

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

На правах рукопису

Шпачук Олександр Олександрович

УДК 621.316.925

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА
ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ В
БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ

05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник
Кутін Василь Михайлович ,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2017 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1 Особливості конструкції синхронних генераторів	11
1.2 Аномальні режими роботи та пошкодження синхронних генераторів.....	23
1.3 Аналіз існуючих засобів захисту синхронних генераторів від однофазних замикань на землю обмотки статора.....	28
1.4 Висновки до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ.....	39
2.1. Дослідження струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора що працює в блоці з трансформатором.....	39
2.2 Вибір сукупності контрольованих параметрів і параметрів спрацювання захисту.....	45
2.3 Моделювання процесу однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора.....	58
2.4 Загальна характеристика запропонованого методу захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором.....	62
2.5 Функціональна схема пристрою захисту.....	68
2.6 Висновки до розділу 2.....	70
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ.....	72
3.1 Розробка алгоритму функціонування пристрою захисту.....	72
3.2 Розробка принципової схеми пристрою захисту.....	78
3.3 Розробка програмної частини захисту.....	84
3.4 Моделювання нормальних і аварійних режимів роботи пристрою захисту.....	86

3.5 Висновки до розділу 3.....	98
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ...	101
4.1. Розробка макетного зразка пристрою захисту.....	101
4.2 Визначення властивостей захисту.....	105
4.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки.....	130
4.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	134
4.5 Висновки до розділу 4.....	138
ВИСНОВКИ.....	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143
ДОДАТКИ.....	157
Додаток А Коефіцієнти для спрощення запису виразів струму однофазного замикання на землю	158
Додаток Б Вхідні дані та графіки перехідних процесів однофазного замикання на землю для різних типів синхронних генераторів.....	165
Додаток В Поверхні відгуку для діючого значення струму однофазного замикання на землю	182
Додаток Д Текст програми роботи мікроконтролера.....	194
Додаток Е Таблиці станів для двох виконань пристрою захисту.....	197
Додаток Ж Коефіцієнти для запису виразів вірогідності контролю для різних типів захисту.....	200
Додаток З Звідні таблиці з найменуваннями, кількістю і вартістю комплектуючих для двох виконань пристрою захисту	218
Додаток Й Акт впровадження результатів роботи у навчальний процес.....	223
Додаток К Акт впровадження результатів роботи у виробництво.....	224

ВСТУП

Актуальність теми. 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 $60 \div 80$ % 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 займався ряд відомих вчених в Україні: Журахівський А. В. [1], Кошман В. І. [2, 3], Кутін В.М. [4–8], Назаров В.В. [9, 10], Сивокобиленко В. Ф. [11– 16], Сирота І. М. [17–19] та ін.; в Росії: Вавін В. М. [20], Вайнштейн Р.А. [21–26], Ліхачьов Ф. А. [27], Федосеев О. М. [28], Цапенко Є.Ф. [29], Чернобровов М. В. [30], Шабад, М.О. [31], Шалін О. І. [32], Шнеєрсон Е. Н. [33] та ін.; в інших країнах: Блекбьорн Дж. [34], Льюз М. [35], Раймерт Д. [36], Слева А. [37], Фадке А. [38], Хоровіц С. [39].

Існує цілий ряд 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, невинуваті спрацювання, оскільки захисти реагують на значення величин, що опосередковано характеризують струм в місці замикання, значний час спрацювання ($5 \div 10$ 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті і кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона - Остроградського» (№ держреєстрації 0115U001120) та «Самооптимізація електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії» (№ держреєстрації 0103U002874). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. 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.

Методи дослідження. Були використані теоретичні та експериментальні методи досліджень, зокрема математичної статистику та теорії ймовірності для аналізу пошкоджень обмотки статора генератора та зміни параметрів обмотки статора генератора, методи аналізу лінійних електричних кіл, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням комп'ютерного симулювання для побудови математичних моделей струму однофазного замикання на землю та струму в реагуючому органі, методи теорії надійності для оцінювання показників надійності релейного захисту, методи математичного моделювання для дослідження характеристик запропонованого захисту, методи пошуку пошкоджень в дискретних об'єктах, для оптимізації алгоритму пошуку пошкоджень в пристрої релейного захисту.

Наукова новизна одержаних результатів. Мінімізація кількості хибних спрацювань захисту від ОЗЗ в обмотці статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, забезпечується шляхом визначення струму в місці замикання на основі вимірювання загального активного опору ізоляції обмотки статора, відносно землі, перехідного опору в місці замикання, напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції відносно землі.

1. Вперше для захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, побудована математична модель яка враховує сукупність параметрів аварійного режиму, а саме параметри ізоляції обмотки статора, перехідний опір в місці замикання на землю, напругу нульової послідовності та взаємозв'язок між ними, що дозволяє обґрунтувати вибір сукупності та значень контрольованих параметрів для визначення уставки спрацювання захисту та зменшити імовірність помилкових спрацювань захисту.

2. Вдосконалено метод захисту обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який, на відміну від відомих методів захисту, реагує на значення струму в місці замикання шляхом використання комбінованого методу накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

3. Отримав подальший розвиток метод захисту на відключення генератора від мережі, а саме одночасне виявлення зростання напруги нульової послідовності та перехідного опору в місці замикання на землю, як ознаки появи аварійного режиму, і перевищення заданої уставки спрацювання по струму, що на відміну від існуючих дозволяє відлаштуватися від впливу зовнішніх коротких замикань та завад в колі накладання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що: виходячи з одержаних в роботі теоретичних результатів розроблено принципові схеми пристроїв захисту обмотки статора синхронного генератора від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на комбінованому методі накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором; розраховано параметри, показники та характеристики розробленого пристрою; досліджено аварійні режими роботи пристроїв і розроблено алгоритми технічного обслуговування та пошуку його можливих пошкоджень; виконано порівняльний розрахунок вірогідності результатів контролю стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора захистами, що реалізують різні методи, в тому числі і розроблений автором, а це може бути використано при реконструкції та заміні застарілих терміналів релейного захисту.

Результати отримані в дисертаційній роботі використовуються в процесі експлуатації релейного захисту синхронних генераторів у ДП «НАЕК «Енергоатом» ВП «Хмельницька атомна електростанція» та в навчальному процесі у

Вінницькому національному технічному університеті при вивченні дисципліни «Релейний захист і автоматика електричних станцій». Очікується, що це забезпечить підвищення рівня технічної підготовки персоналу станції та якості експлуатації релейного захисту, а також розширить знання студентів у цій галузі.

Особистий внесок здобувача. В наукових роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертаційного дослідження належать: у [40] – виконано аналіз можливих причин виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора та процесів, що відбуваються під час однофазних замикань на землю; у [41] – запропонована функціональна схема пристрою захисту обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором; у [42] – побудовано математичну модель сигналів у реагуючому органі пристрою захисту і отримано відповідні залежності для різних типів синхронних генераторів; у [43] – запропоновано алгоритм пошуку пошкодження в схемах запропонованих пристроїв захисту; у [44] – виконано аналіз властивостей запропонованого захисту; у [45] – визначено сукупність контрольованих параметрів та параметри спрацювання захисту; у [46] – запропонована принципова схема пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, з паралельною обробкою сигналів контрольованих параметрів; у [47] – запропоновано пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який реагує на струм в місці виникнення пошкодження; у [48] – запропоновано комбінований метод накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [40–48], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні результати кандидатської дисертації доповідались на III міжнародній науково – технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (ВНТУ, м. Вінниця, 2015р.).

Публікації. Основні положення дисертаційного дослідження опубліковані дисертантом у співавторстві у 9-ти публікаціях: 5-ох статтях у наукових фахових виданнях, 1-й статті у зарубіжному виданні, яке зареєстроване в міжнародних наукометричних базах, 1-й статті у науковому виданні України, яке зареєстроване в міжнародних наукометричних базах, 1-й тезі доповіді на конференції, отримано 1 патент на корисну модель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 53528 Україна, Н02Н03/36. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю в електромережі з ізольованою нейтраллю [Текст] / Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Мединський Р. В., Равлик О. М., Горбатський А. А., Засідкович Н. Р.; заявники Національний університет «Львівська політехніка» - 2002075692; Заявл. 10.07.2002; Опубл. Бюл. №1, 15.01.2003.
2. Пат. 77309 Україна, МПК Н02Н 3/17. Пристрій для захисту від однофазних замикань на землю у трифазній електричній мережі з ізольованою нейтраллю [Текст] / Кошман В.І., Кузнецов В. Г., Сабарно Л. Р., Севастюк І. М., Трач І. В.; заявники Інститут електродинаміки НАН України – 200412100626; Заявл. 23.12.2004; Опубл. Бюл. №11, 15.11. 2006.
3. Пат. 78119 Україна, МПК Н02Н 3/17. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю в трифазній мережі змінного струму і пристрій для його реалізації [Текст] / Кошман В. І., Кузнецов В. Г., Сабарно Л. Р., Севастюк І. М., Трач І. В.; заявники Інститут електродинаміки НАН України – а200503923; Заявл. 25.04.2005; Опубл. Бюл. №2, 15.02.2007.
4. Кутін, В. М. Контроль провідності ізоляції фази відносно землі в трифазних системах з ізольованою нейтраллю [Текст] / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– Хмельницький, 2002.– №2.– С.60-65. – ISSN 2219-9365.
5. Кутін, В. М. Визначення умов працездатності ізоляції в розподільних мережах напругою 6-10 кВ [Текст] / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко, В. В. Луцяк. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць.– Кременчук, 2003.– №6(23).– С.34-37. – ISSN 1995-0519.
6. Кутін, В. М. Система контролю працездатності ізоляції розподільної мережі напругою 6-10 кВ [Текст] / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2005.– №7.– С.123-128. – ISSN 2306-5451.

7. Кутін, В. М. Визначення технічного стану ізоляції розподільних мереж напругою 6-10 кВ з урахування впливу несиметрії параметрів ізоляції відносно землі [Текст] / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. // Вісник Вінницького політехнічного інституту.– Вінниця, 2005.– №6.– С.142-145. – ISSN 1997-9266.

8. Кутін, В. М. Вибір сукупності діагностичних показників для оцінки працездатності ізоляції відносно землі мережі 6-35 кВ [Текст] / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць.– Кременчук, 2006.– №3(38).– С.96-99. – ISSN 1995-0519.

9. Назаров, В. В. О режимах нейтрали в сетях 6-35 кВ[Текст] / В. В. Назаров.// Промышленная энергетика. – М.: НТФ «Энергопрогрес», 1993. – № 6. – С. 33-36. – ISSN 0033-1155.

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

11. Сивокобыленко, В. Ф. Ограничение перенапряжений при замыканиях на землю в системах электроснабжения собственных нужд электростанций [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко, В. В. Музалев, С. Махинда. // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Дон ДТУ, 1998. – №2. – С. 229-233. – ISSN 2074-2630.

12. Сивокобыленко, В. Ф. Дополнительная резервная защита мощных блоков генератор-трансформатор [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко, Н. В. Гребченко, А. С. Апухтин, В. В. Зубашенко // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Дон ДТУ, 2000. – № 21. – С.84-88. – ISSN 2074-2630.

13. Сивокобыленко, В. Ф. Определение параметров эквивалентных схем замещения турбогенераторов для расчета на математических моделях [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко, М. А. Меженикова // Збірник наукових праць Дон ДТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Дон ДТУ, 2000. – № 17. – С.38-41. – ISSN 2074-2630.

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

15. Сивокобыленко, В. Ф. Математичне моделювання в електротехніці і енергетиці. Навчальний посібник [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко – Донецьк, 2005. – 350 с.

16. Пат. 73589 Україна, МПК Н02Н 3/17. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко, О. В. Ковязін; заявники Державний вищий навчальний заклад Донецький національний технічний університет – u 2012 04517; Заявл. 10.04.2012; Опубл. Бюл. №18, 25.09.2012.

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

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

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

20. Вавин, В. Н. Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор [Текст] / 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 [Текст] / Р. А. Вайнштейн, В. И. Лапин, А. М. Наумов, А. В. Доронин // Электрические станции – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2009. – №12. – С. 26-30. – ISSN 0201-4564.

22. Вайнштейн, Р.А. Условие функционирования защиты от замыканий на землю в сетях с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях [Текст] / Р. А. Вайнштейн, С. Н. Пашковский, Е. А. Понамарев, В. В. Шестакова // Электричество. – М., 2009. – №12. – С. 26-32. – ISSN 0013-5380.

23. Вайнштейн, Р. А. Повышение надежности защиты генераторов от замыканий на землю, основанной на наложении вспомогательного тока с частотой 25 Гц [Текст] / Р. А. Вайнштейн, Р. Б. Тентиев, С. М. Юдин // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2008. – №4. – С. 96-100. – ISSN 2500-1019.

24. Вайнштейн, Р. А. Качественные признаки для выявления поврежденного элемента в электроустановках с компенсацией емкостного тока при дуговых перемежающихся замыканиях [Текст] / Р. А. Вайнштейн, С. Н. Пашковский, Е. А. Понамарев, С. М. Юдин // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – Казань, 2008. – №7-8/I. – С.136-143. – ISSN 1998-9903.

25. Вайнштейн, Р. А. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали [Текст] / Р. А. Вайнштейн, В. В. Шестакова, С. М. Юдин, Т. С. Гурин // Известия ВУЗов, Электромеханика. – Новочеркасск, 2006. – №3. – С.115-118. – ISSN 0136-3360.

26. Вайнштейн, Р. А. Режимы заземления нейтрали в электроэнергетических системах: учебное пособие [Текст] / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, В. В. Шестакова – Томск: Издательство ТПУ, 2006. – 118 с.

27. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

28. Федосеев, А. М. Релейная защита электро-энергетических систем [Текст] / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с. – ISBN 5-283-01171-2.

29. Цапенко, Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / Е. Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

30. Чернобровов, Н. В. Релейная защита [Текст] / Н. В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974. – 680 с.

31. Шабад, М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / М. А. Шабад. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 64 с. – ISSN 0013-7278.

32. Шалин, А. И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем [Текст] / А.И. Шалин. – Новосибирск, НГТУ, 2002. - 384 с.

33. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита [Текст] / Э. М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с. – ISBN 978-5-283-03256-6.

34. Blackburn, J. Lewis. Protective Relaying: Principles and Applications [Text] / J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin. – Taylor & Francis Group, 2006. – 638 p. - ISBN 1-57444-716-5.

35. Loos, Matthieu. Single Phase to Ground Fault in Compensated Network [Text] / Matthieu Loos. - Lambert Academic Publishing, 2014. - 228 p. – ISBN 978-3-659-58387-2.

36. Reimert, Donald. Protective Relaying for Power Generation Systems [Text] / Donald Reimert. – CRC Press, 2005. – 592 p. – ISBN 9780824707002.

37. Sleva, Anthony M. Protective Relay Principles [Text] / Anthony M. Sleva. – CRC Press, 2009. – 368 p. – ISBN 9780824753726.

38. Phadke, Arun G. Computer Relaying for Power Systems. 2nd ed. [Text] / Arun G. Phadke, James S. Thorp – Wiley Language, 2009. – 344 p.– ISBN 978-0470057131.

39. Horowitz, Stanley H. Power System Relaying [Text] / Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke. – Research Studies Press Limited, 2008. – 331 p. – ISBN 978-0-470-05712-4.

40. Кутін, В.М. Дослідження технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора в процесі його експлуатації електрообладнання [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія "Електротехніка і енергетика".-2013.-№2(15)–С. 151 – 155. – ISSN 2074-2630.

41. Кутін В.М. Удосконалення засобів захисту від однофазних замикань на землю в обмотці статора синхронного генератора електрообладнання [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи.-2013. - №2(22). Частина 2.–С.393–396. – ISSN 2072-2052.

42. Кутін, В.М. Моделювання струму в реагуючому органі пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором електрообладнання [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту.-2013. - №6 –С. 48 – 51. – ISSN 1997-9266.

43. Кутін, В. М. Алгоритм пошуку пошкодження в пристроях захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – №6 – С. 231–238. – ISSN 2307-5732.

44. Кутін, В. М. Вдосконалення захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Нафтогазова енергетика. – №2 – С.47–56. – ISSN 1993-9868.

45. 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 [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Молодий вчений. – 2014. – №12 – С.13–15. – ISSN 2304-5809.

46. Vasyl Kutin. Protection against single phase ground fault of the stator winding synchronous generator [Text] / Vasyl Kutin, OleksandrShpachuk // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. – 2016.– №1-2 – P.118–121. – ISSN 2310-5607.

47. Кутін, В. М. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // III Міжнародна науково – технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками», 14 – 15 жовтня 2015 р., Вінниця, Україна: тези доп. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2015 – С. 37.

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

49. Gieras, Jacek F. Electrical Mashines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion [Text] / Jacek F. Gieras. - CRC Press, 2016. - 434 p. - ISBN 9781498708838.

50. Boldea, Ion. Electric Mashines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB [Text] / Ion Boldea, Lucian Nicolae Tutelea. - CRC Press, 2009. - 792 p. - ISBN 9781420055726.

51. Извеков, В. И. Проектирование турбогенераторов [Текст] / В. И. Извеков, Н. А. Серихин, А. И. Абрамов. – М.: МЭИ, 2005. – 440 с. – ISBN 5-7046-1193-1.

52. Boldea, Ion. Synchronous Generators [Text]/ IonBoldea. - CRC Press, 2015. - 478 p.- ISBN 9781498723565.

53. Brandão, Faria. A. Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering [Text] / [J. A.Brandão Faria.](#) – Wiley-IEEE Press, 2008. – 420 p. – ISBN978-0-470-72709-6.

54. Хуторецкий, Г. М. Проектирование турбогенераторов [Текст] / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

55. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] /А. И. Вольдек – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

56. Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis [Text] / Hamid A. Toliyat, Subhasis Nandi, Seungdeog Choi, Homayoun Meshgin-Kelk. - CRC Press, 2012. – 272 p. – ISBN 9780849370274.

57. Gross, Charles A. Electric Machines [Text] / Charles A. Gross. – CRC Press, 2006. – 466p. – ISBN 9780849385810.

58. Абрамов, А. И. Расчет и конструкция гидрогенераторов [Текст] / А. И. Абрамов, А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш.шк., 1964. – 258 с.

59. Абрамов, А. И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А. И. Абрамов, А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш.шк., 2001. – 389 с. – ISBN 5-06-004090-9.

60. Домбровский, В. В. Гидрогенераторы [Текст] / В. В. Домбровский, А. А. Дукштау, Г. Б. Пинский. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 366 с.

61. Домбровский, В. В. Проектирование гидрогенераторов [Текст] / В. В. Домбровский, Н. П. Иванов. – Л.: Энергия, 1968. – 364 с.
62. Boldea, Ion. Variable Speed Generators [Text] / Ion Boldea. – CRC Press, 2015. – 580 p. – ISBN 9781498723572.
63. Васильев, А. А. Электрическая часть станций и подстанций [Текст] / А. А. Васильев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 551 с.
64. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций [Текст] / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
65. Грудинский, П. Г. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций [Текст] / П. Г. Грудинский, С. А. Мандрыкин, М. С. Улицкий. – М.: Энергия, 1974. – 575 с.
66. Sadhu, Pradip Kumar. Elements of Power Systems [Text] / Pradip Kumar Sadhu, Soumya Das. – CRC Press, 2015. – 532 p. – ISBN 9781498734462.
67. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
68. Тареев, Б. М. Электротехнические материалы [Текст] / Б. М. Тареев. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1952. – 288 с.
69. Темофеев, И. А. Электротехнические материалы и изделия: Учебное пособие [Текст] / И. А. Темофеев. – СПб.: Лань, 2012. – 272 с. – ISBN 978-5-8114-1304-1.
70. Бородулин, В. Н. Конструкционные и электротехнические материалы [Текст] / В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, С. Я. Попов. – М.: Высш. шк., 1990. – 296 с. – ISBN 5-06-001536-X.
71. Фридлянд, М. Б. Электротехнические материалы для ремонта электрических машин и трансформаторов [Текст] / М. Б. Фридлянд. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.
72. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов [Текст] / И. М. Бортник, И. П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин; под ред. И. П. Верещагина, В. П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с. – ISBN 5-28366-01116-X.

73. Техника высоких напряжений [Текст]/ Д. В. Разевиг, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь, Е. Я. Рябкова. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
74. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах [Текст]/ В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
75. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы [Текст] / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
76. Леонтьев, В. О. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник [Текст] / В. О. Леонтьєв, С. В. Бєвз, В. А. Видмиш. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 122 с.
77. Городжа, А. Д. Матеріалознавство та електротехнічні матеріали : Підручник [Текст] / [А. Д. Городжа](#), [В. О. Лемешко](#), [В. С. Ловейкін](#).– К.: КНУБА, 2002.– 280 с.
78. Abdel-Salam, Mazen. High-Voltage Engineering: Theory and Practice. [Text] / Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, Roshdy Radwan. – CRC Press, 2000. – 742 p. - ISBN 9780824704025.
79. Stone, Greg C. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair [Text] / Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. – Wiley-IEEE Press, 2014. – 672 p. – ISBN 978-1-118-05706-3.
80. Arora, Ravindra. High Voltage and Electrical Insulation Engineering [Text] / Ravindra Arora, Wolfgang Mosch. – Wiley-IEEE Press, 2011. – 394 p. – ISBN 978-1-118-00896-6.
81. Голоднова, О.С. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения [Текст] / О.С. Голоднова. – М.: ИПК-госслужбы, 2005. – 93 с. – ISBN 5-8081-0197-2.
82. Анормальные режимы работы крупных синхронных машин [Текст] / Е. Я. Казовский, Я. Б. Данилевич, Э. Г. Кашарский, Г. В. Рубисов. – Л.: Наука, 1969. – 429 с.
83. Коган, Ф. Л. Анормальные режимы мощных турбогенераторов [Текст] / Ф. Л. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 191 с.

84. Горев, А. А. Переходные процессы синхронной машины [Текст] / А. А. Горев. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1950. – 551 с.
85. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока [Текст] / А. И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
86. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы [Текст] / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 519 с.
87. Дьяченко, М. Д. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение) : учеб. Пособие [Текст] / М. Д. Дьяченко, С. К. Поднебенная; М-во образования и науки Украины, Приазов. гос. техн. ун-т. – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – 302 с.
88. Копьев, В. Н. Релейная защита. Принципы выполнения и применения [Текст] / В. Н. Копьев – Томск: Издательство ЭЛТИ ТПУ, 2006. – 143 с.
89. Исмагилов, Ф. Р. Микропроцессорные устройства релейной защиты энергосистем. Учебное пособие [Текст] / Ф. Р. Исмагилов, Ф. С. Ахматнабиев – Уфа: УГАТУ, 2009. – 171 с. – ISBN 978-5-4221-0025-5.
90. Басс, Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем [Текст] / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 296 с. – ISBN 5-7046-0779-9.
91. Дьяков, А. Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем [Текст] / А. Ф. Дьяков, Н. И. Овчаренко – М.: ИД МЭИ, 2010. – 336 с.
92. Bakshi, U. A. Protection and Switchgear [Text] / U. A. Bakshi, M. V. Bakshi – Technical Publications, 2006 - 395 p. – ISBN 81-8431-019-6.
93. Elmore, Walter A. Protective Relaying Theory and Applications [Text] / Walter A. Elmore. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 410 p. – ISBN 0-8247-0972-1.
94. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем [Текст] / С. Бернас, З. Цёк. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
95. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: Учебное пособие [Текст] / Г.И. Атабеков. – СПб.: Лань, 2009. – 592 с. – ISBN 978-5-8114-0800-9.

96. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1996. – 638 с. – ISBN 5-06-002160-2.
97. Основы теоретической электротехники: Учебное пособие [Текст] / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А.Н. Белянин. – СПб.: Лань, 2008. – 592 с. – ISBN 978-5-8114-0781-1.
98. Johnson, Don H. Fundamentals of Electrical Engineering I. [Text] / Don H. Johnson. – Connexions, 2013. – 292 p.
99. Baker, Thomas E. Electrical Calculations and Guidelines for Generating Stations and Industrial Plants [Text] / Thomas E. Baker. - CRC Press, 2012. – 274 p. – ISBN 978-1-4398-5521-8.
100. Alexander, Charles K. Fundamentals of Electric Circuits [Text] / Charles K. Alexander, Matthew N. O. Sadiku. – The McGraw-Hill Companies, 2013. - 905 p. – ISBN 978-0-07-338057-5.
101. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] / В. А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
102. Переходные процессы в системах электроснабжения [Текст] / В. Н. Винославский, Г. Г. Пивняк, Л. И. Несен, А. Я. Рыбалко, В. В. Прокопенко – К.: Высш.шк., 1989. – 422 с. – ISBN 5-1-001185-0.
103. Шуин, В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ[Текст] / В. А. Шуин, А. В. Гусенков. – М.:НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 104 с. – ISSN 0013-7278.
104. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебное пособие для вузов [Текст] / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с. – ISBN 5-283-01086-4.
105. Гук, Ю.Б. Проектирование электрической части станций и подстанций [Текст]/ Ю. Б. Гук, В.В. Кантан, С. С. Петрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
106. Чунихин, А. А. Аппараты высокого напряжения: Учебное пособие для вузов [Текст] / А. А. Чунихин, М. А. Жаворонков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

107. Голубцов, М. С. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному [Текст] / М. С. Голубцов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с. – ISBN 5-98003-034-4.

108. Гребнев, В. В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel [Текст] / В. В. Гребнев. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 176 с. – ISBN 5-93037-091-5.

109. Хартов, В. Я. Микроконтроллеры AVR. Практикум для начинающих [Текст] / В. Я. Хартов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с. – ISBN 978-5-7038-3051-2.

110. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники [Текст] / А. В. Нетушил, П. В. Ермуратский, А. А. Косякин, В. С. Литвин. – М.: Высш. шк., 1986. – 248 с.

111. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник [Текст] / 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.

112. Agarwal, Anant. Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits [Text] / Anant Agarwal, Jeffrey H. Lang. – Elsevier Inc., 2005. – 984 p. – ISBN 1-55860-735-8.

113. Панфилов, В. А. Основы метрологии и электроизмерительной техники [Текст] / В. А. Панфилов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. – 88 с. – ISSN 0013-7278.

114. Тартаковский, Д. Ф. Метрология стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов [Текст] / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с. – ISBN 5-06-003796-7.

115. Раннева, Г. Г. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для студентов высших учебных заведений [Текст] / Г. Г. Раннева. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с. – ISBN 5-7695-2221-6.

116. Глинкин, Е. И. Микропроцессорные средства: монография [Текст] / Е. И. Глинкин, Б. И. Герасимов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 144 с. – ISBN 978-5-8265-0634-9.

117. Мейзда, Ф. Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений [Текст] / Ф. Ф. Мейзда. – М.: Мир, 1990. – 535 с. – ISBN 5-03-001510-8.
118. Овчаренко, Н. И. Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики [Текст] / Н. И. Овчаренко. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 80 с. – ISSN 0013-7278.
119. Богатырев, Л. Л. Релейная защита электроэнергетических систем [Текст] / Л. Л. Богатырев, Л. Ф. Богданова, А. В. Паздрин – Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 112 с.
120. Овчаренко, Н. И. Микропроцессорная автоматика синхронных генераторов и компенсаторов [Текст] / Н. И. Овчаренко. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 96 с. – ISSN 0013-7278.
121. Семенов, В. А. Противоаварийная автоматика в ЕЭС России [Текст] / В. А. Семенов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. – 104 с. – ISSN 0013-7278.
122. Антонов, В. И. Методы обработки цифровых сигналов энергосистем [Текст] / В. И. Антонов, Н. М. Лазарева, В. И. Пуляев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 84 с. – ISSN 0013-7278.
123. Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем [Текст] / Н. И. Овчаренко – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с. – ISBN 5-93196-020-1.
124. Шмурьев, В. Я. Цифровые реле защиты [Текст] / В. Я. Шмурьев. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 1999. – 56 с. – ISSN 0013-7278.
125. Кутін, В. М. Діагностика електрообладнання. Типові задачі та лабораторний практикум : навчальний посібник [Текст] / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 148 с.
126. Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики [Текст] / А. П. Кузнецов, В. Ю. Лукоянов, А. Н. Бирг, В. Н. Дмитриев, В. А. Герасимов, С. А. Кузьмин. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. – 80 с. – ISSN 0013-7278.
127. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для студентов высш.учеб.заведений [Текст] / Г. Г. Раннев, В. А. Суругина,

В. И. Калашников, С. В. Нефедов, А. П. Тарасенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с. – ISBN 5-7695-2221-6.

128. Боровиков, С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. Пособие [Текст]/ С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Н. Троян; [под ред. С. М. Боровикова]. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с. – ISBN 978-985-488-480-6.

129. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник [Текст] / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219 с.

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