

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кутін, О. О. Шпачук

**ЗАХИСТ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ
НА ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА,
ЩО ПРАЦЮЄ В БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2019

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/368>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.316.925

K95

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 22.02.2018 р.)

Рецензенти:

О. М. Сінчук, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Кутін, В. М.

Захист від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором : монографія / В. М. Кутін, О. О. Шпачук. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 184 с.

ISBN 978-966-641-748-3

В монографії розглянуто основні фактори та процеси, що впливають на зміну технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі в процесі його експлуатації. Виконано аналіз існуючих засобів захисту синхронних генераторів від однофазних замикань на землю. Запропоновано метод та пристрій захисту від однофазних замикань на землю в обмотці статора, що реагує на величину струму в місці замикання. Книга розрахована на фахівців, що займаються проектуванням і експлуатацією систем релейного захисту. Може використовуватися студентами і аспірантами, які спеціалізуються на вдосконаленні засобів релейного захисту синхронних генераторів.

УДК 621.316.925

ISBN 978-966-641-748-3

© В. Кутін, О. Шпачук, 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ І ЗАСОБІВ ЇХ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ	8
1.1 Особливості конструкції синхронних генераторів	8
1.2 Анормальні режими роботи та пошкодження синхронних генераторів.....	19
1.3 Аналіз існуючих засобів захисту синхронних генераторів від однофазних замикань на землю обмотки статора.....	24
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ	32
2.1 Дослідження струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.....	32
2.2 Вибір сукупності контрольованих параметрів і параметрів спрацювання захисту.....	36
2.3 Моделювання процесу однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора	42
2.4 Загальна характеристика запропонованого методу захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором	45
2.5 Функціональна схема пристрою захисту	50
РОЗДІЛ 3 АПАРАТНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ	53
3.1 Розробка алгоритму функціонування пристрою захисту.....	53
3.2 Розробка принципової схеми пристрою захисту.....	59
3.3 Розробка програмної частини захисту.....	64

3.4 Моделювання нормальних і аварійних режимів роботи пристрою захисту.....	66
РОЗДІЛ 4 ВИПРОБУВАННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ	77
4.1 Розробка макетного зразка пристрою захисту.....	77
4.2 Визначення властивостей захисту	79
4.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки	104
4.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	108
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	114
Додаток А Коефіцієнти для спрощення запису виразів струму однофазного замикання на землю	126
Додаток Б Вхідні дані та графіки перехідних процесів однофазного замикання на землю для різних типів синхронних генераторів.....	128
Додаток В Поверхні відгуку для діючого значення струму однофазного замикання на землю	146
Додаток Д Текст програми роботи мікроконтролера.....	154
Додаток Ж Коефіцієнти для запису виразів вірогідності контролю для різних типів захисту.....	158
Додаток И Звідні таблиці з найменуваннями, кількістю і вартістю комплектуючих для двох виконань пристрою захисту.....	179

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АГП – автоматичне гасіння поля
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
ЕРС – електрорушійна сила
КЗ – коротке замикання
МК – мікроконтролер
ОЗЗ – однофазне замикання на землю
ОП – операційний підсилювач
ПМК – периферійний мікроконтролер
СГ – синхронний генератор
ЦМК – центральний мікроконтролер

ВСТУП

Більшість пошкоджень генератора спричинені порушенням ізоляції обмоток статора і ротора. Ці порушення зазвичай відбуваються внаслідок старіння ізоляції, її зволоження, наявності в ній дефектів, а також в результаті підвищення напруги, перенапруг, механічних пошкоджень, наприклад, через вібрації стержнів обмоток і сталі магнітопроводу. Отже пошкодження можливі в будь якій частині обмоток.

В статорі виникають міжфазні (двофазні і трифазні) короткі замикання, замикання однієї фази на корпус (на землю), замикання між витками обмотки однієї фази.

Найбільш поширеним видом пошкодження в синхронних генераторах є однофазні замикання на землю. Вони складають близько 60–80 % від усіх видів пошкоджень. Однофазні замикання на землю становлять значну небезпеку для синхронних генераторів, оскільки в місці замикання зазвичай горить дуга, що спалює сталь магнітопроводу статора. Пошкодження сталі потребує довготривалого та складного ремонту. До того ж в процесі протікання однофазного замикання на землю створюються умови для подальшого розвитку пошкодження в міжфазні (дво- та трифазні) короткі замикання.

Дослідженнями процесів пошкодження ізоляції, а також розробкою методів та засобів захисту від однофазних замикань на землю займалися такі відомі вчені в Україні: А. В. Журахівський [1], В. І. Кошман [2, 3], В. М. Кутін [4–8], В. В. Назаров [9, 10], В. Ф. Сивокобиленко [11–16], І. М. Сирота [17–19] та ін.; в Росії: В. М. Вавін [20], Р. А. Вайнштейн [21–26], Ф. А. Ліхачьов [27], О. М. Федосеев [28], Є.Ф. Цапенко [29], М. В. Чернобровов [30], М.О. Шабад [31], О. І. Шалін [32], Е. Н. Шнеєрсон [33] та ін.; в інших країнах: Дж. Блекбьорн [34], М. Льюз [35], Д. Раймерт [36], А. Слева [37], А. Фадке [38], С. Хоровіц [39].

Існує низка захистів від однофазних замикань на землю, але кожен з них має недоліки, що можуть призвести до хибних спрацювань захисту та інших негативних явищ. Основними недоліками захистів, що експлуатуються в наш час є нечутливість при поступовому зниженні опору ізоляції, невиправдані спрацювання, оскільки захисти реагують

на значення величин, що опосередковано характеризують струм в місці замикання, значний час спрацювання (5–10 с).

Виходячи з вище викладеного матеріалу існує актуальна науково-практична задача з підвищення чутливості та швидкодії захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора.

Метою дослідження є підвищення надійності спрацювання, чутливості та швидкодії захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, шляхом визначення значення струму в місці виникнення пошкодження.

Для досягнення мети дослідження поставлені такі задачі: проаналізувати процеси, які виникають при пошкодженні ізоляції обмотки статора генератора відносно землі, який працює в блоці з трансформатором; проаналізувати існуючі методи і засоби захисту від однофазних замикань на землю для визначення напрямків їх вдосконалення; вдосконалити існуючі методи захисту синхронних генераторів, що працюють в блоці з трансформатором від однофазних замикань на землю в обмотці статора; розробити принципову схему захисту; визначити властивості захисту; розробити алгоритм технічного обслуговування та пошуку можливих пошкоджень у пристрої захисту; обґрунтувати економічну необхідність вдосконалення захисту.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються при однофазному замиканні на землю в обмотці статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

Предмет дослідження – методи і засоби захисту обмотки статора синхронного генератора від однофазних замикань на землю.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ І ЗАСОБІВ ЇХ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

1.1 Особливості конструкції синхронних генераторів

Турбогенератор – це горизонтальна швидкохідна електрична машина з нерухомим статором і циліндричним неявно полюсним ротором, що обертається. Синхронний турбогенератор має активну та конструктивну складові. Активні складові беруть участь у безпосередньому перетворенні механічної енергії в електричну. До активних складових частин синхронного турбогенератора відносять осердя статора з обмоткою та ротор з обмоткою збудження. До конструктивних частин належать корпус статора, зовнішні та внутрішні щити з ущільненнями, вентилятори, газоохолоджувачі, бандажний вузол ротора та інші [40–44].

Корпус турбогенератора кріпиться до фундаменту машинної зали електростанції за допомогою рим-лап. Ротор встановлюється на два підшипники ковзання. Підшипники можуть вбудовуватися в торцеві щити корпусу турбогенератора, або облаштовуватися окремо. Конструктивне рішення з підшипниками які вбудовані в торцеві щити забезпечує дещо меншу відстань між осями підшипників. З іншого боку, застосування стоякових підшипників зменшує трудомісткість при виготовленні підшипників та полегшує збирання та розбирання машини.

Принцип охолодження турбогенератора зумовлює певні особливості конструкції його статора та ротора. Загалом розрізняють турбогенератори з безпосереднім охолодженням провідників обмотки, опосередкованим (відвід тепла від провідників здійснюється через основну ізоляцію) та змішаним охолодженням. Можливі комбінації способів охолодження турбогенераторів, що в даний час знайшли застосування, зводяться до таких: Т – опосередковане повітряне охолодження обмоток ротора і статора; ТВ – опосередковане водневе охолодження обмоток ротора і статора; ТВФ – безпосереднє охолодження обмотки ротора і опосередковане обмотки статора воднем; ТГВ – безпосереднє охолодження обмотки ротора і статора воднем; ТВВ – безпосереднє

охолодження обмотки ротора воднем, а статора водою; ТВМ – безпосереднє охолодження обмотки ротора водою, а статора маслом; ТЗВ – безпосереднє охолодження обмоток статора і ротора водою.

Конструктивна схема турбогенератора типу ТГВ-300 показана на рис. 1.1.

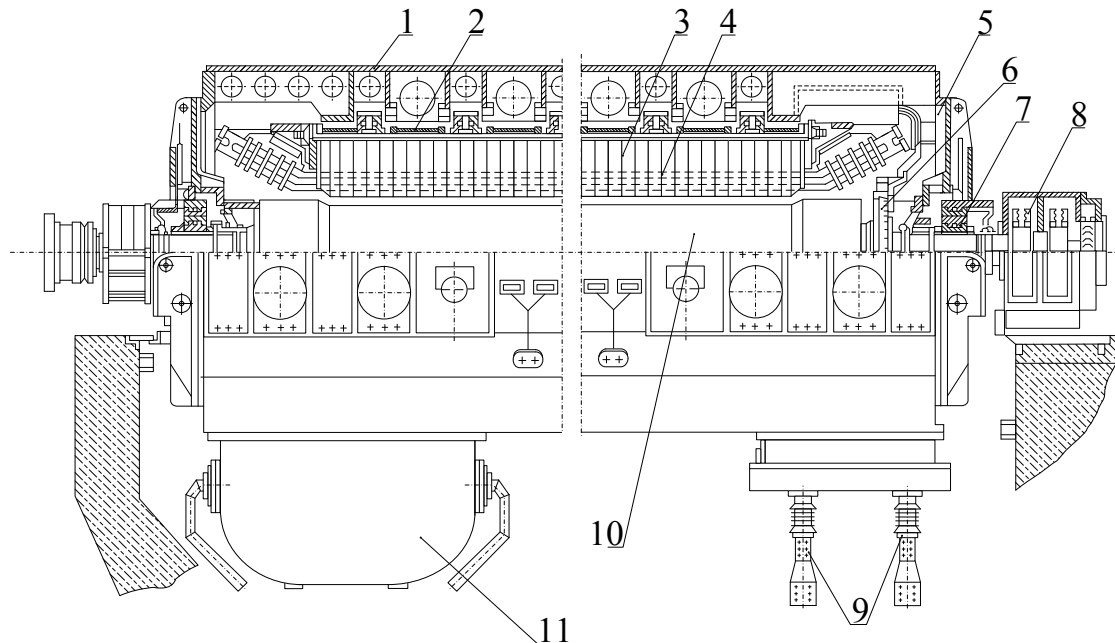


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема турбогенератора типу ТГВ-300:

- 1 – зовнішній корпус; 2 – внутрішній корпус; 3 – осердя статора;
- 4 – обмотка статора; 5 – торцевий щит; 6 – компресор; 7 – підшипник;
- 8 – апарат щіткотримачів; 9 – виводи; 10 – ротор; 11 – газоохолоджувач

Система охолодження будь-якого турбогенератора є замкненою. Охолоджуюче середовище відводить тепло від тих чи інших частин машини, циркулюючи в цій замкненій системі. До складу системи охолодження входять спеціальні пристрої (газоохолоджувачі, теплообмінники) в яких відбувається відвід втрат від охолоджуючого середовища турбогенератора до технічної води. Нагріта технічна вода, в свою чергу, охолоджується в спеціальних технічних водоймах або градирнях [43–48].

Основний фактором, що впливає на особливості конструкції турбогенераторів є висока швидкість обертання ротора, що викликає в тілі ротора потужні механічні зусилля. Високий рівень механічних зусиль, що виникають в роторі, та допустиме значення прогинання

ротора накладають обмеження на діаметр ротора та його довжину. Обмотка збудження вкладається в радіальні пази ротора. Лобові частини обмотки збудження закріплюються за допомогою бандажних кілець. Ці кільця утримують торцеву частину обмотки збудження від переміщення під дією відцентрових сил [42–44].

Статор турбогенератора складається з корпусу, торцевих щитів, елементів системи охолодження, осердя та обмотки, що вкладається в пази. Осердя складається з великої кількості пакетів, товщиною 40–70 мм, які набирають з окремих відштампованих сегментів. Сегменти виготовляються з високоякісної листової електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм або 0,5 мм. Листи ізолюють один від одного за допомогою лакової плівки. Для забезпечення монолітності осердя запресовується під тиском 1,2–1,7 МПа. Кріпиться осердя на спеціальних ребрах-клинах корпусу, що приварені до внутрішніх полиць корпусу паралельно осі обертання. При роботі генератора під навантаженням до осердя прикладаються значні радіальні зусилля магнітного тяжіння і колових електромагнітних сил, що викликає деформацію і коливання осердя з подвоєною частотою. Для зниження рівня вібрації корпусу статора застосовується гнучка підвіска в якій в ребрах-клинах, в області кріплення їх до корпусу, виготовляються повздовжні прорізи, які дозволяють ребру клина деформуватися в радіальному напрямку.

Обмотку статора, зазвичай, виконують трифазною шестизонною петльовою стержньового типу. Переважна більшість генераторів має двошарову обмотку статора зі з'єднанням фаз у зірку. В кожному пазі осердя вкладаються один над одним два стержні, що є активними провідниками та з'єднуються з іншими стержнями в головках лобових частин за допомогою наконечників чи паяння. В головках лобових частин усі елементарні провідники стержня з'єднуються між собою. Для зменшення втрат від полів розсіювання пазової та лобової частин обмотки виконують транспозицію елементарних провідників. Якщо в статорі генератора реалізовано безпосереднє охолодження обмотки, то порожнисті провідники впаюють в масивні мідні наконечники, що мають контактні хвостовики та штуцери для реалізації електричного та гідравлічного з'єднання відповідно [43].

Положення осі валопроводу гідрогенератора є одним з головних факторів, що визначають конструкцію гідрогенератора. За цією ознакою гідрогенератори можуть бути поділені на дві групи: вертикальні та горизонтальні. Гідрогенератори вертикального виконання мають два типи: зонтичний (підп'ятник розташовується під ротором на нижній хрестовині чи на підставці на кришці турбіни) та підвісний (підп'ятник розташовується на верхній хрестовині над ротором). Також відомі виконання гідрогенераторів капсульного типу та виконання машин з нахиленою віссю. Слід зазначити, що такі машини мають порівняно невелику потужність і застосовуються достатньо рідко.

Конструктивні схеми гідрогенераторів вертикального виконання представлені на рис. 1.2 та рис. 1.3.

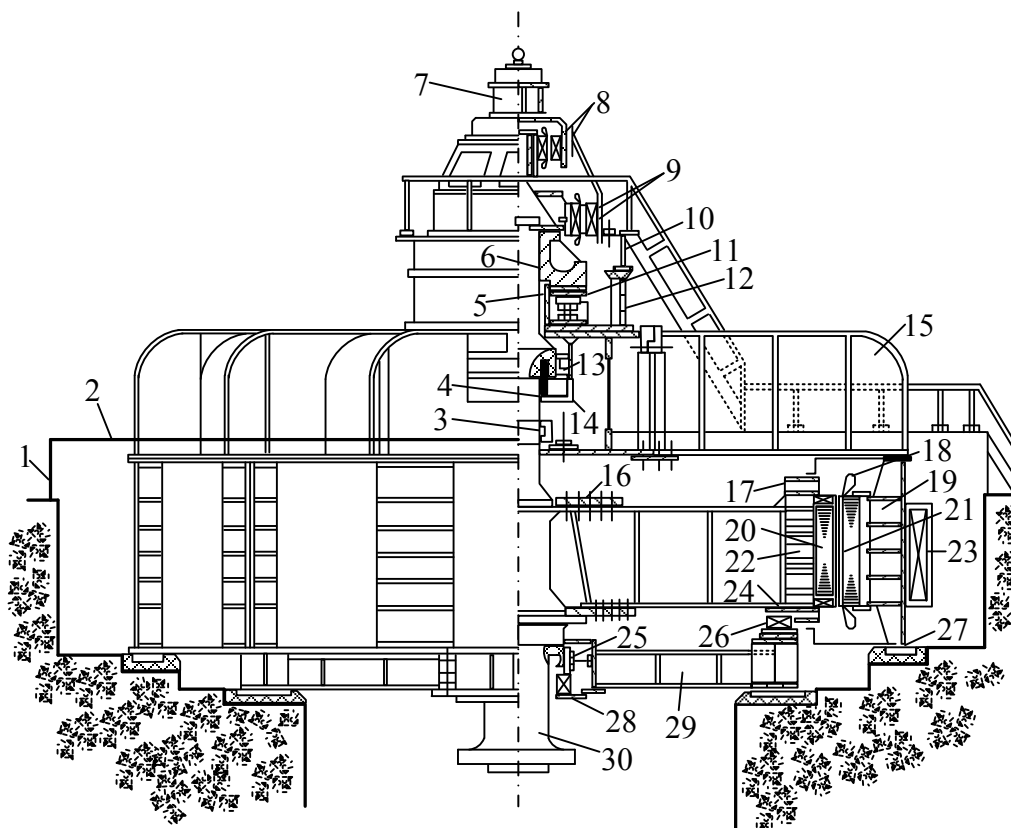


Рисунок 1.2 – Конструктивна схема гідрогенератора підвісного типу потужністю 103,5 МВА

Основними елементами конструкції гідрогенератора підвісного типу є: 1 – кожух генератора; 2 – перекриття; 3 – контактні кільця; 4 –

вигородка оливної ванни; 5 – диск під'ятника; 6 – втулка під'ятника; 7 – регуляторний генератор; 8 – підзбуджувач; 9 – збуджувач; 10 – підставка під збуджувач; 11 – нерухомий сегмент під'ятника; 12 – масляна ванна під'ятника; 13 – верхній напрямний підшипник; 14 – масляна ванна прямого підшипника; 15 – верхня хрестовина; 16 – диск ротора; 17 – вентилятор; 18 – обмотка статора; 19 – корпус статора; 20 – полюс; 21 – активна сталь; 22 – обід ротора; 23 – охолоджувач повітря; 24 – гальмівний елемент; 25 – нижній напрямний підшипник; 26 – гальма; 27 – фундамента плита; 28 – маслоохолоджувач; 29 – нижня хрестовина; 30 – вал.

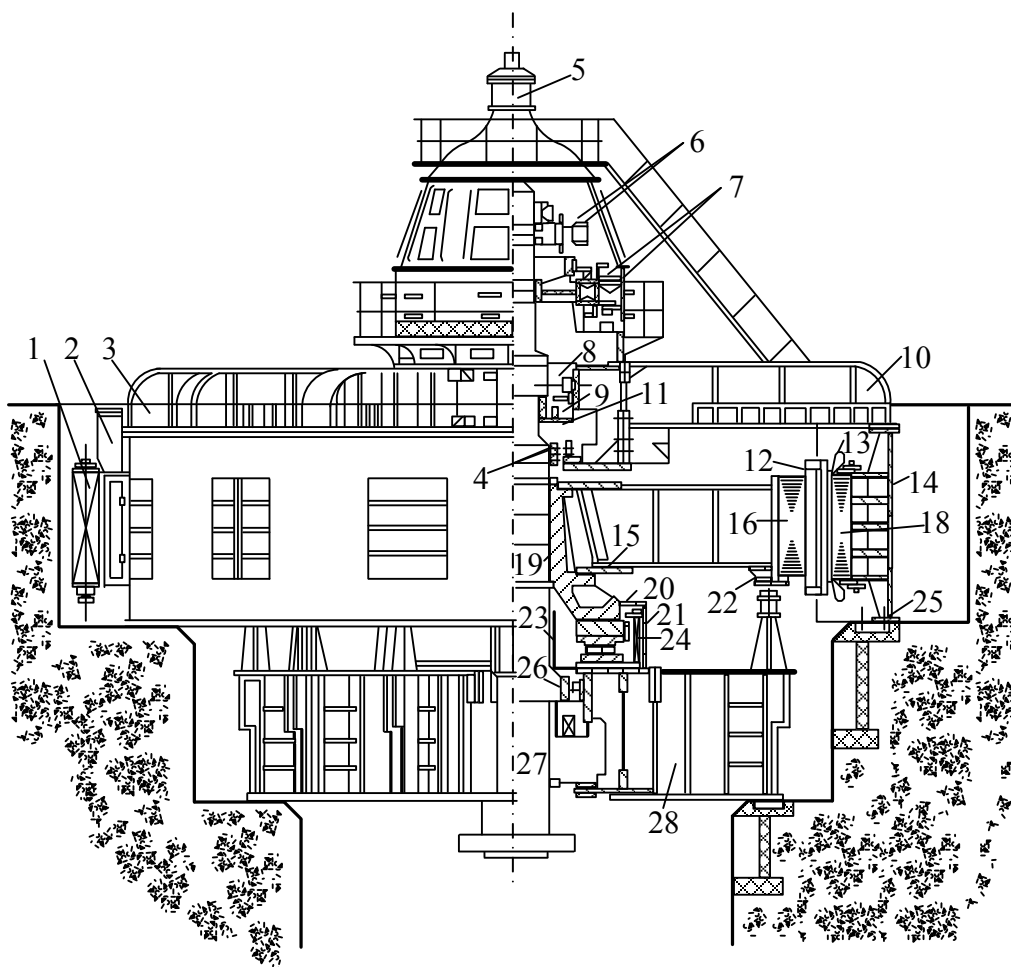


Рисунок 1.3 – Конструктивна схема гідрогенератора зонтичного типу потужністю 103,5 МВА

В свою чергу основними елементами конструкції гідрогенератора зонтичного типу є: 1 – повітроохолоджувач; 2 – вивід теплого повітря

в машинну залу; 3 – перекриття; 4 – контактні кільця; 5 – регуляторний генератор; 6 – підзбуджувач; 7 – збуджувач; 8 – верхній напрямний підшипник; 9 – масляна ванна прямого підшипника; 10 – верхня хрестовина; 11 – маслоохолоджувач; 12 – вентилятор; 13 – обмотка статора; 14 – корпус статора; 15 – диск ротора; 16 – обід ротора; 17 – полюс; 18 – активна сталь; 19 – втулка ротора; 20 – диск підп'ятника; 21 – масляна ванна підп'ятника; 22 – гальма; 23 – вигородка; 24 – нерухомий сегмент підп'ятника; 25 – фундаментна плита; 26 – нижній напрямний підшипник; 27 – вал; 28 – нижня хрестовина.

Корпус статора гідрогенератора служить для кріплення в ньому осердя статора з обмоткою та передачі на фундамент зусиль від ваги вузлів та деталей, які на ньому розташовані. Корпус складається з декількох рядів горизонтальних полиць, нижнього та верхнього поясів, що зв'язані між собою ребрами жорсткості.

Осердя статора збирається зі штампованих сегментів, які виготовляються методом холодного штампування з електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. У зібраному вигляді осердя утримується від розпускання за допомогою встановлених на торцях натискних гребнів та стяжних шпильок. Перед укладанням обмотки пази ретельно оглядають для виявлення зміщення сегментів один відносно одного, ретельно запилують кути зубців, перевіряючи правильність розташування натискних пальців гребенів. Після виконання цих операцій все осердя продувають стисненим сухим повітрям та покривають бітумно-бензольним лаком.

Обмотки статорів гідрогенераторів виконують котушковими (котушка складається з декількох послідовно з'єднаних витків) або стержневими (складається з напівсекцій – стержнів, що являють собою піввиток). Згадані типи обмоток можуть виконуватися одношаровими та двошаровими. Наразі найбільш широко використовуються обмотки стержневого типу (міжвиткова ізоляція у два рази товстіша ніж корпусна, забезпечується краще заповнення паза, з'являється можливість транспозиції елементарних провідників, що зменшує додаткові втрати від циркуляційних струмів в межах стержня) з двошаровим виконанням, яке має більш просту конфігурацію секцій.

Основними складовими частинами ротора є вал, остов, обід, полюси з обмоткою збудження, струмопровід з контактними кільцями та гальмівного кільця. Вали виготовляються та постачаються цільнокованими (сталь марки 40) або ковано-зварними (сталь марки 25ГС). Ковано-зварні виготовляються з двох поковок, які зварюються електрошлаковим способом. Остови роторів невеликих розмірів, які можна транспортувати у зібраному вигляді, виготовляються у вигляді зварного барабана. Спиці мають двотавровий переріз та кріпляться до остова за допомогою стикових плит, штифтів та стяжних шпильок. Ободи є найбільш механічно напруженими частинами в гідрогенераторах. Саме механічна міцність ободу визначає вибір кутової швидкості і, як наслідок, габаритів гідрогенератора.

Полюс гідрогенератора складається з котушки обмотки збудження, осердя та демпферної обмотки. Осердя полюса виконується шихтованим. Для ізоляції обмотки збудження від осердя полюса використовують гільзи зі склотканини та азбестового паперу на лакові. Торці котушок обмотки збудження ізолюють спеціальними шайбами, які виготовляють зі склотекстоліту. З азбестового паперу виконують прокладки міжвиткової ізоляції. Практично усі сучасні гідрогенератори виконують з поздовжньо-поперечною демпферною обмоткою. Струм збудження подають до котушок полюсів через ковзний контакт між розташованими на осі ротора контактними кільцями та вугільними щітками, що розташовані на траверсі навколо кілець [49–53].

Ще одним ключовим елементом конструкції будь-якого синхронного генератора є його система збудження. Призначенням системи збудження є живлення обмотки збудження машини постійним струмом та регулювання його величини. Усі системи збудження синхронних машин можна класифікувати за джерелом енергії, яка використовується для збудження машини, на три види:

- системи збудження, що містять генератор постійного струму;
- системи збудження, що містять генератор змінного струму (змінний струм перетворюється у постійний за допомогою напівпровідникових керованих, або некерованих випрямлячів);
- системи з самозбудженням (в таких системах використовується енергія машини, яка збуджується). Енергія перетворюється за допомо-

гою спеціальних трансформаторів і напівпровідникових випрямлячів [54–57].

В контексті роботи необхідно докладніше розглянути технологію, матеріали та особливості формування ізоляції обмотки статора синхронних генераторів. При виготовленні ізоляції обмотки статора широко використовуються лакотканини. Лакотканини поділяються на бавовняні, шовкові, капронові і скляні (склотканини). Найбільшу гнучкість і товщину мають шовкові і капронові лакотканини, найменшу гнучкість мають склолакотканини. Жорсткі лакотканини застосовують для пазової та міжшарової ізоляції. Фторопластові склолакотканини негорючі, хімічно стійкі і можуть працювати при 250 °С. Липкі лакотканини забезпечують монолітність багатошарової ізоляції обмоток [58–64]. Перспективними електроізоляційними матеріалами є плівкові матеріали товщиною від 10 до 200 мкм. Вони забезпечують кращий коефіцієнт заповнення паза, що приводить до зниження маси на одиницю потужності в електричних машинах. Клеєні електроізоляційні матеріали на основі слюди застосовують у високовольтних машинах, а також у низьковольтних машинах з класом ізоляції Н. До цих матеріалів відносяться міканіти, мікафолій та мікастрічки. Міканіти бувають колекторні, прокладні, формувальні і гнучкі. Гнучкий міканіт – листовий матеріал, що має гнучкість при кімнатній температурі, використовується в якості пазової ізоляції. Мікастрічка – рулонний електроізоляційний матеріал, гнучкий за кімнатної температури. Мікашовк – один з різновидів мікастрічки, що має підвищену механічну міцність. Підвищену нагрівостійкість мають скломікастрічки. Слюденіти і слюдопласти є заміниками слюди і широко застосовуються в якості ізоляційних матеріалів в електромашинобудуванні. В слюденітах основою є слюдинітовий папір, що отримують з відходів слюди при рівномірному їх нагріванні до 700–800 °С з наступною хімічною обробкою. Зі слюдинітового паперу виготовляють слюдинітові стрічки, гнучкі слюденіти, формувальний і колекторний слюденіт. Слюдопластові матеріали виготовляються з листів, що отримані з розщепленої слюди і багаторазово прокатані між валками. В процесі виготовлення слюдинітових листів лусочки зростаються, утворюючи більші лусочки слюди, ніж у слюденіті [65–68].

В технологічному процесі виготовлення і вкладання обмоток в пази машини їх ізоляція піддається різноманітним механічним впливам, а при роботі машини також нагріву, впливу наявної в навколишньому середовищі вологи, пилу, парів оливо, різноманітних газів і т. п. В практиці електромашинобудування не існує якогось одного виду електроізоляційного матеріалу, який би забезпечив надійність ізоляції електричної машини при дії вказаних вище факторів. Ізоляційні матеріали, що мають високий електричний опір, як правило, не мають достатньої механічної міцності і не витримують механічних навантажень при виготовленні і вкладанні обмоток. Стійкі до механічних впливів матеріали не мають достатньої електричної міцності. Тому при конструюванні механічної ізоляції застосовується не один, а декілька різноманітних матеріалів, властивості яких доповнюють одне одного. Окрім електричної міцності ізоляція повинна мати також хорошу теплопровідність, оскільки в іншому випадку втрати, що виділяються в струмопровідних частинах при роботі електричної машини, викликати-муть збільшення їх нагрівання.

Основними вимогами, що висувають до ізоляції електричних машин, є її висока електрична міцність і теплопровідність. Решту вимог (механічна міцність, нагрівостійкість, хімічна стійкість та ін.) висувають до ізоляції тільки з точки зору її здатності зберігати електричну міцність протягом технологічного процесу виготовлення і при тривалій експлуатації електричних машин в заданих режимах і умовах [58–61].

За своїми функціями ізоляція поділяють на корпусну (пазову), виткову і провідникову. Провідникова ізоляція – це ізоляція обмоткового проводу. Виткова ізоляція може бути встановлена тільки в машинах з обмоткою з прямокутного проводу. Зазвичай її встановлюють тільки у високовольтних машинах. Корпусну ізоляцію накладають на котушки обмотки [62].

В пазах електричних машин встановлюють декілька видів прокладок з листового матеріалу, що мають різне призначення. Прокладки на дні пазів виконують функцію захисту корпусної ізоляції від механічних пошкоджень при заклинюванні, що пов'язані з можливою нерівністю дна пазів. Прокладки під клин призначені як для механічного захисту обмоток від можливих ушкоджень при встановленні пазових

клинів, і крім того, за допомогою цих прокладок, змінюючи в певних місцях їх товщину, вибирають допуск на вкладання обмотки по висоті пазу, досягаючи точного закріплення котушок в пазах [62].

В обмотках з неперервною або гільзовою ізоляцією прокладки між шарами забезпечують постійну відстань по висоті між пазовими частинами котушок верхнього і нижнього шарів з метою компенсувати потовщення ізоляції в лобових частинах, де вона не може бути опресованою при виготовленні котушок, і запобігти можливому торканню котушок різних фаз при перехресуванні лобових частин.

Корпусну високовольтну ізоляцію виконують гільзовою або неперервною. Гільзову ізоляцію формують шляхом намотування на прямолінійну пазову частину котушки кількох шарів листового мікафолію чи скломікафолію і наступного його опресування і випікання. Лобові частини котушок ізолюють мікастрічкою, або скломікастрічкою. Мікафольова ізоляція за своїми властивостями відноситься до термоактивної, тобто після випікання і наступного охолодження вона набуває більшої механічної міцності і не розм'якає при повторному нагріванні. В залежності від матеріалів і лаків, що застосовуються, гільзова ізоляція може бути виконана на різноманітні класи нагрівостійкості [66–68].

Гільзова ізоляція має високу пробивну напругу і широко застосовується для ізоляції статорних обмоток високовольтних машин. Основним її недоліком є наявність слабкої, в електричному сенсі, ланки – місця стику двох видів ізоляції: гільзової на пазовій частині і неперервної стрічкової на лобовій. Ця ділянка знаходиться безпосередньо біля виходу прямолінійної частини котушок з пазів, тобто в місці найбільшої напруженості електричного поля (поблизу кута поверхні магнітопроводу). Ця ж ділянка зазнає найбільшої деформації як при вкладанні обмотки, так і при роботі машини, оскільки жорсткість лобових частин набагато менша, ніж пазових, що охоплені ізоляційною гільзою. Тому збільшується імовірність пробою ізоляції в цьому місці. Недоліком гільзової ізоляції є також і мала монолітність ізоляції лобових частин, що погіршує її вологостійкість [69, 70].

Неперервна ізоляція формується намотуванням кількох шарів стрічкового ізоляційного матеріалу неперервно по всій довжині котуш-

ки і наступним компаундуванням або просочуванням. Найбільше поширення має ізоляція, виконана намотуванням кількох шарів мікастрічки або скломікастрічки і просочена в бітумних компаундах. За своїми ізоляційними властивостями така ізоляція мало поступається гільзовій, але є більш надійною через однорідність ізоляції пазової і лобової частин, більшу стійкість до коронування і більшу вологостійкість. За нагрівостійкістю вона відноситься до класу E, оскільки температура розм'якшення асфальтобітумних компаундів лежить в межах 115–125 °C і є термопластичною ізоляцією [66,67].

Здатність жорсткої в холодному стані ізоляції розм'якшуватись при повторному нагріванні створює певні зручності при вкладанні обмоток і закріпленні їх лобових частин, але обмежує область застосування. Просочена в бітумних компаундах ізоляція не може бути застосована для класів ізоляції B та F і в обертових частинах машини, оскільки тиск від відцентрових сил при розм'якшеному від нагрівання під час роботи компаунді спричиняє деформацію і вихід ізоляції з ладу [68, 70].

В якості основного ізоляційного матеріалу в даний час використовуються різноманітні слюдинітові полотна або стрічки, а для компаундування – епоксидні компаунди. Епоксидні компаунди на відміну від бітумних є термореактивними і котушки обмотки зберігають жорсткість і механічну міцність після їх виготовлення незалежно від наступного нагрівання.

Для того ж, щоб мати можливість дещо деформувати такі котушки при вкладанні їх в пази, вкладання обмотки здійснюють безпосередньо після компаундування, а у компаунд додають спеціальні речовини, що називаються сповільнювачами, що подовжують затвердіння на строк необхідний для вкладання і закріплення катушок. Застосовується також метод компаундування чи просочування катушок після вкладання їх в пази. Більша монолітність ізоляції, кращі електричні властивості епоксидних компаундів і механічна міцність катушок дозволили зменшити товщину корпусної ізоляції і тим самим покращити використання зубцевої зони в сучасних машинах високої напруги [62, 70].

Отже ізоляція стержнів обмотки статора СГ складається з багатьох шарів склослюдинітової стрічки, що просочується епоксидним термоактивним компаундом. Після накладання ізоляції стержень пресується і випікається, при цьому ізоляція набуває монолітної структури з високими електричними і механічними властивостями. Поверх слюдяної ізоляції накладається шар напівпровідної абсолавсанової стрічки, що промащується спеціальним напівпровідним лаком (рис. 1.4). Призначенням цього покриття є надання поверхні стержня потенціалу осердя (тобто нульового) і попередження розрядів в газі між поверхнями стержня і стінкою пазу: ці розряди, іонізуючи газ, підвищують його хімічну агресивність і тому при довготривалому використанні можуть сприяти порушенню ізоляції.

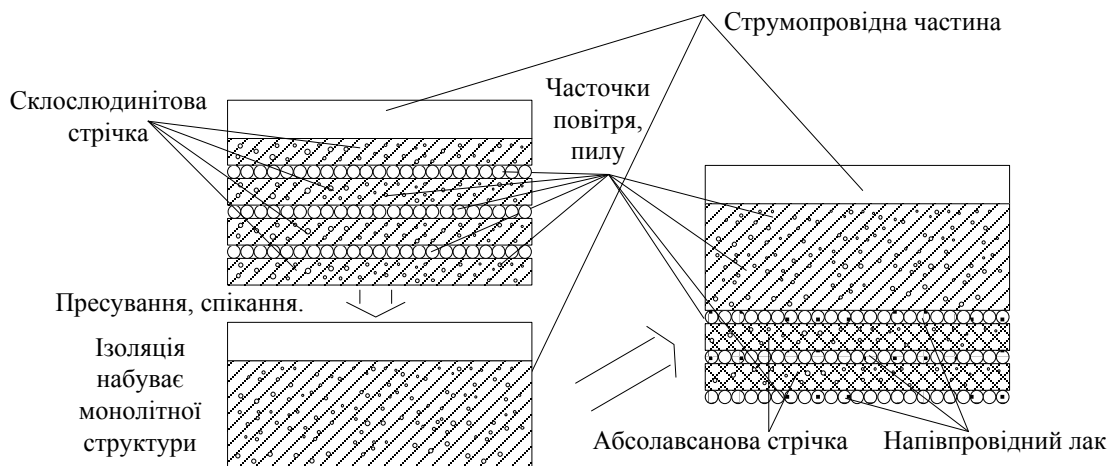


Рисунок 1.4 – Процес формування ізоляції обмотки статора

Неоднорідність ізоляції, що обумовлена самою технологією її виготовлення, наявність механічних пошкоджень через вібрації стержнів обмоток і сталі магнітопроводу, перенапруги викликають пробій ізоляції і виникнення різного роду пошкоджень [69–72].

1.2 Анормальні режими роботи та пошкодження синхронних генераторів

Розглянемо вплив анормальних режимів роботи генератора на елементи його конструкції. Можна виділити такі анормальні режими роботи генератора: перевантаження генератора за струмом статора чи

ротора, несиметричне навантаження, асинхронний режим роботи (втрата збудження), тривала робота при близькому до одиниці коефіцієнті потужності, тривала робота генератора при підвищеному рівні напруги статора, пікові режими роботи та низка інших впливів, таких як форсування збудження, близькі короткі замикання, скидання та набирання навантаження [73].

Симетричні перевантаження обмоток статора та ротора можуть виникнути через нестачу реактивної потужності чи знижений рівень напруги в тій частині енергосистеми, до якої підключені генератори, або перевантаження генератора за струмом статора відбувається як наслідок перевантаження за струмом ротора, що в свою чергу виникає через несправності в системі збудження. Перевантаження генератора за струмом ротора чи статора можуть викликати зростання нагріву обмоток та рівня вібрації, що призводить до погіршення кріплення лобових частин обмотки, зменшення строку служби виткової та корпусної ізоляції. Особливо небезпечними перегрівми є для мікастрічкової компаундованої ізоляції, оскільки можуть викликати розм'якшення компаунду та його витікання [73, 74].

Режим несиметричного навантаження генератора може виникати в наслідок неповнофазних режимів в енергосистемі, наприклад однофазних автоматичних повторних увімкнень на лініях електропередач, або наявності поблизу значних несиметричних навантажень таких, як дугові печі чи тягові підстанції. Складова поля зворотної послідовності, що виникає у випадку несиметрії, обертається відносно ротора з подвійною синхронною швидкістю і наводить в контурах ротора струми подвійної частоти, що створюють додаткові втрати та спричиняють місцеві перегрівми на стиках клинів, посадочних місцях роторних бандажів і т. д. Тривала робота генератора зі значною несиметрією струмів у фазах може призвести до вигорання пазових клинів ротора, пошкодження обмотки ротора та роторних бандажів [74, 75].

Генератор переходить в асинхронний режим в результаті втрати збудження, або зниження рівня збудження нижче деякого критичного значення, яке необхідне для створення синхронного моменту. В асинхронному режимі виникає перерозподіл магнітних потоків в лобових частинах статора, що в свою чергу викликає також перегрів крайніх пакетів статора. Ковзання ротора відносно магнітного поля статора

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 53528 Україна, H02H03/36. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю в електромережі з ізольованою нейтраллю / Журавівський А. В., Кенс Ю. А., Мединський Р. В., Равлик О. М., Горбатський А. А., Засідкович Н. Р., заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». – № 2002075692 ; заявл. 10.07.2002 ; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.

2. Пат. 77309 Україна, МПК H02H 3/17. Пристрій для захисту від однофазних замикань на землю у трифазній електричній мережі з ізольованою нейтраллю / Кошман В. І., Кузнецов В. Г., Сабарно Л. Р., Севастюк І. М., Трач І. В., заявник і власник патенту Інститут електродинаміки НАН України. – № 200412100626 ; заявл. 23.12.2004 ; опубл. 15.11. 2006, Бюл. №11,

3. Пат. 78119 Україна, МПК H02H 3/17. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю в трифазній мережі змінного струму і пристрій для його реалізації / Кошман В. І., Кузнецов В. Г., Сабарно Л. Р., Севастюк І. М., Трач І. В., заявник і власник патенту Інститут електродинаміки НАН України. – № а200503923 ; заявл. 25.04.2005 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

4. Кутін В. М. Контроль провідності ізоляції фази відносно землі в трифазних системах з ізольованою нейтраллю / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2002. – № 2. – С. 60–65.

5. Кутін В. М. Визначення умов працездатності ізоляції в розподільних мережах напругою 6–10 кВ / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, В. В. Луцяк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : зб. наук. праць. – 2003. – № 6(23). – С. 34–37.

6. Кутін В. М. Система контролю працездатності ізоляції розподільної мережі напругою 6–10 кВ / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – 2005. – № 7. – С. 123–128.

7. Кутін В. М. Визначення технічного стану ізоляції розподільних мереж напругою 6–10 кВ з урахування впливу несиметрії параметрів

ізоляції відносно землі / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 142–145.

8. Кутін В. М. Вибір сукупності діагностичних показників для оцінки працездатності ізоляції відносно землі мережі 6–35 кВ / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : зб. наук. праць. – 2006. – № 3(38). – С. 96–99.

9. Назаров В. В. О режимах нейтралі в сетях 6–35 кВ / В. В. Назаров // Промышленная энергетика. – 1993. – № 6. – С. 33–36.

10. Назаров В. В. Защита электрических сетей от однофазных замыканий / В. В. Назаров. – Киев : Лыбидь, 1992. – 124 с.

11. Сивокобыленко В. Ф. Ограничение перенапряжений при замыканиях на землю в системах электроснабжения собственных нужд электростанций / В. Ф. Сивокобыленко, В. В. Музалев, С. Махинда // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – 1998. – № 2. – С. 229–233.

12. Дополнительная резервная защита мощных блоков генератор-трансформатор / В. Ф. Сивокобыленко, Н. В. Гребченко, А. С. Апухтин, В. В. Зубашенко // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2000. – № 21. – С. 84–88.

13. Сивокобыленко В. Ф. Определение параметров эквивалентных схем замещения турбогенераторов для расчета на математических моделях / В. Ф. Сивокобыленко, М. А. Меженикова // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2000. – № 17. – С. 38–41.

14. Сивокобыленко В. Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций : учебное пособие / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев. – Донецк : Дон НТУ, 2002. – 136 с.

15. Сивокобыленко В. Ф. Математичне моделювання в електротехніці і енергетиці : навчальний посібник / В. Ф. Сивокобыленко. – Донецьк : Дон НТУ, 2005. – 350 с.

16. Пат. 73589 Україна, МПК H02H 3/17. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю / В. Ф. Сивокобыленко, О. В. Ковязін, заявник і власник патенту Державний вищий навчальний заклад До-

нецький національний технічний університет – и 2012 04517 ; заявл. 10.04.2012 ; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18,.

17. Сирота И. М. Режимы нейтрали электрических сетей / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. – К. : Наукова думка, 1985. – 264 с.

18. Сирота И. М. Защита от замыканий на землю в электрических системах / И. М. Сирота. – К. : Издательство АН УССР, 1955. – 208 с.

19. Сирота И. М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И. М. Сирота. – К. : Наукова думка, 1983. – 268 с.

20. Вавин В. Н. Релейная защита блоков турбогенератор–трансформатор / В. Н. Вавин. – М. : Энергоиздат, 1982. – 256 с.

21. Вайнштейн Р. А. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов на электростанциях ОЭС Сибири / Р. А. Вайнштейн, В. И. Лапин, А. М. Наумов, А. В. Доронин // Электрические станции. – 2009. – № 12. – С. 26–30.

22. Условие функционирования защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях / Р. А. Вайнштейн, С. Н. Пашковский, Е. А. Понамарев, В. В. Шестакова // Электричество. – М., 2009. – №12. – С. 26–32.

23. Вайнштейн Р. А. Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц / Р. А. Вайнштейн, Р. Б. Тентиев, С. М. Юдин // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 96–100.

24. Качественные признаки для выявления поврежденного элемента в электроустановках с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях / Р. А. Вайнштейн, С. Н. Пашковский, Е. А. Понамарев, С. М. Юдин // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7–8/1. – С. 136–143.

25. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали / Р. А. Вайнштейн, В. В. Шестакова, С. М. Юдин, Т. С. Гурин // Известия ВУЗов, Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 115–118.

26. Вайнштейн Р. А. Режимы заземления нейтрали в электроэнергетических системах : учебное пособие / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, В. В. Шестакова. – Томск : ТПУ, 2006. – 118 с.
27. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1971. – 152 с.
28. Федосеев, А. М. Релейная защита электро-энергетических систем / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
29. Цапенко Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ / Е. Ф. Цапенко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
30. Чернобровов Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М. : Энергия, 1974. – 680 с.
31. Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / М. А. Шабад. – М. : Энергопрогресс, 2007. – 64 с.
32. Шалин, А. И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. – Новосибирск : НГТУ, 2002. – 384 с.
33. Шнеерсон Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
34. Blackburn J. Lewis. Protective Relaying: Principles and Applications / J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin. – London : Taylor & Francis Group, 2006. – 638 p.
35. Loos Matthieu. Single Phase to Ground Fault in Compensated Network / Matthieu Loos. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2014. – 228 p.
36. Reimert Donald. Protective Relaying for Power Generation Systems / Donald Reimert. – CRC Press, 2005. – 592 p.
37. Sleva A. M. Protective Relay Principles / Anthony M. Sleva. – CRC Press, 2009. – 368 p.
38. Phadke Arun G. Computer Relaying for Power Systems. 2nd ed. / Arun G. Phadke, James S. Thorp – Wiley Language, 2009. – 344 p.
39. Horowitz S. H. Power System Relaying / Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke. – Research Studies Press Limited, 2008. – 331 p.

40. Gieras Jacek F. Electrical Mashines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion / Jacek F. Gieras. – CRC Press, 2016. – 434 p.
41. Boldea Ion. Electric Mashines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB / Ion Boldea, Lucian Nicolae Tutelea. – CRC Press, 2009. – 792 p.
42. Извеков В. И. Проектирование турбогенераторов / В. И. Извеков, Н. А. Серихин, А. И. Абрамов. – М. : МЭИ, 2005. – 440 с.
43. Boldea Ion. Synchronous Generators / Ion Boldea. – CRC Press, 2015. – 478 p.
44. Brandão Faria J. A. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering / J. A. Brandão Faria. – Wiley-IEEE Press, 2008. – 420 p.
45. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
46. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
47. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis / Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi, Seungdeog Choi, Nomayoun Meshgin-Kelk. – CRC Press, 2012. – 272 p.
48. Gross Charles A. Electric Machines / Charles A. Gross. – CRC Press, 2006. – 466 p.
49. Абрамов А. И. Расчет и конструкция гидрогенераторов / А. И. Абрамов, А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Высш.шк., 1964. – 258 с.
50. Абрамов А. И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов : учеб. пособие для вузов / А. И. Абрамов, А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш.шк., 2001. – 389 с.
51. Домбровский В. В. Гидрогенераторы / В. В. Домбровский, А. А. Дукштау, Г. Б. Пинский. – Л. : Энергоатомиздат, 1982. – 366 с.
52. Домбровский В. В. Проектирование гидрогенераторов / В. В. Домбровский, Н. П. Иванов. – Л. : Энергия, 1968. – 364 с.
53. Boldea Ion. Variable Speed Generators / Ion Boldea. – CRC Press, 2015. – 580 p.

54. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций / А. А. Васильев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 551 с.
55. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
56. Грудинский П. Г. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций / П. Г. Грудинский, С. А. Мандрыкин, М. С. Улицкий. – М. : Энергия, 1974. – 575 с.
57. Sadhu Pradip Kumar. Elements of Power Systems / Pradip Kumar Sadhu, Soumya Das. – CRC Press, 2015. – 532 p.
58. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1980. – 495 с.
59. Тареев Б. М. Электротехнические материалы / Б. М. Тареев. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1952. – 288 с.
60. Темофеев И. А. Электротехнические материалы и изделия : учебное пособие / И. А. Темофеев. – СПб. : Лань, 2012. – 272 с.
61. Бородулин В. Н. Конструкционные и электротехнические материалы / В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, С. Я. Попов. – М. : Высш. шк., 1990. – 296 с.
62. Фридлянд М. Б. Электротехнические материалы для ремонта электрических машин и трансформаторов / М. Б. Фридлянд. – М. : Энергия, 1971. – 96 с.
63. Электрофизические основы техники высоких напряжений : учеб. для вузов / И. М. Бортник, И. П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин ; под ред. И. П. Верещагина, В. П. Ларионова. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
64. Техника высоких напряжений / Д. В. Разевиг, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь, Е. Я. Рябкова. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
65. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
66. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

67. Леонтьев В. О. Электротехнические материалы: навчальний посібник / В. О. Леонтьев, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.

68. Городжа А. Д. Матеріалознавство та електротехнічні матеріали : підручник / А. Д. Городжа, В. О. Лемешко, В. С. Ловейкін. – К. : КНУБА, 2002. – 280 с.

69. Abdel-Salam Mazen. High-Voltage Engineering: Theory and Practice / Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, Roshdy Radwan. – CRC Press, 2000. – 742 p.

70. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair / Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. – Wiley-IEEE Press, 2014. – 672 p.

71. Arora Ravindra. High Voltage and Electrical Insulation Engineering / Ravindra Arora, Wolfgang Mosch. – Wiley-IEEE Press, 2011. – 394 p.

72. Кутін В. М. Дослідження технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора в процесі його експлуатації електрообладнання / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – №2(15). – С. 151–155.

73. Голоднова О. С. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения / О. С. Голоднова. – М. : ИПК-госслужбы, 2005. – 93 с.

74. Анормальные режимы работы крупных синхронных машин / Е. Я. Казовский, Я. Б. Данилевич, Э. Г. Кашарский, Г. В. Рубисов. – Л. : Наука, 1969. – 429 с.

75. Коган Ф. Л. Анормальные режимы мощных турбогенераторов / Ф. Л. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 191 с.

76. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – М. : Государственное энергетическое издательство, 1950. – 551 с.

77. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Л. : Энергия, 1980. – 256 с.

78. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы / С. А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 519 с.

79. Дьяченко М. Д. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение) : учеб. пособие / М. Д. Дьяченко, С. К. Поднебенная ; М-во образования и науки Украины, Приазов. гос. техн. ун-т. – Мариуполь : ПГТУ, 2014. – 302 с.
80. Копьев В. Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения / В. Н. Копьев – Томск : ЭЛТИ ТПУ, 2006. – 143 с.
81. Исмагилов Ф. Р. Микропроцессорные устройства релейной защиты энергосистем : учебное пособие / Ф. Р. Исмагилов, Ф. С. Ахматнабиев. – Уфа : УГАТУ, 2009. – 171 с.
82. Басс Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев. – М. : МЭИ, 2002. – 296 с.
83. Дьяков А. Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко – М. : ИД МЭИ, 2010. – 336 с.
84. Bakshi U. A. Protection and Switchgear / U. A. Bakshi, M. V. Bakshi. – Technical Publications, 2006. – 395 p.
85. Elmore Walter A. Protective Relaying Theory and Applications / Walter A. Elmore. – New York : Marcel Dekker, 2004. – 410 p.
86. Кутін В. М. Удосконалення засобів захисту від однофазних замикань на землю в обмотці статора синхронного генератора електрообладнання / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – № 2(22), частина 2. – С. 393–396.
87. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С. Бернас, З. Цёк. – М. : Энергоиздат, 1982. – 312 с.
88. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие / Г. И. Атабеков. – СПб. : Лань, 2009. – 592 с.
89. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 638 с.
90. Основы теоретической электротехники : учебное пособие / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Белянин. – СПб. : Лань, 2008. – 592 с.
91. Johnson Don H. Fundamentals of Electrical Engineering I. / Don H. Johnson. – Connexions, 2013. – 292 p.

92. Baker Thomas E. Electrical Calculations and Guidelines for Generating Stations and Industrial Plants / Thomas E. Baker. – CRC Press, 2012. – 274 p.

93. Alexander Charles K. Fundamentals of Electric Circuits / Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku. – The McGraw-Hill Companies, 2013. – 905 p.

94. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М. : Высш. шк., 1985. – 536 с.

95. Переходные процессы в системах электроснабжения / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен, А. Я. Рыбалко, В. В. Прокопенко. – К. : Высш.шк., 1989. – 422 с.

96. Шуин В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В. А. Шуин, А. В. Гусенков. – М. : Энергопрогресс, 2001. – 104 с.

97. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учебное пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

98. Гук Ю. Б. Проектирование электрической части станций и подстанций / Ю. Б. Гук, В. В. Кантан, С. С. Петрова. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.

99. Чунихин А. А. Аппараты высокого напряжения : учебное пособие для вузов / А. А. Чунихин, М. А. Жаворонков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

100. Кутін В. М. Моделювання струму в реактивному органі пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором електрообладнання / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 48–51.

101. Кутін В. М. Сукупність контрольованих параметрів та параметр спрацювання пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Молодий вчений. – 2014. – № 12. – С. 13–15.

102. Гребнев В. В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel / В. В. Гребнев. – М. : ИП РадиоСофт, 2002. – 176 с.
103. Хартов В. Я. Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих / В. Я. Хартов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 240 с.
104. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники / А. В. Нетушил, П. В. Ермуратский, А. А. Косякин, В. С. Литвин. – М. : Высш. шк., 1986. – 248 с.
105. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки : Навчальний посібник / Ф. П. Шкрабець, Д. В. Ципленков, Ю. В. Куваєв, О. Б. Іванов, В. І. Панченко, А. А. Колб. – Д. : Національний гірничий університет, 2004. – 515 с.
106. Голубцов М. С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному / М. С. Голубцов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с.
107. Agarwal Anant. Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits / Anant Agarwal, Jeffrey H. Lang. – Elsevier Inc., 2005. – 984 p.
108. Панфилов, В. А. Основы метрологии и электроизмерительной техники / В. А. Панфилов. – М. : Энергопрогресс, 2006. – 88 с.
109. Тартаковский Д. Ф. Метрология стандартизация и технические средства измерений : учеб. для вузов / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М. : Высш. шк., 2001. – 205 с.
110. Раннева Г. Г. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник для студентов высших учебных заведений / Г. Г. Раннева. – М. : Академия, 2006. – 512 с.
111. Глинкин Е. И. Микропроцессорные средства : монография / Е. И. Глинкин, Б. И. Герасимов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 144 с.
112. Мейзда Ф. Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Ф. Мейзда. – М. : Мир, 1990. – 535 с.
113. Овчаренко Н. И. Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики / Н. И. Овчаренко. – М. : Энергопрогресс, 2001. – 80 с.
114. Богатырев Л. Л. Релейная защита электроэнергетических систем / Л. Л. Богатырев, Л. Ф. Богданова, А. В. Паздрин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 112 с.

115. Овчаренко Н. И. Микропроцессорная автоматика синхронных генераторов и компенсаторов / Н. И. Овчаренко. – М. : Энергопрогресс, 2004. – 96 с.

116. Семенов В. А. Противоаварийная автоматика в ЕЭС России / В. А. Семенов. – М. : Энергопрогресс, 2004. – 104 с.

117. Антонов В. И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем / В. И. Антонов, Н. М. Лазарева, В. И. Пуляев. – М. : Энергопрогресс, 2000. – 84 с.

118. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем / Н. И. Овчаренко. – М. : НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.

119. Шмурьев В. Я. Цифровые реле защиты / В. Я. Шмурьев. – М. : Энергопрогресс, 1999. – 56 с.

120. Vasyl Kutin. Protection against single phase ground fault of the stator winding synchronous generator / Vasyl Kutin, Oleksandr Shpachuk // East West : Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. – 2016. – № 1–2. – P. 118–121.

121. Кутін В. М. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, В. І. Голінько, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2 – С. 33–138.

122. Пат. 102487 Україна, МПКН02Н 7/00. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / О. О. Шпачук, В. М. Кутін ; заявники О. О. Шпачук, В. М. Кутін. – u 2015 06604 ; заявл. 06.07.2015 ; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.

123. Кутін В. М. Діагностика електрообладнання. Типові задачі та лабораторний практикум : навчальний посібник / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 148 с.

124. Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики / А. П. Кузнецов, В. Ю. Лукоянов, А. Н. Бирг, В. Н. Дмитриев, В. А. Герасимов, С. А. Кузьмин. – М. : Энергопрогресс, 2001. – 80 с.

125. Кутін В. М. Алгоритм пошуку пошкодження в пристроях захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6 – С. 231–238.

126. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник для студентов высш. учеб.заведений / Г. Г. Раннев, В. А. Сурогина, В. И. Калашников, С. В. Нефедов, А. П. Тарасенко. – М. : Академия, 2006. – 512 с.

127. Боровиков С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Н. Троян; [под ред. С. М. Боровикова]. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.

128. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.

129. Кутін В. М. Вдосконалення захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Нафтогазова енергетика. – 2016. – № 2. – С. 47–56.

130. Методичні вказівки до виконання студентами – магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / [Уклад. В.О. Козловський]. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 22 с.

Наукове видання

**Кутін Василь Михайлович
Шпачук Олександр Олександрович**

**ЗАХИСТ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ
ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА,
ЩО ПРАЦЮЄ В БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Шпачуком

Підписано до друку 11.12.2018 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 10,63.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2019-03

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.