – коефіцієнт неоднорідності поля;

$z$  – кількість неоднорідностей, розташованих по осі елементарного циліндра діелектрика; у загальному випадку можна вважати:

$$z = y_1 + y_2 + y_3 + \dots;$$

$P$  – вірогідність попадання неоднорідності в елементарний об'єм циліндричної форми; значення цієї вірогідності можна оцінити з умови;

$$P = \frac{4\pi r^3}{3a^3},$$

де  $r$  – радіус сферичної неоднорідності, наприклад, для фарфорової і епоксидної ізоляції його величина може знаходитися в межах (1–5)  $\mu\text{м}$ ;

$a$  – відстань між центрами неоднорідностей.

Інтенсивність відмов твердої ізоляції визначається з умови [25]:

$$I(t) = VB\Theta(y), \quad (6.6)$$

де  $V$  – об'єм ізоляції, величина якого визначається з умови:

$$V = 1 \cdot S;$$

$\Theta(y)$  – параметр, який визначається за методикою [25];

$y$  – число поруч розташованих неоднорідностей в діелектриці;

$B$  – параметр, залежний від характеристик ізоляційного матеріалу; його значення визначається з урахуванням середньої напруженості поля і температури, що діє на ізоляцію, з умови:

$$B = \frac{1}{V_0 \eta} \frac{g_x}{g_x - 1} \left( \frac{D}{A \exp(-bT) \eta E} \right)^2 \frac{2kT}{D} \frac{1}{\tau_0},$$

де  $g_x$  – відносна провідність неоднорідності для змінної напруги, яка визначається з умови:

$$g_x = \frac{\epsilon_{a1}}{\epsilon_{a2}} \sqrt{\frac{1 + tg^2 \delta_1}{1 + tg^2 \delta_2}},$$

де  $\epsilon_{a1}$ ,  $\epsilon_{a2}$  – абсолютна діелектрична проникність відповідно до неоднорідності і діелектрика, що оточує її;

$\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $\operatorname{tg}\delta_2$  – тангенс кута діелектричних втрат відповідно для неоднорідності і діелектрика, що оточує неоднорідність.

### 6.3 Оцінка показників надійності газової ізоляції

У газовій ізоляції молекули знаходяться в постійному хаотичному русі і мають структуру, що постійно змінюється. У цих умовах розрив одного зв'язку не завжди призводитиме до утворення каналу пробую, і сприятиме малій вірогідності розриву подальших зв'язків після розриву першої, тобто утрудняти розвиток руйнування, що почався. Це дозволяє при розрахунку газової ізоляції користуватися її пробивною напругою, припускаючи, що воно не залежить від часу експлуатації.

Для газової ізоляції, працюючої в умовах нерівномірного електричного поля, найважливішою характеристикою є напруга (напруженість) появи коронних розрядів. Коронний розряд в газі у відмінності від твердого діелектрика може існувати тривалий проміжок часу, не завершуючись пробоем.

Проте цей процес супроводжується цілим рядом несприятливих наслідків, а саме:

- втратами енергії, яка витрачається на підтримку існування газових розрядів;
- радіоперешкодами, які можуть викликати порушення роботи ліній зв'язку і різних контрольно–вимірювальних пристроїв;
- акустичний шум, який негативно позначається на стомлюваності і підвищенні нервової напруги обслуговуючого і оперативного персоналу підстанції.

Таким чином, тривале існування коронного розряду в газовій ізоляції допускати не можна. Відмова газової ізоляції при експлуатаційних діях станеться тоді, коли електрична напруга (напруженість), що діють на ізоляцію, буде рівна або перевищить її розрядну напругу. Розрядна напруга газової ізоляції залежить від міже-



лектродної відстані, міри неоднорідності поля, температури, тиску, вологості і деяких інших чинників. Функція щільності розподілу розрядної напруги газової ізоляції описується нормальним законом розподілу [2, 25] і визначається з умови:

$$f(U, E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(U_p - MU_p)^2}{2\sigma_p^2}\right], \quad (6.7)$$

де  $\sigma_p$  – середньоквадратичне відхилення розрядної напруги (напруженості);

$MU_p$  – математичне очікування пробивної напруги; його значення визначається на підставі методики, викладеної в [2, 6, 25] виходячи з конкретних умов експлуатації і конструктивних форм ізоляційної конструкції;

$U_p$  – случайная величина розрядної напруги (напруженості).

Параметри  $MU_p$  і  $\sigma_p$  є параметрами нормального закону розподілу і для високовольтних ізоляційних конструкцій пов'язані співвідношенням

$$k_p = \frac{\sigma_p}{MU_p}, \quad (6.8)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт варіації.

Як показують дані [2, 42], значення коефіцієнта варіації  $k_p$  зростає зі збільшенням неоднорідності поля. Так, наприклад, для слабо неоднорідного поля значення цього коефіцієнта складає (0,01–0,02).

Повітря, що служить зовнішньою ізоляцією апаратів підстанцій і ліній електропередачі, має параметри, що змінюються в часі випадковим чином: тиск, температуру і вологість. В цьому випадку математичне очікування розрядної напруги (напруженості) буде також випадковою величиною. Коливання тиску, температури і вологості повітря викликають розкид розрядної напруги (напруженості) в процесі експлуатації, що призводить до зростання коефіцієнта варіації. Для повітряної ізоляції відкритих розподільних пристроїв з урахуванням коливань атмосферних умов

коефіцієнт варіації кр рекомендується приймати рівним (0,030–0,035), а для систем з різко неоднорідним полем (0,035–0,040).

У реальних ізоляційних конструкціях найчастіше зустрічається різко нерівномірне електричне поле, утворене сферичними і циліндричними системами електродів у поєднанні з екрануючими системами. У цих умовах співвідношення між розрядною напругою і розрядною напруженістю в повітрі виражається наступною умовою:

$$MU_p = \frac{E_p l}{y}, \quad (6.9)$$

де  $l$  – довжина повітряного проміжку;

$y$  – характеристика електродної системи, яка вибирається на підставі графіків [2]. Виходячи з конструктивних співвідношень, для даного трансформатора напруги значення параметра  $y$  складає близько (2,3–2,6);

$E_p$  – розрядна напруженість, значення якої для різних форм електродів вибирається на основі [2, 3]. Орієнтовно для даної ізоляційної конструкції вона складає (2,2–2,4) МВ/м.

Знаючи значення  $MUp(E_p)$  і  $\sigma_r$  можна оцінити показники надійності ізоляційної конструкції, що розглядається на підставі умов [6, 24] для нормального закону розподілу з таких умов:

$$P(t) = c[0,5 - \Phi(\frac{t - M_t}{\sigma_t})], \quad (6.10)$$

$$M_t = M_{ii} + \sigma K, \quad (6.11)$$

$$K = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} \exp[-0.5(M_{ii} / \sigma_t)^2], \quad (6.12)$$

де  $M_t$ ,  $\sigma_t$  – відповідно математичне очікування і середньоквадратичне відхилення, які є параметрами нормального закону розподілу випадкової величини  $t$ , наприклад напрацювання до відмови;

$c$  – постійна інтегрування, яка враховує той факт, що випадкова величина  $t$  змінюється в обмежених межах, наприклад  $(0-t)$ , тобто використовується усічений нормальний розподіл. Величина параметра  $c$  визначається з умови:

$$c = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{M_t}{\sigma_t}\right)}$$

Для проведення подальших досліджень за оцінкою впливу ефективності систем регулювання електричного поля ізоляційної конструкції на показники експлуатаційної надійності, в якості випадкових величин використовуються прикладена напруга  $U$  і дійсна напруженість поля  $E$ . Чисельні значення і розподіл цих параметрів в умовах різко неоднорідного поля для даної конструкції трансформатора напруги визначені в попередньому розділі магістрської роботи.

#### 6.4 Оцінка показників надійності в умовах розряду по поверхні ізоляційної конструкції в повітрі

Напруга перекриття твердих діелектриків в повітрі в усіх випадках менше напруги пробою повітря в тій же системі електродів і при однаковій міжелектродній відстані. В умовах нерівномірного поля напруга перекриття істотно залежить від форми електродів матеріалу діелектрика і стану його поверхні, особливо від її забруднення і зволоження. При великих міжелектродних відстанях напруга перекриття практично не залежить від матеріалу твердого діелектрика і радіусу закруглення електродів і наближається до розрядної напруги повітря в системі електродів вістря – площина [2]. У нерівномірному полі при невеликій нормальній складовій напруженості поля працюють більшість опорно-ізоляційних конструкцій

електричних апаратів. В цьому випадку вплив вологості і відносної щільності повітря враховуються для оцінки напруги перекриття по формулі [2]

$$U_{\text{пер}} = \frac{\delta}{m+1} U_{\text{рн}},$$

$$\delta = \frac{2,89 \cdot 10^{-5} P}{T} U_{\text{рн}},$$

де  $P$  – тиск повітря, Па;

$T$  – абсолютна температура, К;

$m$  – поправочний коефіцієнт на вологість повітря, яке визначається на підставі методики [2, 3];

$U_{\text{рн}}$  – розрядна напруга повітря для форми електродів вістря – площина; визначається на підставі методики [2, 3];

$\delta$  – відносна щільність повітря, яка для нормальних умов експлуатації і висоті установки над рівнем моря до 1000 м змінюється в межах (0,8–1,1).

Коливання тиску, температури і вологості повітря в процесі експлуатації збільшують розкид напруги перекриття. Таким чином, значення коефіцієнта варіації при пробої по поверхні дещо зростає в порівнянні з пробоем в повітрі і складає порядку (0,03–0,035) [2].

Найбільш важким режимом роботи ізоляційної конструкції є робота під дощем. Істотний вплив на напругу перекриття ізоляторів під дощем на змінній нарузі роблять забруднення і міру розвиненості їх поверхні. Співвідношення між основними показниками електричної міцності в цьому випадку має наступний вигляд:

$$U_{\text{пер.д}} = E_{\text{ср.д}} \cdot l_{\text{ут}}, \quad (6.13)$$

де  $U_{\text{пер.д}}$  – напруга перекриття ізолятора під дощем;

$E_{\text{ср.д}}$  – середня напруженість поля уздовж шляху витоку; при перекритті ізолятора під дощем залежно від типу забруднень знаходиться в межах (25–60) кВ/м;

$l_{\text{ут}}$  – довжина шляху витoku по поверхні ізолятора; визначається на основі даних [2, 3].

Напруга появи поверхневих розрядів  $U_n$ , у вигляді ліній, що світяться (ковзащій розряд), визначається по формулі:

$$U_n = \frac{7,8}{c_{\text{yo}}^{0,44}}, \quad (6.14)$$

де  $c_{\text{yo}}$  – питома поверхнева місткість,  $\text{Ф/м}^2$ ; для циліндричної ізоляційної конструкції визначається з умови:

$$c_{\text{yo}} = \frac{\epsilon_d \epsilon_0}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

де  $\epsilon_d$  – відносна діелектрична проникність діелектрика;

$\epsilon_0$  – постійна величина, рівна  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$r_1, r_2$  – відповідно внутрішній і зовнішній радіуси циліндричного твердого діелектрика.

Напруга перекриття (математичне очікування) в повітрі для великих міжелектродних відстаней практично не залежить від наявності або відсутності нормальної складової напруженості поля. Методика розрахунку напруги перекриття наводиться в [2, 3].

Напруга перекриття має досить великий розкид. Приблизно можна вважати, що коефіцієнт варіації напруги перекриття (6.8) складає порядку (0,04–0,06), причому великі значення мають місце при змінній напрузі частотою 50 Гц. При імпульсній напрузі (грозові і комутаційні перенапруження) значення коефіцієнта варіації дещо менше.

Таким чином, на підставі умови (6.8) за умови застосування нормального закону розподілу можна записати:

$$\kappa_p = \frac{\sigma_p}{MU_p} = 0,04...0,06, \quad (6.15)$$

На підставі розрахунків, виконаних із застосуванням умов (6.13).(6.15) можна отримати необхідні початкові дані для оцінки впливу параметрів електричного навантаження на показники експлуатаційної надійності ізоляційної конструкції як опорних ізоляторів, так і опорно–ізоляционных покришок високовольтних апаратів різного призначення. Основні показники експлуатаційної надійності визначаються на підставі рівнянь (6.4), (6.7), (6.10) і (6.11). Для цього розроблено програмне забезпечення AIR.NAD1, на підставі котрого проведена оцінка показників надійності для різних значень напруженості поля і довжини шляху витоку по верхній ізолятора, отриманих при дослідженні впливу параметрів екрану на розподіл напруженості уздовж ізоляційної покришки. Результати досліджень показані в графічній частині роботи.

6.5 Дослідження впливу параметрів електричного навантаження на показники надійності опорно–ізоляционной конструкції трансформатора напруги

Оскільки для оцінки показників надійності опорної ізоляційної конструкції потрібні конкретні значення початкових даних, то в якості аналога для проведення досліджень вибирається опорно–ізоляційна покришка трансформатора напруги типу НКФ – 525 виробництва КО ЗЗВА. Загальний вигляд покришки показаний на рисунку 1.4. Як було встановлено раніше, в процесі експлуатації трансформатора напруги можливі два види відмов ізоляційної покришки:

пробій матеріалу ізоляційної покришки, оскільки в середині її проходять елементи токоведущего контура з високим потенціалом;

перекриття ізоляційної покришки по її поверхні внаслідок дії несприятливих зовнішніх чинників і електричного навантаження.

Оскільки перекриття по поверхні твердого матеріалу ізоляційної покришки може мати місце як по зовнішній, так і по внутрішній поверхні, то в якості першого наближення вибирається наступне допущення. Оскільки умови роботи внутрішньої ізоляції значно легші, то вважатимемо, що відмови матимуть місце тільки в елементах зовнішньої ізоляції.

Оскільки настання будь-якого з цих подій призводить до відмови трансформатора, то в цьому випадку вірогідність безвідмовної роботи покришки визначається з умови:

$$P(t) = P_{\text{пр}}(t) P_{\text{пер}}(t),$$

де  $P_{\text{пр}}(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи при пробі твердого ізоляційного матеріалу покришки;

$P_{\text{пер}}(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи при перекритті по зовнішній поверхні покришки.

На першому етапі досліджень розглянемо, як впливає електричне навантаження на  $P_{\text{пер}}(t)$ .

Вірогідність безвідмовної роботи при перекритті ізоляції може бути визначена з умови:

$$P_{\text{пер}}(t) = 1 - Q_{\text{пер}}(t),$$

де  $t$  – випадкова величина (визначальний параметр), під дією якої відбувається процес перекриття ізоляції

$Q_{\text{пер}}(t)$  – ймовірність перекриття ізоляції під дією визначаючого параметру.

Для проведення подальших досліджень можливо використовувати в якості початкових даних результати попередніх досліджень, що отримані у даній магістерській роботі.

## **7 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ НА 500 кВ**

### **7.1 Техніко–економічних показників трансформатора**

Попит на трансформатори з масляною ізоляцією на світовому ринку, стабільно зростає. Це зв'язано, перш за все, із значним підвищенням якості масляних трансформаторів струму і напруги. Сучасні високовольтні вимірювальні трансформатори з масляною ізоляцією стали вибухобезпечними. Великий позитивний досвід їх застосування при низьких температурах, а також порівняно низька ціна, в багатьох випадках зробила їх незамінними.

На ринку високовольтних вимірювальних трансформаторів, головним чином, присутні два типи трансформаторів – один з масляною ізоляцією, а інший з елегазової, причому кожен з них має свою власну нішу на ринку, яка визначається його конструктивними та іншими особливостями.

Виробництво електричних апаратів вимагає виробництва деталей і складальних одиниць найрізноманітніших конструкцій і габаритів. При виробництві проєктованого трансформатора напруги на номінальну напругу 500 кВ використовуються різні технологічні процеси: металообробка різанням і тиском; заливка деталей з використанням різних методів; електро– і газове зварювання; виробництво гнутих деталей; намотування і електромонтаж обмоток; процес складання і т.д.

В процесі дослідження було виявлено, що трансформатор, який не мав екрану міг швидче вийти з ладу, а ніж той що мав екран. Тому було вирішено, що застосування екрану є економічним, тому що він дає апарату більш високу надійність і довгострокову експлуатацію

У процесі складання трансформатора використовується серійний тип виробництва. Серійним називається виробництво, при якому вироби випускаються партіями або серіями при тривалому часу. В умовах серійного виробництва дося-



гається більш виражена спеціалізація, оскільки обробляються або збираються однакові або схожі за конструкцією деталі або складальні одиниці. Використовується спеціальне оснащення, кожен робітник виконує в основному 1–2 операції.

Техніко–економічні показники трансформатора напруги наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Техніко–економічні показники трансформатора напруги

Показник	Одиниця виміру	Значення
Тип трансформатора (аналог)		НКФ 525
клас напруги	кВ	400
Номінальна напруга вторинних обмоток:		
– основної	В	$100/\sqrt{3}$
– додаткової	В	100
Тип покришки		П–1330–
Повна маса трансформатора	кг	110/420 1У1
Маса трансформаторного масла		1200
Маса обмотувального дроту	кг	
Тип обмотки	кг	300
Термін служби трансформатора		21,07
Термін планових капітальних ремонтів	рік	циліндрична25
Обсяг виробництва нового виробу	рік	12
	одиниць	12
		400

## 7.2 Оцінка ринку збуту та стратегія маркетингу

Трансформатор масляний продається на внутрішньому і на зовнішньому ринку електротехнічної продукції.

На внутрішньому ринку потенційними покупцями, з якими є попередня домовленість про покупку трансформаторів, є електричні станції та підстанції в разі закінчення терміну експлуатації, а також аварійного виходу з ладу трансформатора, який не підлягає ремонту.

На зовнішньому ринку потенційними покупцями є підприємства, що будуються, електричні станції та підстанції на яких передбачена експлуатація трансформаторів класу напруги 500 кВ. В основному це підприємства країн, які розвиваються.

Для того щоб підприємство функціонувало, йому необхідна підтримка необхідної кількості вигідних продажів заради досягнення певних завдань організації, таких як отримання прибутку, зростання обсягу збуту, збільшення частки ринку. Для збільшення обсягу збуту підприємства вивчають споживчі потреби, розробляють відповідні конструкції виробів і встановлюють на них відповідні ціни, проводять розгортання служби сервісу. Для стимулювання продажів покупцям видається гнучка система знижок, безкоштовна поставка запасних частин і супутнього устаткування в разі покупки великої партії товару.

## 7.3 Розрахунок собівартості і ціни трансформатора

Собівартість проектного трансформатора розраховується виходячи з нормативів витрат матеріалів і робіт.

Сировина і основні матеріали розраховуються за нормами витрати і цінами, при цьому транспортно-заготівельні витрати задаються. Реалізовані відходи віднімаються. Вартість сировини і основних матеріалів приведена в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Вартість сировини і основних матеріалів

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма використання	Ціна, грн	Вартість, грн
Провід мідний ПБ	2,35	39,6	92,34
Провід мідний ПЕЛО	8,35	36,8	307,28
Масло трансформаторне	150	25	3750
Дисперсія ПВА	0,8	10,2	8,16
Стрічка кіперна	16,5	0,5	8,25
Бумага ТВ–120	1,64	48,6	79,7
Сталь ел.тех. 3413	74,75	24,6	1838,85
Емаль ПФ–115	0,3	16,20	4,86
Бакелітовий циліндр	0,28	12,4	3,47
Сталь тонколистова	36,6	10,2	367,2
Інші	–	–	755,64
Разом	–	–	4905,75
ТЗР (3 %)	–	–	147,17
Всього	–	–	7362,92
Оборотні матеріали	–	–	135,4
Разом вартість сировини і матеріалів			7497,32

Для обґрунтування собівартості трансформатора необхідно визначити витрати статей і скласти планову калькуляцію. Собівартість трансформатора розраховується за формулою:

$$C = M + K + 3_0 + 3_0 + BC + 3BB + AB + B3, \quad (7.1)$$

де М – витрати на сировину і основні матеріали, грн;

К – витрати на покупні комплектуючі виробу і напівфабрикати, грн;

3<sub>0</sub> – основна заробітна плата, грн;

З д – додаткова заробітна плата, грн;

BC – відрахування до єдиного соціального внеску, грн;

ЗВВ – загальнопромислові витрати, грн;

AB – адміністративні витрати, грн;

ВЗ – витрати на збут, грн.

Виробнича собівартість визначається за формулою:

$$C_{np} = M + K + Z_o + Z_o + BC + ZBV \quad (7.2)$$

Вартість покупних комплектуючих виробів, напівфабрикатів розраховується за нормами витрат, цінами з урахуванням транспортно–заготівельних витрат. Вартість покупних комплектуючих приведена в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Вартість покупних комплектуючих виробів

Найменування купівельних комплектуючих виробів	Норма використання одиниці	Ціна, грн	Вартість, грн
Стакан відстійник	2	15	30
ПокришкаП–1330/420 1У1	3	1750	1750
Інші			18
Всього			1960
ТЗР (3 %)			58,8
Всього вартість покупних комплектуючих виробів			2018,8

Заробітна плата основних виробничих робітників на один трансформатор розраховується, виходячи з трудомісткості виробу і годинних тарифних ставок. Витрати виробничої заробітної плати на виготовлення трансформатора залежить від ступеня складності конструкції, від серійності виробництва, від новизни виробу та інших параметрів. Витрати на зарплату робітникам визначаються для кожної деталі і кожної операції технологічного процесу складання, фарбування, сушіння та ін. за

діючими на підприємстві нормами та розцінками. Розрахунок заробітної плати наведено в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Заробітна плата основних виробничих робітників

Найменування операції	Норма часу, нормогодини	Розряд робіт	Годинна тарифна ставка, грн	Заробітна плата на одиницю продукції, грн
Виготовлення магніто-проводу	21,2	5	40	848
Виготовлення ярмова ізоляції	1,4	4	35	49
Виготовлення екрану	0,8	4	35	28
Намотування обмотки	14,5	6	70	1015
Складання активної	14,2	6	70	994
Виготовлення корпусу	12,6	5	60	756
Збірка	15,2	5	60	912
Випробування	6,4	6	65	416
Всього	86,3	–	–	5018

Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників становить 40% від основної заробітної плати:

$$Z_o = Z_o \cdot \frac{40}{100\%}, \quad (7.3)$$

$$Z_o = 5018 \cdot \frac{40}{100} = 2007,2 \text{ грн.}$$

Відрахування до єдиного соціального внеску:

$$B_{c.m.} = (3_o + 3_d) \cdot \frac{B}{100\%}, \quad (7.4)$$

$$B_{c.m.} = (2007,2 + 5018) \cdot \frac{22}{100} = 1545,5 \text{ грн.}$$

Непрямі витрати можна підрахувати як загальновиробничі витрати, адміністративні витрати і витрати на реалізацію.

Загальновиробничі витрати (ЗВВ) складаються з витрат на утримання та експлуатацію устаткування (ВУЕУ), а також з цехових витрат (ЦВ).

ВУЕУ розраховуються на підставі складання кошторису за статтями витрат:

- заробітна плата (основна і додаткова) допоміжних робітників, які виробляють обслуговування;
- відрахування до єдиного соціального внеску від заробітної плати допоміжних робітників;
- силова електроенергія;
- амортизація обладнання, транспортних засобів, цінного інструменту;
- поточний ремонт обладнання, транспортних засобів, цінного інструменту;
- інші витрати, які не враховувалися в попередніх статтях, приймаються укрупнено в розмірі 5% від суми витрат за всіма попередніми статтями.

Цехові витрати визначаються за такою номенклатурою статей:

- зміст цехового персоналу (враховується основна і додаткова зарплата допоміжних робітників, ІТП ділянки);
- відрахування на соціальне страхування від основної та додаткової зарплати допоміжних робочих, ІТП ділянки;
- електроенергія для освітлення;
- амортизація будинків і споруд, їх поточний ремонт;
- охорона праці і техніка безпеки;
- впровадження нової техніки;

– інші витрати, приймаються в розмірі 5% суми витрат за всіма попередніми статтями.

В цьому випадку ЗВВ складають 400% від заробітної плати основних виробничих робітників:

$$ЗВВ = З_о \cdot \frac{\alpha}{100\%}, \quad (7.6)$$

де  $\alpha$  – відсоток ЗВВ.

$$ЗВВ = 5018 \cdot \frac{400}{100} = 20072 \text{ грн}$$

Адміністративні витрати (АВ) – це загальногосподарські витрати. Ці витрати розраховуються на основі складання кошторису загальногосподарських витрат. Вони включають витрати, які пов'язані з функціонуванням всього підприємства і містять такі статті:

- основна і додаткова заробітна плата, а також відрахування на соціальні заходи керівників і фахівців підприємства;
- електроенергія для освітлення приміщень загальнозаводського призначення;
- амортизація будинків загальнозаводського призначення;
- охорона праці і техніка безпеки керівників і фахівців підприємства;
- інші витрати;

А її поділяють на собівартість одиниці продукції різних найменувань пропорційно основній заробітній платі виробничих робітників.

$$АВ = З_о \frac{\beta}{100\%}, \quad (7.7)$$

де  $\beta$  – процент АВ.

Згідно (7.7), отримаємо:

$$AB = 5018 \cdot \frac{500}{100} = 25090 \text{ грн}$$

Витрати на збут (ВЗ) – це витрати не пов'язані з виробництвом. Вони містять витрати, які пов'язані з реалізацією продукції. Розраховуються ВЗ на основі складання кошторису ВЗ, і містять такі статті:

- транспортні, складські та комунікаційні витрати;
- тара і її матеріали;
- відрядження, пов'язані з реалізацією продукції;
- реклама та представницькі витрати;
- оплата послуг посередницьких, консультативних та аудиторських фірм;
- інші витрати.

В цьому випадку ВЗ складають 8% від суми виробничої собівартості і адміністративних витрат.

$$BZ = (C_n + AB) \cdot \frac{\gamma}{100\%}, \quad (7.8)$$

де  $\gamma$  – відсоток ВЗ, обирається рівним 2 %.

Відповідно до формули (7.2) виходить:

$$C_{np} = 7497,32 + 2018,8 + 5018 + 2007,2 + 1545,5 + 20072 = 38158 \text{ грн,}$$

$$BZ = (38158 + 25090) \cdot \frac{2}{100} = 1265 \text{ грн.}$$

На підставі вищезазначених розрахунків складається калькуляція собівартості та ціни трансформатора. Калькуляція наведена в таблиці 7.5.



Таблиця 7.5 – Калькуляція собівартості і ціни трансформатора

Статті витрат	Сума, грн
1. Сировина і основні матеріали	7497,32
2. Купівельні комплектуючі вироби	2018,8
3. Основна заробітна плата основних виробничих робітників	5018
4. Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	2007,2
5. Відрахування до єдиного соціального внеску	1545,5
6. Загальновиробничі витрати	20072
7. Собівартість виробнича	38158
8. Адміністративні витрати	25090
9. Витрати на збут	1265
10 Собівартість повна	64513
11. Прибуток	11447
12. Ціна оптова	49605
13.ПДВ (20%)	8018
Ціна продажу	69069

#### 7.4 Розрахунок експлуатаційних витрат

До експлуатаційних витрат відносять поточні річні витрати і супутні капітальні витрати [8].

Далі розраховуються витрати у споживача при використанні трансформатора.

Супутні капітальні витрати враховують витрати на капітальний ремонт, установку і монтаж, виробничу площу трансформатора, додаткове оснащення.

Плановий капітальний ремонт трансформатора відбувається на дванадцятий рік експлуатації, отже, витрати на капітальний ремонт визначаються за формулою:

$$K_p = \frac{0,2 \cdot Ц}{(1 + 0,1)^{12}}, \quad (7.9)$$

$$K_p = \frac{0,2 \cdot 28548,73}{(1 + 0,1)^{12}} = 1819,3 \text{ грн.}$$

Витрати на установку і монтаж трансформатора приблизно однакові і складають разом 10%, а витрати на транспортування складають 15% від вартості трансформатора.

Витрати на утримання виробничої площі визначаються за такою формулою:

$$P_{пл} = S \cdot Ц_{пл} \cdot K_{пл}, \quad (7.10)$$

де  $S$  – площа, яку займає трансформатор;

$Ц_{пл}$  – ціна за 1 м<sup>2</sup> виробничої площі;

$K_{пл}$  – коефіцієнт, який враховує додаткову площу, вибирається рівним 1,15.

$$З_{пл} = 1,5 \cdot 1000 \cdot 1,15 = 1725 \text{ грн}$$

Результати розрахунків капітальних витрат на експлуатацію трансформатора занесені в таблицю 7.6.

Таблиця 7.6 – Капітальні витрати

Склад супутніх капітальних витрат	Капіталовкладення, грн
Транспортування	3263,67
Встановлення і монтаж	2175,78
Виробнича площа	1725
Капітальний ремонт за термін експлуатації	1819,3
Всього	8983,75

У складі річних експлуатаційних витрат враховуються витрати:

- на компенсацію втрат в режимі КЗ;
- на компенсацію втрат в номінальному режимі;
- на обслуговування і поточний ремонт.

Поточний ремонт складає 5 % від собівартості трансформатора.

Розрахунок поточних річних витрат у споживача приведений в таблиці 7.7.

Витрати, які пов'язані з експлуатацією виробу, враховуючи амортизаційні відрахування від супутніх капітальних вкладень, визначаються в розмірі 15% від їх вартості.

Таблиця 7.7 – Склад поточних річних витрат у споживача при застосуванні одиниці виробу

Склад поточних річних витрат	Одиниця виміру	Значення
Вартість електроенергії для компенсації втрат в трансформаторі:		
Втрати в номінальному режимі	кВт	20
Витрати на компенсацію втрат в номінальному режимі	грн	48
Втрати при КЗ	кВт	120
Витрати на компенсацію втрат в режимі КЗ	грн	288
Середньорічні витрати на обслуговування трансформатора	грн	2088
Інші витрати, які пов'язані з експлуатацією трансформатора, включаючи амортизаційні відрахування від супутніх капітальних вкладень	грн	3263,67
Всього	грн	5687,67

### 7.5 Розрахунок економії

Економічна ефективність являє собою економію виробничих ресурсів. Виробництво вдосконалених масляних трансформаторів напруги дозволяє знизити виробничі і експлуатаційні витрати. Виробничі витрати знижуються за рахунок зменшення маси дроти.

Економія витрат на обмотувальний дріт визначається з умови:

$$\mathcal{E}_{np} = C_{np.c} - C_{np.m}, \quad (7.11)$$

де  $C_{np.c}$  – вартість обмотувального дроту сухого трансформатора, грн;

$C_{np.m}$  – вартість обмотувального дроту масляного трансформатора, грн.

$$\mathcal{E}_{np} = 685 - 399,5 = 285,5 \text{ грн}$$

Застосування маслонаполненого трансформатора на напругу 500 кВ і більше дозволяє знизити додаткові капітальні витрати на будівництво. Економія капітальних витрат при використанні масляного трансформатора визначається з умови:

$$\mathcal{E}_{K.B} = P_{пл.с} - P_{пл.м}, \quad (7.12)$$

де  $P_{пл.с}$  і  $P_{пл.м}$  – відповідно витрати на виробничу площу сухого, масляного трансформатора.

$$\mathcal{E}_{K.B} = 9000 - 1725 = 7275 \text{ грн}$$

Економія поточних витрат за рахунок зменшення витрат на компенсацію витрат у номінальному режимі і режимі КЗ.

$$\mathcal{E}_{Т.В.} = \mathcal{Z}_{н.с} - \mathcal{Z}_{н.м}, \quad (7.13)$$

де  $\mathcal{Z}_{н.с}$ ,  $\mathcal{Z}_{н.м}$  – відповідно витрати на покриття втрат в іншому і масляному трансформаторі.

$$\mathcal{E}_{Т.В.} = 36 - 4 + 106 - 24 = 114 \text{ грн}$$

Таким чином, економія виробничих ресурсів від виробництва і використання проєктованого масляного трансформатора становить:

- економія матеріалів – 285,5 грн;
- економія капітальних вкладень – 7275 грн;
- економія поточних витрат – 114 грн.

## 7.6 Розрахунок беззбитковості виробництва

Беззбитковість виробництва вироби характеризується критичним обсягом виробництва, при якому підприємство не отримує прибутку. При перевищенні критичного обсягу виробництво підприємство починає отримувати прибуток. Критичний обсяг виробництва розраховується за формулою:

$$N_{кр} = \frac{S_{пост.N}}{Ц_i - S_{пер.i}}, \quad (7.14)$$

де  $S_{пост.N}$  – постійні витрати на обсяг виробництва, грн.;

$C_i$  – ціна одиниці виробу, грн.;

$S_{пер.i}$  – змінні витрати на одиницю продукції, грн.

Постійні витрати на обсяг виробництва розраховуються за формулою:

$$S_{пост.N} = (3BB + AB + B3) \cdot N, \quad (7.15)$$

де  $N$  – кількість виготовлених трансформаторів, шт.

$$S_{пост.N} = (20072 + 25090 + 1265) \cdot 400 = 18570800 \text{ грн}$$

Змінні витрати на одиницю продукції визначаються за формулою:

$$S_{пер.i} = M + K + Z_o + Z_p + B_{с.м.}, \quad (7.16)$$

$$S_{пер.i} = 7497,32 + 2018,8 + 2007,2 + 5018 + 1545,5 = 18086 \text{ грн.}$$

Змінні витрати на обсяг продукції визначаються з умови:

$$S_{пер.N} = S_{пер.i} \cdot N, \quad (7.17)$$

$$S_{пер.N} = 18086 \cdot 400 = 7234528 \text{ грн.}$$

Обсяг продукції визначається за формулою:

$$Q_{np} = C_i \cdot N, \quad (7.18)$$

$$Q_{np} = 48202 \cdot 400 = 19280800 \text{ грн,}$$

$$N_{кр} = \frac{18570800}{49605 - 18086} = 256,67$$

Для подальших розрахунків приймається 257 одиниць.

Графік беззбитковості виробництва трансформаторів напруги показаний на рисунку 7.1.

У міру збільшення виробництва, частина постійних витрат в їх загальній кількості зменшуються. Зменшуються втрати і після досягнення, виробництво продукції стає рентабельним – заштрихована область 2 (див. рисунок 7.1). З розрахунку видно, що в результаті наявності постійних витрат, виробництво продукції до певного обсягу виробництва є збитковим. При збільшенні виробництва, частина постійних витрат в їх загальній кількості зменшується.

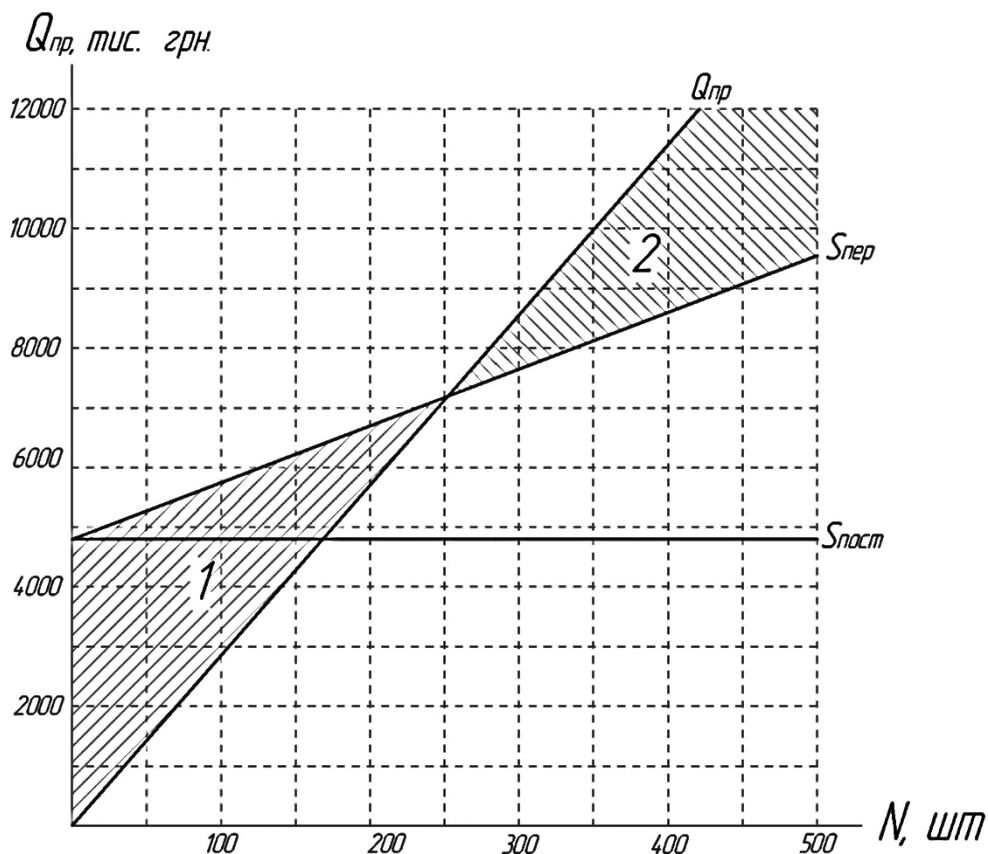


Рисунок 7.1 – Графік беззбитковості виробництва трансформаторів напруги серії НКФ – 525

З графіка видно, що через наявність постійних витрат виробництво продукції до певного обсягу  $N_{кр}$  є збитковим – заштрихована область 1.

## 8 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оскільки тема магістерської роботи – «Дослідження впливу електричного навантаження на показники експлуатаційної надійності трансформатора напруги 525 кВ», передбачає проведення досліджень та розрахунків у приміщенні дослідницького центру обладнаному персональними комп'ютерами (далі – ПК) з екранними пристроями (далі – ЕП), тому нижче розглянемо заходи по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії і гігієни праці для робочих місць приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП, а також заходи з пожежної безпеки та цивільного захисту, у відповідності з методичними вказівками [10].

### 8.1 Аналіз потенційних небезпек

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

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і технологічних процесів у приміщенні дослідного центру обладнаному ПК з ЕП, згідно ГОСТ 12.0.003–74\* «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [12], виявлені наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, здатні привести до травм або ушкодження здоров'я працівників:

- можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки або помилкових дій персоналу, що може призвести до електротравм різного ступеню важкості або навіть до летального наслідку;

- механічне травмування в наслідок не раціонального розташування, устрою та обладнання робочих місць, тобто з порушенням ергономічних вимог до компонування робочого місця та до робочої пози;



– порушення основних вимог до ергономічних характеристик моніторів може негативно позначитися на здоров'ї осіб, що працюють з комп'ютерами;

– незадовільні технічні характеристики моніторів, або неправильне його встановлення, можуть негативно вплинути на зір та на здоров'я загалом;

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

– утворення озону, утворюється внаслідок впливу електричних зарядів, які виникають у лазерних принтерах, на кисень повітря, що сильно подразнює слизисту оболонку носа, очей і горла та може призвести до ракових захворювань як канцерогенна речовина;

– відсутність або недолік природнього світла, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла, знижена контрастність, пряма й відбита блискотість та підвищена пульсація світлового потоку у наслідок помилок у розрахунках освітленості, неправильної або нераціональної організації освітлення приміщення та робочих місць, а також недотримання вимог до специфіки світлотехнічного обладнання комп'ютеризованих робочих місць може призвести до помилок, зниженню працездатності, а також може бути причиною порушення зору осіб, що працюють з комп'ютерами;

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

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

– підвищений рівень вібрації при неправильному або нераціональному розміщенні робочих місць і обладнання, негативно впливає на нервову, опорно-рухову та серцево-судинну системи й особливо – мікроциркуляторне русло серцево-судинної системи (дрібні судини, у яких іде безпосередня віддача кров'ю кисню й утилізація із тканин вуглекислого газу), що при тривалому впливі, може бути причиною виникнення або загострення професійної хвороби пов'язаної з впливом вібрації – «вібраційної хвороби»;

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

– коротке замикання у електричному колі, може привести до виникнення пожежі, а це може бути причиною термічних опіків осіб, що працюють в лабораторії.

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

## 8.2 Заходи з охорони праці

Приміщення, у якому здійснюються дослідження та розрахунки впливу електричного навантаження на показники експлуатаційної надійності трансформатора напруги 525 кВ, є спеціалізованим приміщенням дослідницького центру яке обладнане ПК з ЕП.

Приміщення обладнане відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами

електронно–обчислювальних машин» [21], «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ») [17], ДСТУ Б В.2.5–82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом» [14], НПАОП 40.1–1.32–01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [15], НАПБ А.01.001–2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [30]

Обладнання та пристрої, що розташовані в приміщенні будуть експлуатуватися згідно вимог НПАОП 40.1–1.01–97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ») [16], НПАОП 40.1–1.21–98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») [17] та НПАОП 0.00–7.15–18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [20].

У приміщенні обладнане сім комп'ютеризованих робочих місць, до складу яких входять сім рідкокристалічних моніторів LG 27UK650–W, офісні меблі та стенди. Розміри приміщення: 8×6×3,2 м., тобто його площа – 48 м<sup>2</sup>, а об'єм – 153,6 м<sup>3</sup>, покриття підлоги – паркет. Живлення електрообладнання приміщення здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц.

Згідно «ПУЕ» [13], за ступенем небезпеки ураження електрострумом, приміщення належить до 1–го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ» [13], обладнання приміщення має основну та подвійну ізоляцію, яка складається з основної та додаткової ізоляції.

Відповідно до п. 6.7.1 НПАОП 40.1–1.21–98 «ПБЕЕС» [17] ПК з ЕП, периферійні пристрої ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК по способу захисту людини від ураження електричним струмом, належать до I класу, оскільки мають основну і подвійну ізоляцію, елемент для заземлення та провід для приєднання до джерела живлення, що має заземлюючу жилу і вилку з заземлюючим контактом.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1–1.21–98 «ПБЕЕС» [17] усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні, яке може опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Згідно «ПУЕ» [13] електрообладнання приміщення обладнаного ПК з ЕП характеризується як електроустановки до 1 кВ, тому для забезпечення безпеки персоналу відповідно до вимог п. 1.7 «ПУЕ» [13] все електрообладнання заземлене. Величина опору контуру захисного заземлення, у будь-яку пору року, не перевищує – 4 Ом.

Оскільки приміщення за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому згідно вимог пункту 6.7.6 НПАОП 40.1–1.21–98 «ПБЕЕС» [17] та додатку №1 до НПАОП 40.1–1.01–97 «ПБЕЕ» [16] користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають I групу з електробезпеки.

Персонал, зі складу оперативних або оперативно–виробничих працівників, що одноосібно обслуговує електромережі та електрообладнання у приміщенні дослідницького центру, згідно вимог пунктів 5.1.1, 5.1.2 и 6.1.7 НПАОП 40.1–1.01–97 «ПБЕЕ» [16] та пунктів 2.2.3 і 3.2.6 НПАОП 40.1–1.21–98 «ПБЕЕС» [17] має III групу з електробезпеки.

Відповідно до розділу 3.1 «ПУЕ» [13] усі електричні мережі та електроустаткування приміщення з ПК захищено від струмів короткого замикання та струмів перевантаження, а також перенапруги на ділянках цепі. В якості апаратів захисту застосовано автоматичні вимикачі. Які мають у своєму складі електромагнітний (для захисту від струмів короткого замикання) та тепловий (для захисту від перевантаження за струмом) роз'єднувачі, струми уставок яких (так як і запобіжників) обрані найменшими за розрахованими струмами для забезпечення вимог швидкодії, чутливості та селективності захисту.

Згідно вимог розділу «Мінімальні вимоги з охорони праці», директиви ЄС 90/270/ЄЕС [19] та НПАОП 0.00–7.15–18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [20] виконано такі п'ять

основних вимог до моніторів, які жорстко регламентують безпечні умови роботи і захист здоров'я осіб, що працюють з комп'ютерами:

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

Також врахований такий важливий чинник загальної ергономіки монітора, як можливість його регулювання. Тому у приміщенні встановлені сучасні монітори які дозволяють працювати з різними відео адаптерами і в різних режимах.

Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці для приміщення дослідного центру обладнаного ПК з ЕП розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [18], ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21] і НПАОП 0.00–7.15–18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [20].

Метеорологічні умови у приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042–99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [22] і ГОСТ 12.1.005–88 «ССБТ. Общие санитарно–гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [23]. Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21–23°C; відносна вологість: 40–60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;
- у теплий період року: температура 22–24°C; відносна вологість: 40–60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5–67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [24], з метою забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні обладнаному ПК з ЕП передбачена система централізованого водяного опалення з радіаторами, а на теплий період, зважаючи на те, що площа приміщення становить 48 м<sup>2</sup> передбачений побутовий кондиціонер типу Electrolux EACS/I–18HVI/N3. Виходячи з того, що один кондиціонер розрахований на приміщення площею – 50 м<sup>2</sup>.

З метою забезпечення необхідного повітрообміну у приміщенні обладнаному ПК з ЕП, зважаючи на те, що об'єм приміщення становить 153,6 м<sup>3</sup>, передбачена система механічної припливно–витяжної вентиляції – методом рекуперації, за допомогою рекуператора типу Prana–340A. Який забезпечує 3–кратний обмін повітря за годину, виходячи з того, що один забезпечує наступний повітрообмін: приплив – 540 м<sup>3</sup>/год, витяг – 520 м<sup>3</sup>/год.

Оптимальні рівні позитивних (n+) і негативних (n–) іонів у повітрі приміщення з ЕП відповідають вимогам додатку 3 ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» і становить: n+ = 1500–30000 (шт. на 1 см<sup>3</sup>); n– = 3000–5000 (шт. на 1 см<sup>3</sup>). Підтримку оптимального рівня легких позитивних і негативних аероіонів у повітрі на робочих місцях забезпечують за допомогою біполярних коронних аероіонізаторів.

У приміщенні з ПК згідно вимог ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21] та ДБН В.2.5–28–2018 «Природне і штучне освітлення» [25] передбачено природне і штучне освітлення.

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

Штучне освітлення в приміщенні, забезпечено системою загального рівномірного освітлення. Значення освітленості на поверхнях столів в зоні розміщення документів становить 300–500 лк. Як джерела штучного освітлення використовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ. Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від  $50^\circ$  до  $90^\circ$  з вертикаллю в повздовжній і поперечній площинах і складає не більше 200 кд/м<sup>2</sup>, захисний кут світильників – не менше  $40^\circ$ . Показник осліпленості для джерел загального штучного освітлення в приміщенні не перевищує 20, а показник дискомфорту, відповідно 40.

У приміщенні обмежена можливість прямих і відбитих відблисків від джерел природного та штучного освітлення на робочих поверхнях (екран, стіл, клавіатура). Яскравість світлових поверхонь (вікон, джерел штучного освітлення), розташованих в полі зору, не перевищує 200 кд/м<sup>2</sup>. Яскравість відблисків на дисплеях не перевищує 40 кд/м<sup>2</sup>, а яскравість стелі при застосуванні системи відбитого освітлення не перевищує 200 кд/м<sup>2</sup>.

Захистом від прямих відблисків є зниження яскравості видимої частини джерел світла шляхом застосування спеціальних розсіювачів, відбивачів та інших світлозахисних пристроїв, а також правильне розміщення робочих місць відносно джерел світла; від відображених відблисків – правильне розміщення предметів, використання матових поверхонь предметів в приміщенні.

Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приміщення відповідають вимогам ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21] і ДСН 3.3.6.037–99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [22]. Зниження рівня шуму в приміщенні з ПК здійснюється за рахунок:

- використання блоків живлення ПК з вентиляторами на гумових підвісках;
- використання ПК, в яких термодавачі вмонтовані в блоці живлення і в критичних точках материнської плати, які дозволяють програмним шляхом регулювати моменти включення і швидкість обертання вентиляторів;

- використання ПК, в яких вентилятор на процесорі встановлений виробником (ВОХ–процесор);
- CD–DVD пристрої взагалі не використовуються;
- розташування принтерів та БФП колективного користування на значній відстані від більшості робочих місць користувачів ПК.
- встановлено спеціальні облицювання що поглинають звук;
- використовуються SSD накопичувачі.

Під час виконання робіт з ПК, значення характеристик вібрації на робочих місцях не перевищують допустимого рівню, які відповідають вимогам ДСН 3.3.6.039–99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації» [22]. Персонал не має потреби в додатковому захисті від вібрації, яку виробляють ПК. Оскільки ПК встановлені на спеціальній комп'ютерних столах, які поглинають залишкову вібрацію.

У приміщенні з ПК в якості екранних пристроїв встановлені рідкокристалічні монітори, які не є джерелами шкідливого рентгенівського та електромагнітного випромінювання. Рівень їх випромінювань цілком відповідає вимогам НПАОП 0.00–7.15–18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [20] і ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21], тому спеціальні заходи для захисту персоналу не передбачені.

Розташування робочих місць з ПК у приміщенні виконано згідно вимог ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21]. Розміри приміщення: 8×6×3,2 м., тобто його площа – 48 м<sup>2</sup>, а об'єм – 153,6 м<sup>3</sup>, з урахуванням розміщення в ньому семи комп'ютеризованих робочих місць, відповідають нормативним вимогам. Оскільки на одне комп'ютеризоване робоче місце доводиться більше 6 м<sup>2</sup> площі й 20 м<sup>3</sup> об'єму приміщення. Покриття підлоги є матовим з коефіцієнтом відбиття 0,3–0,5. Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з анти-



статичними властивостями. Для внутрішнього оздоблення приміщень з ПК використані дифузне–відбивні матеріали з коефіцієнтами відбиття для стелі 0,7–0,8; для стін 0,5–0,6.

Обладнання та організація всіх елементів робочих місць приміщення з ПК забезпечена з урахуванням їх взаємного розташування, ергономічних вимог, характером і особливостями трудової діяльності, відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21].

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК були враховані: робоча поза користувача; простір для розміщення користувача; можливість огляду елементів робочого місця; можливість ведення записів, розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

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

Вимоги до режимів праці та відпочинку користувачів ПК визначаються роботою, що виконується користувачем у відповідності до вимог ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно–обчислювальних машин» [21] та ДК 003:2010 «Класифікатор професій» [29].

Робота виконується у вільному темпі і пов'язана з періодичним пошуком помилок в умовах дефіциту часу, характеризується інтенсивною розумовою творчою працею з підвищеним напруженням зору, концентрацією уваги, нервово–

емоційною напругою, статичною робочою позою, періодичним навантаженням на кисті верхніх кінцівок. Тому встановлені внутрішньозмінні режими праці та відпочинку при 8–годинній денній робочій зміні та передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні 2 години. Для зниження нервово–емоційного напруження, втоми зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі деякі перерви використовуються для виконання комплексу вправ.

Передбачений для приміщення дослідницького центру обладнаного персональними комп'ютерами з екранними пристроями комплекс заходів по забезпеченню безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці забезпечує безпечні та комфортні умови праці персоналу.

### 8.3 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Комплекс протипожежних заходів для приміщення дослідницького центру обладнаного ПК з ЕП, розроблений відповідно до вимог НАПБ А.01.001–2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [30].

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

– згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» [31] у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП можлива пожежа класів – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

– відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1–36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [32], воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення дослідницького центру яке обладнане ПК з ЕП належить до виробництва категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до ДБН В.1.1–7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [33] воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1–7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» [33] передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02–85\* «Производственные здания» , відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Обладнання, силові та освітленні мережі приміщення дослідницького центру обладнаного ПК з ЕП відповідають вимогам пожежної безпеки, оскільки виконані відповідно до вимог НПАОП 40.1–1.32–01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» [15], та мають мінімальний ступінь захисту оболонки (ізоляції) обладнання IP44 який відповідає класу пожежонебезпечної зони П–Па до якої належить приміщення.

Згідно вимог пункту 3.1.8 «ПУЕ» [13] електричні мережі у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП мають захист від струмів короткого замикання, який забезпечує найменший час відключення та вимоги селективності.

Згідно ДБН В.2.5–56:2014 «Системи протипожежного захисту» [33], у приміщенні дослідницького центру обладнаному ПК з ЕП встановлена система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал–ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Оскільки приміщення дослідницького центру що обладнане ПК з ЕП має площу 48 м<sup>2</sup>, тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників» , для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК–3,5 у кількості 3 штук (з розрахунку

один вогнегасник с величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м<sup>2</sup> площі приміщення). Додатково, на кожному поверсі будівлі, в якій розміщене приміщення обладнане ПК з ЕП, передбачене два переносних порошкових вогнегасника – ВП–5. Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

При виникненні надзвичайної ситуації керівник промислового об'єкта повинен передбачити особливості управління в період надзвичайної ситуації (далі – НС). Для забезпечення безпеки людини у НС стратегія управління повинна включати здійснення 3–х цілей:

- запобігання причин виникнення;
- запобігання самих екстремальних ситуацій;
- пом'якшення, максимальне ослаблення наслідків НС.

Стратегія запобігання причин виникнення НС передбачає недопущення таких дій чи процесів, які несуть загрозу населенню. Дана стратегія здійснюється або відмовою від будівництва небезпечних об'єктів, або знищенням чи перепрофілюванням виробництв – джерел підвищеної небезпеки.

Друга стратегія – запобігання самої НС – передбачає недопущення виходу небезпечного процесу з–під контролю шляхом використання надійних аварійних систем, сигналізації, автоматики й інших заходів з підвищення надійності і стійкості роботи підприємств, а також шляхом заходів превентивної евакуації тощо.

Третя стратегія – пом'якшення наслідків – передбачає орієнтацію на ослаблення, локалізацію наслідків НС. Ця стратегія має пріоритет у керуванні стихійними лихами і ситуаціями «комбінованого» типу.

У практиці управління найбільший ефект дає спільне використання всіх трьох стратегій, особливо при промислових аваріях. У НС, викликаних стихійними лихами, пріоритет надається другій і третій стратегіям. Для реалізації кожної зі стратегій управління необхідно розробляти і приймати комплекс превентивних та оперативних заходів.

Превентивні: аналіз і встановлення зовнішніх та внутрішніх причин, які ведуть до катастрофи; прогнозування осередків ураження, втрат і збитків на

підприємстві; заходи з підвищення стійкості; обґрунтування сил і засобів для проведення дій з локалізації вогнищ поразки і пошуково–рятувальних робіт;

- навчання формувань і громадян способам захисту; підготовка надійного пункту управління.

Оперативні: оповіщення про НС; проведення всіх видів розвідки й оцінка обстановки; проведення екстрених захисних заходів (укриття в захисних спорудах цивільного захисту, евакуація, використання засобів індивідуального захисту); використання сил постійної готовності для локалізації катастрофи; надання першої медичної і першої долікарської допомоги; нарощування сил і засобів у вогнищі ураження за рахунок залучення формувань підвищеної готовності; термінове постачання потерпілих продовольством та іншими життєво необхідними засобами; введення аварійно–відбудовних робіт.

При виникненні НС організується надзвичайне управління, яке складається з чотирьох стадій ліквідації наслідків.

Перша стадія вжиття екстрених заходів. Мета – задіяти механізм надзвичайного управління і вчасно зреагувати на НС.

Основні завдання початкової стадії:

- встановлення факту НС, попередня оцінка обстановки в зоні лиха і масштабів наслідків, мобілізація і встановлення оперативних завдань органам надзвичайного управління, віддача розпоряджень на залучення мобільних сил пожежної охорони, швидкої медичної допомоги, охорони суспільного порядку й інших служб для допомоги потерпілим, сприяння місцевим органам влади в організації рятувальних робіт і локалізації зони нещастя власними силами;

- інформування населення та вищестоящих органів управління про НС і вжиті заходи.

Тривалість початкової стадії 1–10 годин.

Друга стадія оволодіння ситуацією й організації механізму надзвичайного управління в зоні лиха, у плануванні і проведенні рятувальної операції відповідного масштабу.

Завдання:

- детально оцінити обстановку, терміново прийняти обґрунтоване рішення й уточнити план ліквідації наслідків НС;

- розрахувати необхідні сили і засоби, ресурси для всього комплексу робіт у зоні лиха, організувати чітку взаємодію всіх залучених сил і аварійних служб.

Тривалість другої стадії – від кількох годин до кількох діб.

Третя основна і визначальна стадія. Мета – перебороти надзвичайний характер ситуації: відновити безпеку населення в зоні лиха, ліквідувати загрозу життю і здоров'ю всім потерпілим, створити мінімально необхідні умови для життєдіяльності населення, що залишилося.

Завдання:

- розгортання в найкоротший термін рятувальних робіт на всіх потерпілих об'єктах зони лиха, надання допомоги потерпілим для захисту їхнього життя, здоров'я і підтримка життєздатності в екстремальних умовах; евакуація потерпілих із зони нещастя та їх життєзабезпечення;

- термінове проведення аварійно–відбудовних робіт на системах водо–, тепло–, газо–, електричних системах і зв'язку в зоні лиха.

Тривалість кілька діб – кілька тижнів.

Четверта стадія відновлення, тобто економічна, соціальна, культурна й екологічна реабілітація зони лиха. Органи надзвичайного управління вичерпали свою роль і передають функції постійної дії місцевим органам управління. Розробляється спеціальна програма з черговістю комплексу заходів для реабілітації зони нещастя.

Місткість захисної споруди ЦЗ об'єкту визначають відповідно до норм об'ємно–планувальних рішень. Для чого, по кількості місць оцінюють можливість укриття найбільшої працюючої зміни.

Вихідні дані:

1. На об'єкті одне сховище, у якому:

- приміщення для укриваємих має площу  $S_1 = 1000 \text{ м}^2$ ;

- тамбур –  $S_2 = 80 \text{ м}^2$ ;

- місце для санітарного поста –  $S_3 = 20 \text{ м}^2$ ;

- фільтровентиляційна камера та санвузол –  $S_4 = 86 \text{ м}^2$ .

2. Висота приміщень  $h = 2,5$  м.

3. Чисельність найбільшої працюючої зміни об'єкта  $N_{\max} = 1820$  осіб.

Розрахунок місткості захисної споруди ЦЗ об'єкту:

1. Визначаємо кількість місць для розміщення укритих.

З урахуванням того, що висота приміщень сховища ( $h = 2,5$  м.) дозволяє установити двохярусні нари, приймаємо в якості розрахункової норми площі на одного укритого  $S_0 = 0,5$  м<sup>2</sup>/люд.

Тоді розрахункову кількість місць у сховищі ( $M$ ) визначаємо за формулою:

$$M = \frac{S_{\Sigma}}{S_0} = \frac{1000 + 20 + 86}{0,5} = 2212 \text{ місць}$$

Знайдене число визначає місткість сховища без урахування встановленого об'єму приміщень на одного укритого ( $V_0$ ).

Перевіряють відповідність об'єму приміщень у зоні герметизації на одного укритого, згідно з установленою нормою (не менше 1,5 м<sup>3</sup> на одного укритого):

$$V_1 = \frac{V_{\Sigma}}{M} = \frac{S_{\Sigma} \cdot h}{M} = \frac{(1000 + 20 + 86) \cdot 2,5}{2212} = 1,25 \text{ м}^3 / \text{люд},$$

де  $h$  – висота приміщень, м;

$S_{\Sigma}$  – загальна площа всіх приміщень у зоні герметизації (крім приміщень захищених дизельних електростанцій, тамбурів та шлюзів).

Таким чином місткість сховища не відповідає розрахунковій загальній кількості місць.

Тому, уточнюємо його розрахункову місткість (Муточ), й приймаємо її за фактичну:

$$M_{\text{уточ}} = \frac{V_{\Sigma}}{V_0} = \frac{(1000 + 20 + 86) \cdot 2,5}{1,5} = 1843 \text{ місць}$$

Тобто, з урахуванням  $V_0$ , розрахункова місткість сховища становить 1843 особи.

2. Визначаємо необхідну кількість нар для розміщення укриваємих у сховищі. Висота приміщень ( $h = 2,5$  м) дозволяє установити двохярусні нари. При довжині нар 180 см (20% від загального числа укриваємих, тобто на 5 укриваємих одні нари) необхідно установити:

$$H = \frac{M_{\text{уточ}}}{5} = \frac{1843}{5} = 369 \text{ нар}$$

3. Визначаємо показник, що характеризує захисні споруди за місткістю, тобто можливість укриття найбільшої працюючої зміни:

$$K_{\text{вм}} = \frac{M_{\text{уточ}} \cdot 100}{N} = \frac{1843 \cdot 100}{1820} = 101 \%$$



## ВИСНОВКИ

В якості базового об'єкта для досліджень обраний трансформатор каскадної конструкції з масляною ізоляцією. У ньому використовується ступінчаста ізоляція з екрануванням і захист країв кільцевими електродами складного профілю, що здійснює більш рівномірний розподіл електричного поля.

Зовнішня ізоляція складається з високоякісної кераміки, з окисом алюмінію, коричневого кольору, відповідно до стандарту RAL 8016, керамічний матеріал З 120, відповідно до стандарту МЕК 672. Використовується тільки кільцеве ущільнення без стиків в добре оброблених пазах.

Проведено комплекс досліджень, пов'язаних з підготовкою вихідних даних і на їх основі оцінки впливу параметрів електричного навантаження на показники надійності опорно–ізоляційної конструкції трансформатора напруги. Виконано розрахунок основних показників надійності проектного трансформатора на підставі статистичних даних про відмови в процесі експлуатації.

Відповідно до розрахунків економічної ефективності виробництва вимірювального трансформатора, критичний обсяг випуску даного продукту становить – 257 одиниць.

У розділі охорони праці розглянуті умови праці на робочому місці, робота машин, механізмів, устаткування, електроустановки та інших засобів колективного та індивідуального захисту, санітарно–побутові умови. Всі вони відповідають вимогам нормативних актів з охорони праці та забезпечують нормальні умови роботи.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

- 1 Демків А.М. Трансформатори напруги – М.: Енергія, 1975. – 204 с.
- 2 Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции [Текст]. /В.С.Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
3. Довідник по електричним апаратам високої напруги /Под ред. В.В.Афанасьева. – Л .: Вища школа, 1987. – 544 с.
4. Проектування електричних апаратів /Под ред. Г.Н. Александрова. – М .: Вища школа, 1985. – 447 с.
- 5 Тріфонюк В.В. Надійність пристроїв промислової електроніки. – К .: Либідь, 1993. – 64 с.
6. Гук Ю.Б. Теорія надійності в електроенергетики. – Л .: Вища школа, 1990. – 208 с.
7. Сахаров П.В., Селянин В.І. Технологія і обладнання виробництва електричних апаратів. – М .: Енергія, 1972. – 464с.
8. Економіка підприємства. Підручник / За ред. С.Ф. Покропивного. Випуск другої, – К .: КНЕУ, 2001 – 528 с.
9. Правила безпечної ЕКСПЛУАТАЦІЇ електроустановок споживачів. – Київ: Основа, 1998. – 381с.
10. . Журавель М. О. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) : зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами (спеціалізаціями) – «Електротехнічні системи електроспоживання», «Електричні машини і апарати», «Електромеханічні (електротехнічні) системи та комплекси», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні та електронні апарати», «Електромеханічне обладнання електроємних виробництв» : Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. 35 с.

11. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-617-07-0134-3
12. ГОСТ 12.0.003-74\* Система стандартів безпеки праці. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Введ. 1976-01-01]. М. : Госстандарт СССР, 1974. 4 с. (Межгосударственный стандарт)
13. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Державний Стандарт України)
15. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устроювання електроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. – К. : Мінпраці України, 2001. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01/card2#Card>.
16. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. К. : Держнагляд охорони праці, 1997. 97 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)
17. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. К. : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Нормативно-правовий акт охорони праці)
18. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [На заміну ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 ; чинний від 2014-05-30]. К. : МОЗ України, 2014. 37 с. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14>. (Державні санітарні норми та правила)

19. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990–05–29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. Режим доступу: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>. (Директива)

20. НПАОП 0.00–7.15–18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00–1.28–10 ; чинний від 2018–05–18]. К. : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508–18>. (Нормативно–правовий акт охорони праці)

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

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

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

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

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

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

27. ДСН 3.3.6.039–99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. [Чинний від 1999–12–01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>. (Державні санітарні норми)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

37. Шоботов В. М. Цивільна оборона : навчальний посібник вид. 2–ге, перероб. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 438 с.

38. Журавель М. О., Курков О. Б. Дослідження захисних споруд цивільного захисту за місткістю : методичні вказівки до лабораторного заняття з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі» : для студентів усіх спеціальностей та форми навчання : Запоріжжя : Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. 18 с.

39. Оцінка надійності електричних апаратів з використання ПК. Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування / Укл. О.І.Афанасьєв. – Запоріжжя, ЗНТУ, 2016. – 25 с.

40. Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування для студентів спеціальності 8.092206.02 Електричні апарати всіх форм навчання / Укл. : О.І. Афанасьєв. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016 – 22с.

41. Теорія надійності радіоелектронних систем в прикладах і задачах / Под ред. Г.В. Дружиніна. – М. : Енергія, 1976. – 448 с.

42. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения.–Л.: Вища школа, 1984.–208 с.

43. Можливості компенсації напруженості електричного поля зовнішньої ізоляції високовольтних газонаповнених трансформаторів струму [Текст] / Л.Б. Жорняк, А.І. Афанасьєв, Р.С. Леонов, А.В. Карпук // Вісник національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин и апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – №34 (+1256). – С. 14–18. Бібліогр.: 25 назв. – ISSN 2079–39

44. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Учебное пособие для вузов. Изд. 4–е, перераб. и доп. – М. :Энергия, 1976.– 544 с .

45. Элегазовое высоковольтное оборудование. И.Е.Глоба – Киев 1993. 148с.

46. Gas – Insulated Voltage Transformers Type SU for Gas – Insulated Switchgear.  
Проект фирмы «Messwandler–Bau».

