

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Д.Ю. Гулов, А.М. Давлатов, Н.Х. Одинаев, Р.А. Кахоров, А.С. Амирханов

Институт энергетики Таджикистана

В основу разрабатываемой системы диагностики коротких замыканий легла гипотеза о том, что установка дополнительной информационной обмотки позволяет регистрировать магнитную асимметрию машины, возникающую в аварийных условиях. Теоретический фундамент данного подхода базируется на классическом методе симметричных составляющих. Однако практическая реализация сопряжена с рядом технических неопределенностей. В частности, эффективность метода может снижаться из-за факторов, не учтенных в исходной теоретической модели: нелинейного влияния насыщения магнитной цепи (нарушающего принцип суперпозиции) и воздействия высших гармонических составляющих магнитного поля. Для верификации предложенной концепции и оценки влияния указанных факторов были проведены на действующем образце генератора.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянный магнит, межвитковое короткое замыкание.

МУАЙЯНКУНИИ РАСИШИ БАИНИ ПЕЧИДАҲО ДАР ҒАЛТАКИ ГЕНЕРАТОРИ СИНХРОНИЙ

Д.Ю. Гулов, А.М. Давлатов, Н.Х. Одинаев, Р.А. Қаҳоров, А.С. Амирханов

Дар асоси ташхиси расиши кутӯхи байни печидаҳо, ки тибқи он насби печаҳои иттилоотии иловагӣ имкон медиҳад, ки асимметрияи магнитии мошинро, ки дар шароитҳои садамавӣ ба вуҷуд меояд, қайд кунад. Заминаи назариявии равиши мазкур ба усули классикии ташкилдихандаҳои симметрӣ асос ёфтааст. Вале иҷрои амалии он бо як қатор номуайяниҳои техникӣ алоқаманд мебошад. Аз ҷумла, самаранокии усул метавонад аз ҳисоби омилҳои, ки дар модели назариявии аввалия ба назар гирифта нашудаанд, коҳиш ёбад: таъсири ғайрихаттӣ сершавии занҷири магнитӣ (вайронкунандаи принсипи суперпозитсия) ва таъсири ташкилдихандаҳои гармоникаҳои олиӣ майдони магнитӣ. Бо мақсади санҷиши қобилияти кори усули мазкур ва арзёбии дараҷаи таъсири сершавии магнитӣ ва гармоникаҳои оӣ, таҷқиқот дар дастгоҳи воқеии генератор амалӣ карда шуд.

Калидвожаҳо: генератори синхронӣ, магниту доими, расиши кутӯхи байни печидаҳо.

DETECTION OF INTERTURN SHORT CIRCUIT FAULTS IN THE WINDING OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

D.Yu. Gulov, A.M. Davlatov, N.Kh. Odinaev, R.A. Kakhorov, A.S. Amirkhanov

The short-circuit diagnostic system being developed is based on the hypothesis that installing an additional information winding allows for the detection of machine magnetic asymmetry that occurs under emergency conditions. The theoretical foundation of this approach is based on the classical method of symmetrical components. However, practical implementation is associated with a number of technical uncertainties. In particular, the method's effectiveness may be reduced by factors not considered in the original theoretical model: the nonlinear effect of magnetic circuit saturation (which violates the superposition principle) and the influence of higher harmonic components of the magnetic field. To verify the proposed concept and assess the impact of these factors, tests were conducted on a working generator prototype.

Keywords: synchronous generator, permanent magnet, interturn short circuit.

Введение

Своевременная диагностика начальных дефектов синхронных генераторов (СГ) выступает критическим аспектом их надежной эксплуатации [1, 2]. Игнорирование первичных признаков неисправности обмотки ведет к термическому разрушению изоляции и плавлению проводников. Данные процессы провоцируют возникновение высокочастотных электромагнитных колебаний в контуре возбуждения, что, в свою очередь, вызывает электрический пробой в зонах с наименьшей диэлектрической прочностью [3]. Кроме того, развитие дефекта нарушает баланс магнитных сил, действующий на ротор. Возникающая вследствие этого механическая асимметрия перегружает шейку вала, способствуя образованию микротрещин, наличие которых делает продолжение работы агрегата технически невозможным.

Классификация современных подходов к дефектоскопии витковых замыканий включает тепловой, параметрический, вибрационный и частотный анализы, а также методы активного зондирования. Несмотря на многообразие, традиционные решения — например, применение индукционных датчиков [4] или подача зондирующих импульсов на обмотку ротора [5-10] — обладают рядом ограничений. Ключевыми недостатками являются их неполная диагностическая способность

и потребность в интеграции вспомогательной измерительной аппаратуры непосредственно в узлы синхронного генератора, что усложняет конструкцию агрегата.

Постановка задачи

Хотя теоретическая база исследования ориентирована на вентильные генераторы с постоянными магнитами, разработанный диагностический алгоритм универсален, так как анализирует состояние якорной обмотки и инвариантен к типу системы возбуждения. В целях оптимизации сроков экспериментальной проверки в качестве объекта исследования был использован лабораторный стенд на базе генератора автотракторного электрооборудования. Данная электрическая машина характеризуется когтеобразной магнитной системой с электромагнитным возбуждением, а ее статорная цепь выполнена по классической трехфазной схеме с соединением обмоток в «треугольник».

Генератор имеет следующие паспортные данные (табл. 1):

Таблица 1 – Основные параметры генератора

Номинальное напряжение, В	28
Максимальный выпрямленный ток, А	47
Масса, кг	10
Мощность, кВт	1316
Частота вращения вала без нагрузки, об/мин	1200
Частота вращения вала, об/мин при токе, А	2100/30
Длина, мм	230
Диаметр, мм	174
Применяемость	а/м КраЗ с дв. ЯМЗ 236, 238

Объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран трехфазный синхронный генератор модели Г288Е.3701. Данная электрическая машина оснащена интегрированным выпрямительным блоком и рассчитана на эксплуатацию в буферном режиме с аккумуляторной батареей в энергосетях тяжелой техники (в частности, автомобилей КраЗ с силовыми агрегатами ЯМЗ-236/238). Устройство адаптировано для работы в широком диапазоне климатических условий. Важно отметить, что, являясь серийным изделием массового производства, статор данного генератора конструктивно не предусматривает пазов для размещения дополнительной информационной обмотки (рис. 1).

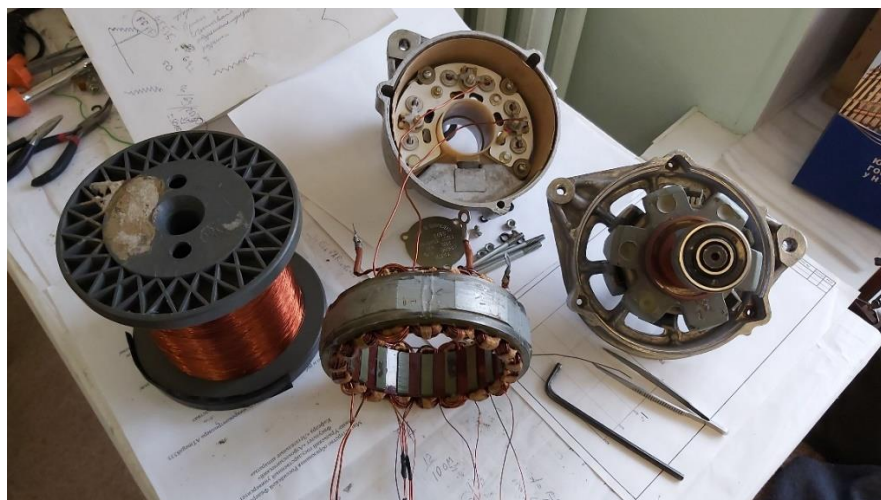


Рисунок 1 – Основные части испытуемого генератора

Тем не менее, анализ плотности намотки 18-зубцового статора позволил выявить незанятые участки в пазах. Этого пространства достаточно для размещения проводника диаметром 0,15 мм, выполняющего функцию информационной обмотки (рис. 2).



Рисунок 2 – Якорная обмотка генератора

В рамках подготовки к экспериментальным исследованиям была спроектирована и изготовлена трехфазная информационная обмотка. Каждая секция данной обмотки включает в себя 15 витков, что в суммарном исчислении обеспечивает наличие 90 витков в каждой фазе.

Для обеспечения аутентичности условий эксперимента конфигурация информационной обмотки повторяла геометрию силовой: шаг по пазам был принят равным единице. Для гибкости измерений выводы фаз были вынесены за пределы корпуса, что позволяло оперативно менять схему их соединения («звезда» или «треугольник»).

Процесс моделирования межвитковых повреждений был реализован путем интеграции в пазы фазы А контрольных петель из провода диаметром 1,5 мм, что полностью соответствует сечению штатной якорной обмотки. В ходе испытаний последовательно имитировались режимы с различной степенью деградации: замыкание одного, трех и пяти витков соответственно.

После сборки генератор был собран в испытательный стенд (рис. 3.).

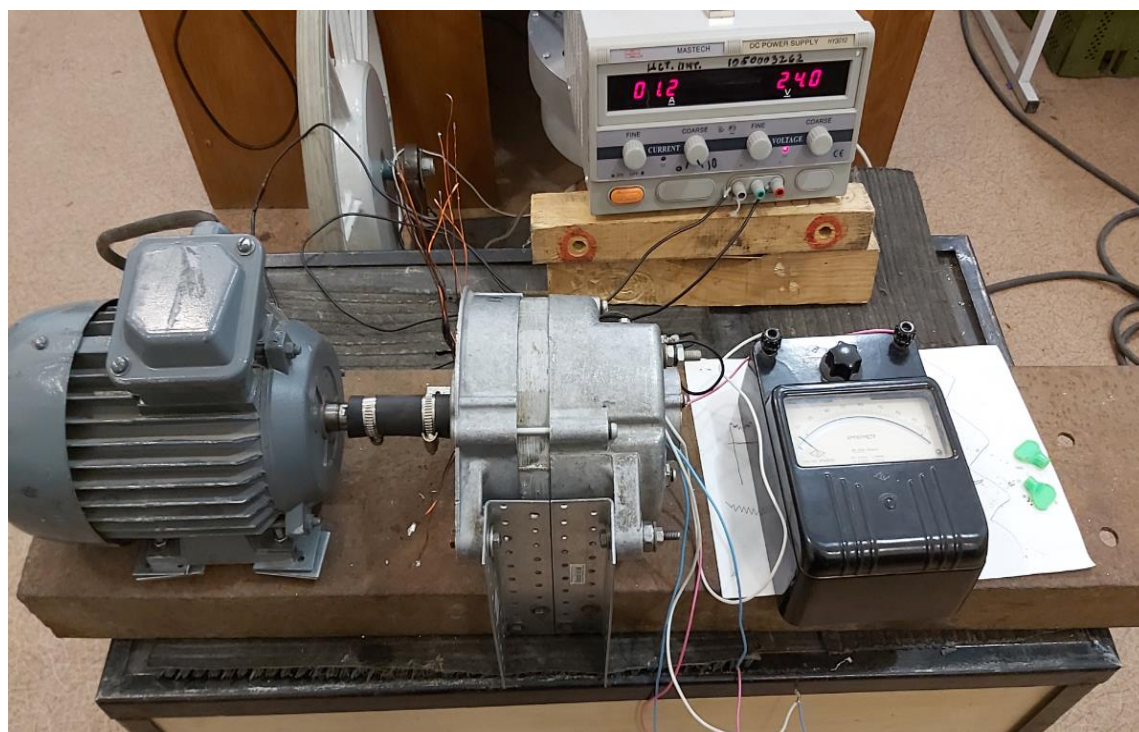


Рисунок 3 – Стенд для испытания генератора в режиме межвитковых замыканий

Функцию первичного двигателя в составе испытательного стенда выполняла асинхронная электрическая машина с номинальной синхронной скоростью 1500 об/мин. Энергетический режим системы возбуждения характеризовался подачей на обмотку напряжения 24 В, при этом величина потребляемого тока стабилизировалась на отметке 1,2 А, что зафиксировано на осциллограмме (рис. 4).

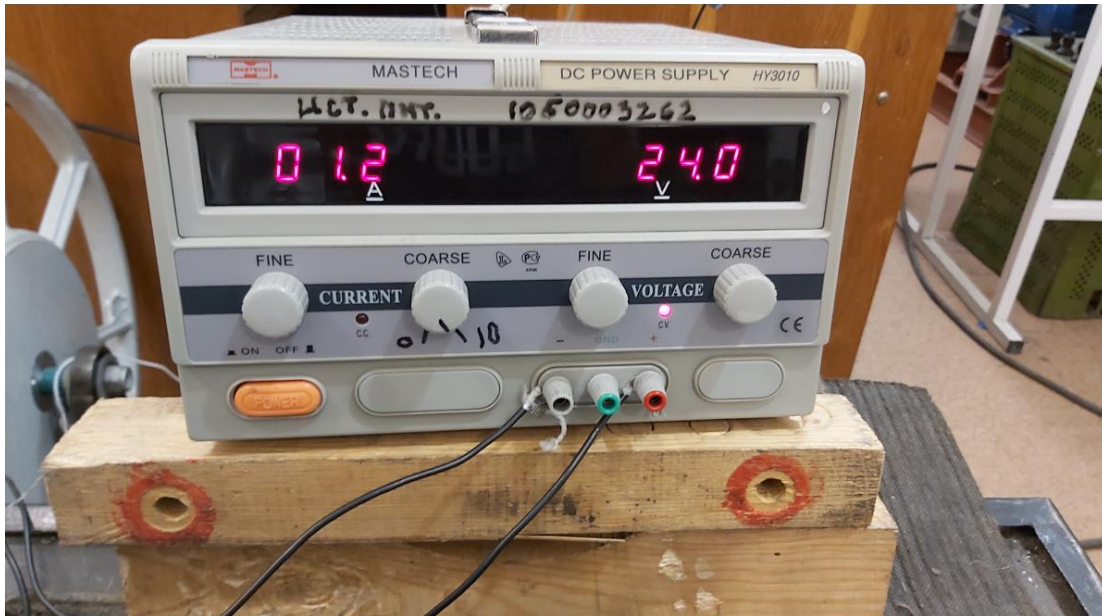


Рисунок 4 – Питание цепи возбуждения генератора источником постоянного тока

Выбранные параметры цепи возбуждения практически соответствуют паспортным значениям для данного типа машин. С целью обеспечения высокой достоверности результаты измерения проводились с использованием контрольно-измерительной аппаратуры (цифровой и аналогового типов) класса точности 0,5. Экспериментальные исследования ограничивались режимом холостого хода при отсутствии внешней электрической нагрузки.

В данном разделе представлены данные, полученные в ходе исследования межвитковых повреждений при условии коммутации измерительной обмотки по схеме «треугольник». Общая конфигурация измерительной цепи и порядок соединений, использованные в ходе эксперимента, отражены на рис. 5. Такой подход к организации измерений позволил зафиксировать специфические изменения электрических параметров, характерные для короткозамкнутых витков.

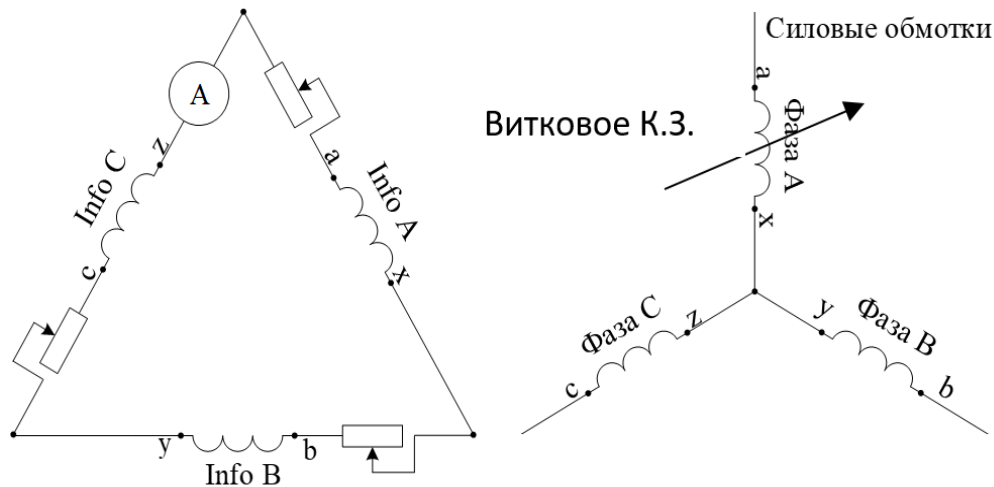


Рисунок 5 – Схема испытания генератора в режиме виткового короткого замыкания при соединении информационной обмотки в треугольник

В режиме холостого хода с помощью прецизионных переменных резисторов ток в контуре измерительной обмотки был сбалансирован до нулевого значения. В дальнейшем проводилась регистрация тока короткого замыкания при помощи миллиамперметра для различных сценариев повреждения: при замыкании одного, трех и пяти витков (рис. 6). Полученные данные подтвердили высокую чувствительность разработанной информационной обмотки к возникновению локальных межвитковых дефектов в якорной цепи.

Амперметр показал следующие результаты:

- 1 короткозамкнутый виток – 31 мА (рис. 4.2.3);
- 3 короткозамкнутых витка – 35 мА (рис. 4.2.4);
- 5 короткозамкнутых витков – 36 мА (рис. 4.2.5).

Короткозамкнутый виток

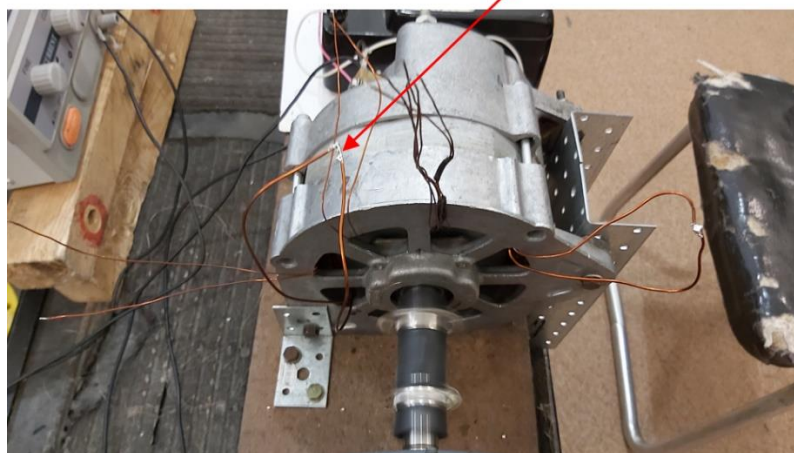


Рисунок 6 – Формирование короткозамкнутого витка якорной обмотки



Рисунок 7 – Показания амперметра при коротком замыкании 1 витка



Рисунок 8 – Показания амперметра при коротком замыкании 3 витков



Рисунок 9 – Показания амперметра при коротком замыкании 5 витков

Экспериментально зафиксировано интенсивное тепловыделение в зоне дефекта: температура короткозамкнутых витков превышала 100 °С уже в течение первых секунд процесса. Анализ полученных данных подтвердил, что конфигурация информационной обмотки по схеме «треугольник» обладает высокой чувствительностью к электромагнитной асимметрии, инициированной межвитковыми замыканиями.

Дальнейший этап исследований был посвящен изучению характеристик генератора при перекоммутации фаз измерительной обмотки в «звезду». Методика проведения данного цикла испытаний опиралась на принципиальную электрическую схему, представленную на рис. 10.

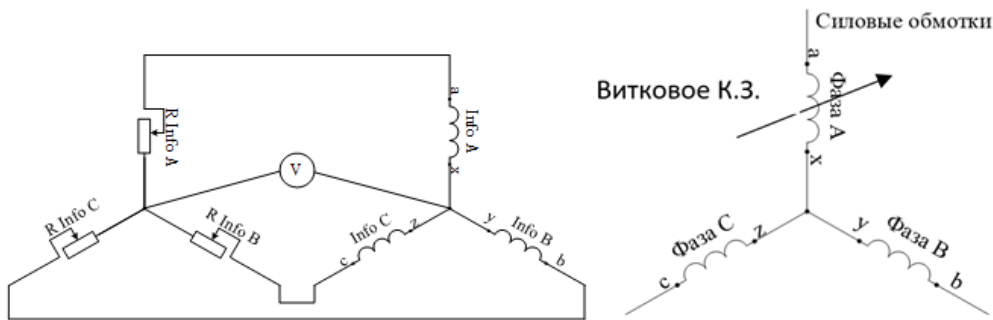


Рисунок 10 – Схема испытания генератора в режиме виткового короткого замыкания при соединении информационной обмотки в звезду

В качестве нагрузочных элементов измерительного контура были применены переменные резисторы, суммарное сопротивление которых составило 500 Ом. Начальный этап эксперимента в режиме холостого хода заключался в прецизионной балансировке системы: путем варьирования сопротивлений разность потенциалов между нейтральными точками измерительной цепи сводилась к минимуму (практически до нулевого значения). В дальнейшем фиксировалось изменение напряжения между нейтральными при последовательной имитации витковых замыканий (1, 3 и 5 витков соответственно), результаты чего отражены на рис. 8. Полученные данные подтвердили адекватность отклика информационной обмотки на возникновение электромагнитной асимметрии в статоре.

Милливольтметр показал следующие результаты:

- 1 короткозамкнутый виток – 72 мВ;
- 3 короткозамкнутых витка – 75 мВ;
- 5 короткозамкнутых витков 76 мВ.

В процессе моделирования аварийных режимов наблюдался интенсивный рост температуры в короткозамкнутых контурах, которая за считанные секунды превышала порог в 100 °С. Это свидетельствует о значительных энергетических потерях в месте возникновения дефекта. Обобщая результаты эксперимента, можно утверждать, что конфигурация информационной обмотки по схеме «звезда» является эффективным индикатором магнитной асимметрии. Данная схема позволяет достоверно фиксировать искажения основного магнитного потока, возникающие при межвитковых замыканиях.

Заключение

Для верификации предложенных теоретических положений был спроектирован и реализован автоматизированный измерительный комплекс, функционал которого ориентирован на непрерывный мониторинг состояния обмоток и идентификацию межвитковых дефектов. Натурные испытания опытного образца позволили экспериментально обосновать эффективность применения информационной обмотки: зафиксирована четкая корреляция между возникновением короткозамкнутых контуров и изменением выходных параметров системы. Обобщение полученных данных позволяет сформулировать ряд ключевых выводов.

1. Апробированная архитектура и программно-аппаратные алгоритмы автоматизированной системы могут послужить фундаментом для создания промышленных диагностических комплексов. Внедрение подобных решений на объектах малой гидроэнергетики (мини-ГЭС) позволит существенно повысить надежность эксплуатации генераторных установок за счет непрерывного мониторинга состояния обмоток.

2. Практическое применение информационной обмотки в качестве селективного датчика требует обязательной процедуры предварительной балансировки. Данная необходимость обусловлена наличием естественной технологической асимметрии магнитной и электрической систем машины. Процесс прецизионной настройки критически важен для обеих исследованных конфигураций — как при соединении фаз «звездой», так и «треугольником».

3. Установлено, что при коммутации информационной обмотки по схеме «треугольник» критерием возникновения дефекта служит появление токов нулевой последовательности. Этот физический эффект инициируется локальным искажением магнитного поля, вызванным протеканием значительных токов в короткозамкнутых контурах якорной цепи.

4. В случае использования схемы «звезда» индикатором межвиткового замыкания выступает смещение потенциала нейтрали относительно опорной точки. Данное явление также является следствием нарушения магнитной симметрии агрегата, возникающего при аварийных токах в поврежденных витках статорной обмотки.

5. Для повышения достоверности и прецизионности диагностирования в реальных условиях эксплуатации целесообразно использовать комбинированный подход, предполагающий одновременный анализ сигналов от обмоток, включенных по обеим схемам. Корреляционная обработка данных от «звезды» и «треугольника» позволяет минимизировать ложные срабатывания и более точно идентифицировать характер и тяжесть повреждения.

Рецензент: Касобов А.С. — к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ЛЭПГУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. / А. В. Иванов-Смоленский. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 528 с.
2. Кавун, Ю. Ю. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами / Ю. Ю. Кавун, Л. К. Ковалев // Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2006.
3. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 57–61.

4. Соболев, А.Н. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора / А.Н. Соболев А.В. Богдан, И.А. Потапенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 8. – С. 13 – 14.
5. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1, заявл. 29.09.2008; опубл.15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.
6. Д.Ю. Гулов // Исследования межвиткового замыкания синхронного генератора с постоянными магнитами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 12. С. 391-399
7. С.А. Ганджа. Устройство защиты якорной обмотки машин переменного тока от коротких замыканий //Д.Ю. Гулов // Патент на изобретения № 2766958 С1 Российская Федерация, СПК Н02Н 7/08, (2021-08) G01R 17/02, (202108).: № 2021114949.
8. Davlatov, A. M. Development of reliability model for a multiphase synchronous generator with an uncontrolled rectifier / A. M. Davlatov, N. Kh. Odinaev, A. Z. Rakhmatulloev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies. – 2024. – No. 4(68). – P. 63-71. – EDN NMJYRA.
9. Фишов, А. Г. Анализ состояния и направление развития малой гидроэнергетики Таджикистана / А. Г. Фишов, А. Х. Гуломзода, Л. С. Касобов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 13-22. – EDN VJUIVK.
10. Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально - бытовых и офисных электроприемников / М. М. Камолов, Х. Б. Назиров, С. Т. Исмоилов [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 2(46). – С. 26-33. – EDN IQCOQM.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Гулов Диловар Юсупович	Гулов Диловар Юсупович	Gulov Dilovar Yusupovich
Донишкадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
н.и.т.	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
E-mail: GDY_02@mail.ru		
TJ	RU	EN
Давлатов Азамачон Маҳмадиевич	Давлатов Азамаджон Махмадиевич	Davlatov Azamajon Mahmadiyevich
Донишкадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
н.и.т.	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
E-mail: davlatov_azam@bk.ru		
TJ	RU	EN
Одинаев Неккадам Хушқадамович	Одинаев Неккадам Хушқадамович	Odinaev Nekkadam Khushkadamovich
Донишкадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
н.и.т.	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
E-mail: onk.tj@mail.ru		
TJ	RU	EN
Қаҳоров Рустам Асалиевич	Қаҳоров Рустам Асалиевич	Kahorov Rustam Asaliyevich
Донишкадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
н.и.т.	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
E-mail: rustam-kahorov-2226@mail.ru		
TJ	RU	EN
Амирханов Алишер Сайвалиевич	Амирханов Алишер Сайвалиевич	Amirkhanov Alisher Sayvaliyevich
Донишкадаи Энергетикии Тоҷикистон	Институт энергетики Таджикистана	Institute of Energy Tajikistan
н.и.т.	кандидат технических наук	Candidate of Technical Sciences
E-mail: amirkhonov_as@mail.ru		