

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Н.Б. Пирматов¹, М.У. Муминов², Ш.З. Райхонов², А.Д. Ан²

¹Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан.

²Алмалыкский государственный технический институт, Алмалык, Узбекистан.

Doi: 10.5281/zenodo.18093032

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассмотрены основные факторы, влияющие на надежность изоляции высоковольтных кабелей, эксплуатируемых в условиях горных предприятий. Проведён анализ влияния температурных, влажностных и механических нагрузок на деградацию изоляционных материалов. Особое внимание уделено воздействию агрессивной горной среды, перепадов давления и вибраций, характерных для подземных выработок. На основе экспериментальных данных и анализа эксплуатационных случаев определены типичные механизмы и характер повреждений изоляции, включая частичные разряды, пробой и старение материала. Предложены методы диагностики и профилактики повреждений, направленные на повышение долговечности и эксплуатационной надежности кабельных систем. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании, техническом обслуживании и модернизации систем электроснабжения горных предприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

высоковольтные кабели, изоляция, надежность, горные предприятия, повреждения, диагностика, старение материалов, пробой, изоляция, жила, замыкание.

ВВЕДЕНИЕ

Современные горнодобывающие предприятия представляют собой сложные техногенные системы, функционирование которых невозможно без надежного и бесперебойного электроснабжения. Одним из ключевых элементов электротехнической инфраструктуры выступают высоковольтные кабельные линии, обеспечивающие передачу энергии к мощным потребителям в подземных и наземных производственных участках. Однако эксплуатация кабельных систем в условиях повышенной влажности, запылённости, вибрационных и механических воздействий горной среды сопровождается ускоренным старением и деградацией изоляции, что напрямую отражается на их надежности и сроке службы [1].

В отличие от обычных промышленных объектов, горные предприятия характеризуются высокой динамикой внешних факторов: колебания температуры, наличие агрессивных газов, нестабильное давление и интенсивные механические нагрузки. Эти условия формируют комплексное воздействие на изоляционные материалы, вызывая микроповреждения, частичные разряды и постепенное снижение электрической прочности. В результате возрастает риск аварийных отключений, пожаров и простоев оборудования, что приводит к значительным экономическим потерям и угрозам безопасности персонала [2].

Несмотря на наличие широкого спектра исследований в области повышения надежности кабельных систем, влияние именно горнотехнических условий на состояние изоляции высоковольтных кабелей до настоящего времени изучено недостаточно. Отсутствие систематизированных данных о характере и закономерностях повреждений в специфических условиях подземных выработок ограничивает возможности оптимизации технического обслуживания и прогнозирования ресурса кабельных линий.

В связи с этим актуальной задачей является комплексное исследование факторов, определяющих надежность изоляции высоковольтных кабелей, работающих в горнодобывающей отрасли, а также выявление характерных видов повреждений и механизмов их возникновения. Решение данной задачи позволит повысить эксплуатационную надежность систем электроснабжения, минимизировать аварийность и оптимизировать регламентные процедуры технического контроля [3].

АНАЛИЗ

Научные исследования, посвященные анализу и синтезу Надежность изоляции высоковольтных кабелей в значительной степени, определяется совокупностью внешних и внутренних воздействий, действующих на кабельную систему в процессе эксплуатации. В условиях горных предприятий данные воздействия приобретают

комплексный характер и проявляются значительно интенсивнее, чем в стандартных промышленных установках.

Температурные и влажностные факторы: Одним из ключевых факторов деградации изоляции является температурный режим эксплуатации. В подземных выработках температура окружающей среды может изменяться в широком диапазоне, что вызывает чередование процессов теплового расширения и сжатия изоляционных слоёв. Такие колебания приводят к образованию микротрещин, ускоряющих проникновение влаги и ухудшение диэлектрических свойств материала. Высокая влажность и наличие конденсата дополнительно способствуют возникновению частичных разрядов и поверхностным утечкам тока.

Механические нагрузки и вибрационные воздействия: Горные предприятия характеризуются интенсивными механическими колебаниями, связанными с работой бурового, транспортного и вентиляционного оборудования. Вибрации и динамические нагрузки вызывают постепенное ослабление сцепления между слоями изоляции, сдвиги жил и экранирующих элементов. Это приводит к локальным перенапряжениям и увеличению вероятности электрического пробоя.

Агрессивная среда и химические воздействия: Воздействие агрессивных газов, пыли, влаги и масляных аэрозолей в шахтных выработках приводит к химической деградации изоляционных материалов. Полиэтиленовые и резиновые оболочки подвержены процессам старения, окисления и растрескивания, что снижает их электрическую прочность и ускоряет развитие дефектов.

Электрические перегрузки и частичные разряды: Частичные разряды представляют собой один из наиболее опасных факторов внутреннего разрушения изоляции. Они возникают в микрополостях и трещинах материала под воздействием локальных перенапряжений. Многократное повторение таких процессов приводит к постепенному углеродированию каналов, термическому разрушению полимерных компонентов и снижению сопротивления изоляции.

Несоблюдение эксплуатационных норм и дефекты монтажа. Практика эксплуатации показывает, что значительная часть повреждений высоковольтных кабелей обусловлена

нарушениями технологий монтажа и соединения кабельных муфт. Неправильный выбор сечений, отсутствие герметизации и несоблюдение радиусов изгиба создают дополнительные напряжения, ускоряющие старение изоляции.

Предварительное определение вида и характера повреждения. После выполнения всех мер безопасности при работах в действующих электроустановках. Приступают к определению вида и характера повреждения. С помощью мегомметра и омметра производят измерения на разземленном кабеле между жилами и каждой жилой и оболочкой(землей). Данными измерениями выявляются повреждения однофазные и межфазные с сопротивлением от 0 до сотен ком. При измерениях не всегда удается выявить характер повреждения, в таком случае используют испытательную установку высокого выпрямленного напряжения. Поочередно испытывают все три жилы кабеля испытательным напряжением $(4-6U_{ном})$. В ходе испытания определяется характер повреждения [4,5,6,7].

Испытание высоковольтных кабелей. Испытание производится на полностью смонтированном кабеле при монтаже всех муфт и окончательной прокладке, а также в виде контроля при смотанном кабеле на бухту. Испытание производится испытательной установкой выпрямленного напряжения по однопериодной схеме, при обратном включении высоковольтного выпрямителя.

Испытание производится испытательной установкой выпрямленного напряжения при коэффициенте пульсаций напряжения не более $\pm 1.5\%U_{исп}$. Испытательное напряжение принимается в соответствии с таблицей №1 на основании правил эксплуатации электрооборудований. Для кабелей до 35 кВ с бумажной и пластмассовой изоляции длительность приложения полного испытательного при приёмосдаточных испытаниях – 10 минут, в процессе эксплуатации – 5 минут. Для кабелей с резиновой изоляцией длительность полного испытательного напряжения – 5 минут. Испытываются все жилы кабеля по отношению к другим жилам и оболочке (экрану, земле). Нулевые жилы кабелей испытываются полным испытательным напряжением если нет оговорки об этом в паспорте на кабель. [8,9].

Таблица 1

Испытательное напряжение кабелей

Категория испытаний	Кабели с бумажной изоляцией на напряжение, кВ					Кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение, кВ					Кабели с резиновой изоляцией на напряжение, кВ		
	До 1	2	3	6	10	0,66*	1*	3	6	10	3	6	10
П	6	12	18	36	60	3,5	5,0	15	36	60	6	12	20
К	2,5	10-17	15-25	36	60		2,5	7,5	36	60	6	12	20
М		10-17	15-25	36	60			7,5	36	60	6**	12**	20**

Испытание выпрямленным напряжением одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией без брони (экранов), проложенных на воздухе, не производится.

После ремонтов, не связанных с перемонтажом кабеля, изоляция проверяется мегомметром на напряжение 2500 В, а испытание повышенным

выпрямым напряжением не производится. Кабели с изоляцией СПЭ (Сшитый полиэтилен) испытываются согласно заводской документации на кабель. Допустимые токи утечки в зависимости от испытательного напряжения и допустимый коэффициент асимметрии при измерении тока утечки приведены в таблице №2.

Таблица 2

Токи утечки и коэффициенты асимметрии для силовых кабелей

Кабели напряжением, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Допустимые значения токов утечки, мА	Допустимые значения коэффициента асимметрии, ($I_{\max}/I_{\min}$)
6	36	0.2	8
	45	0.3	8
10	50	0.5	8
	60	0.5	8

По окончании испытания испытуемый кабель должен быть разряжен через добавочное сопротивление и заземлен не менее чем на 2 минуты.

Абсолютное значение тока утечки не является браковочным показателем. Кабели с удовлетворительной изоляцией должны иметь стабильные значения токов утечки. При проведении испытания ток утечки должен уменьшиться. Если не происходит уменьшения значения токов утечки, а также при его увеличении и нестабильности (броски), испытание производится до выявления дефекта, но не более чем 15 минут. Испытание высоковольтного кабеля индукционным методом с помощью прибора п-806. Порядок проведения испытания: после подключения датчика П805-ДИ2 (индукционный датчик) и головных наушников, включается прибор П806 и выбирается «Режим 1024 или 2048 Гц», датчик подносится к генератору для проверки работы прибора, датчика, наушников (должен иметь место сильный звук, и индикация

напряженности магнитного поля на дисплее прибора). Производят отыскание трассы кабеля по показаниям выключены напряженности и силе звука в головных наушниках, проходя по трассе кабеля проверяется методом минимума место залегания кабеля. Если предполагаемая трасса не подтверждается, то производят повторную трассировку. При нахождении предполагаемого места повреждения делается отметка, и место повреждение подтверждается акустическим способом. В основном индукционным способом удачно отыскиваются повреждения между жилами, без спайки на оболочку. При спайках на оболочку данный метод работает с очень плохой точностью. Поиск повреждения проводится следующим образом. Оператор выходит на трассу, держа индукционный датчик так, как показано на рисунке (датчик можно держать и вертикально). При обследовании трассы в телефонах будет слышаться звук, изменяющийся по громкости с шагом скрутки. За повреждением (0,5-2 м) звук исчезает. [10,11].

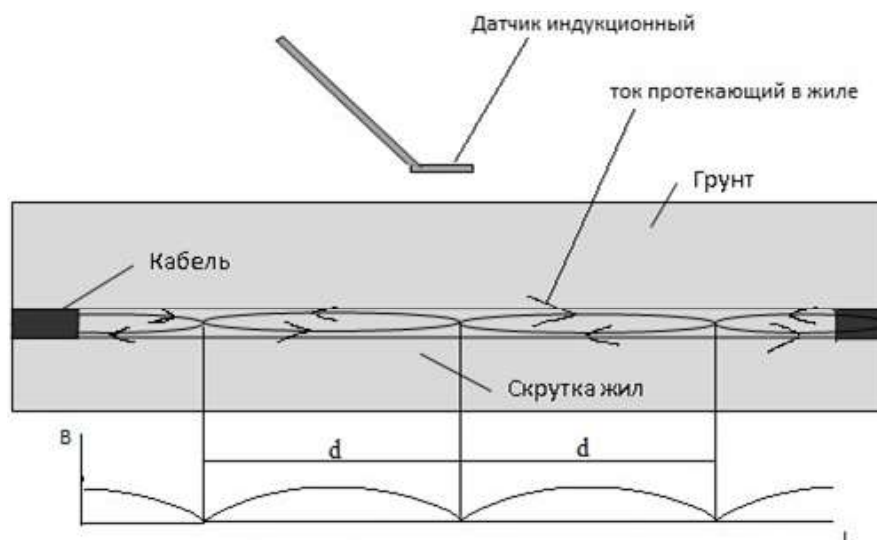


Рис.1. Распределение магнитной составляющей индукции над кабелем при шаге скрутки d.

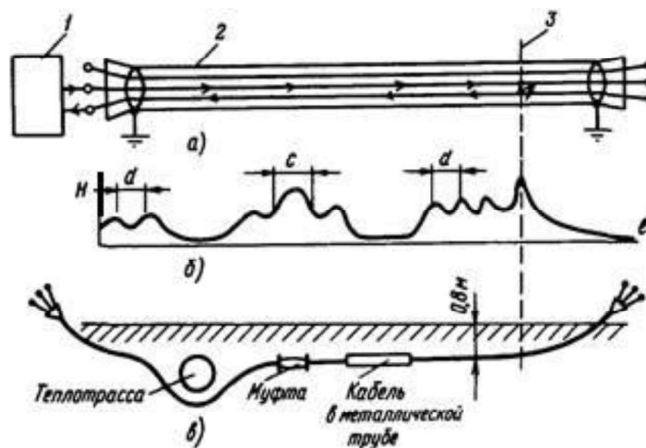


Рис.2. Локализация места повреждения кабеля непосредственно на трассе:

1 – генератор (ГЗЧ-2500 или подобный); 2 – искомый кабель; 3 – место межфазного замыкания.
 а – схема подключения генератора; б – эпюра величины напряженности магнитного поля над кабелем с замыканием жил через небольшое остаточное сопротивление; в – трасса прокладки поврежденного кабеля; с – длина повышения звука над кабельной муфтой. d – шаг скрутки кабеля $s \neq d$, обычно шаг скрутки 0.4-2 метра в зависимости от конструкции, а муфты 1 – 1.3 м.

В результате исследования были сделаны следующие работы: 1 Экспериментальные данные, ходе проведённых испытаний методом индукционного напряжения были получены данные, характеризующие поведение изоляции при различных внешних и внутренних воздействиях. Основное внимание было уделено следующим факторам: уровень влажности окружающей среды (от 30% до 90%); температура окружающей среды (от -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$); уровень индуцированного напряжения (до 1.5 Уном); наличие микроповреждений в изоляции (смоделированных дефектов); длительность воздействия индукционного поля. В результате экспериментов зафиксировано, что при повышении влажности более 70% и температуре выше $+35^{\circ}\text{C}$ увеличивается вероятность пробоя изоляции при прочих равных условиях. Также наблюдается рост тока утечки и снижение электрической прочности кабельной изоляции. Определены характеры повреждений, применение индукционного метода позволило выявить и классифицировать следующие типы повреждений: локальные пробои — характерны для кабелей с микротрещинами в изоляции, тепловое старение — определяется по постепенному снижению сопротивления изоляции и росту тангенса угла диэлектрических потерь, влажностная деградация — сопровождается постепенным снижением пробивного напряжения и увеличением тока утечки в зависимости от длительности воздействия. Сделана сравнение с теоретическими данными полученные экспериментальные результаты подтвердили теоретические модели деградации изоляции. Наиболее выраженное снижение надёжности наблюдалось при комплексном воздействии высокой температуры и

влажности. Это согласуется с гипотезой о гидролитическом и тепловом старении полимерных материалов. [12,13,14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённый анализ позволяет заключить, что долговечность изоляции высоковольтных кабелей в условиях горных предприятий определяется сочетанием физических, химических и электрических факторов. Для повышения надёжности необходим комплексный подход, включающий использование термостойких и влагозащищённых материалов, внедрение систем онлайн-диагностики и регулярный контроль параметров изоляции в процессе эксплуатации.

Проведённое исследование показало, что индукционный метод является эффективным и неразрушающим способом диагностики высоковольтных кабелей. Он позволяет выявлять дефекты изоляции, локализовать повреждённые участки и проводить оценку технического состояния кабельных линий без вывода их из эксплуатации. Метод обладает высокой чувствительностью, надёжностью и может быть использован в системах мониторинга в реальном времени.

Практические рекомендации на основе анализа результатов предлагаются следующие меры для повышения надёжности изоляции: применение влагоустойчивых полимеров с улучшенными диэлектрическими свойствами; регулярная диагностика методом индукционного напряжения на повышенных частотах; мониторинг температуры и влажности в зоне прокладки кабелей; установка дополнительных экранов или барьеров в местах повышенного индуцированного поля.

TOG‘-KON KORXONALARIDA ISHLATILADIGAN YUQORI KUCHLANISHLI KABELLARNING IZOLYATSIYASI ISHONCHLILIGIGA TA’SIR ETUVCHI OMILLARNI O‘RGANISH VA SHIKASTLANISH XARAKTERINI ANIQLASH

N.B. Pirmatov¹, M.U. Muminov², Sh.Z. Raykhonov², A.D. An²

¹Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston.

²Olmaliq davlat texnika instituti, Olmaliq, O‘zbekiston.

ANNOTATSIYA Ushbu maqolada tog‘-kon korxonalarida ekspluatatsiya qilinayotgan yuqori kuchlanishli kabellarning izolyatsiyasi ishonchliligiga ta’sir etuvchi asosiy omillar ko‘rib chiqilgan. Harorat, namlik va mexanik yuklamalarning izolyatsion materiallar degradatsiyasiga ta’siri tahlil qilingan. Maxsus e’tibor tog‘ sharoitlariga xos agressiv muhit, bosimning o‘zgarishi va tebranishlarning ta’siriga qaratilgan. Eksperimental ma’lumotlar va ekspluatatsion holatlar tahlili asosida izolyatsiyaning odatiy shikastlanish mexanizmlari va xususiyatlari aniqlangan, jumladan qisman razryadlar, teshilish va materialning eskirishi. Shuningdek, kabellar tizimlarining uzoq muddatli xizmat muddati va ekspluatatsion ishonchliligini oshirishga qaratilgan diagnostika va profilaktika usullari taklif etilgan. Tadqiqot natijalari tog‘-kon korxonalarining elektr ta’minoti tizimlarini loyihalash, texnik xizmat ko‘rsatish va modernizatsiya qilish jarayonlarida qo‘llanilishi mumkin.

KALIT SO‘ZLAR yuqori kuchlanishli kabellar, izolyatsiya, ishonchlilik, tog‘-kon korxonalari, shikastlanishlar, diagnostika, materiallarning eskirishi, teshilish, izolyatsiya qatlami, tok o‘tuvchi jila, qisqa tutashuv.

STUDY OF FACTORS AFFECTING THE RELIABILITY OF HIGH-VOLTAGE CABLE INSULATION IN MINING ENTERPRISES AND DETERMINATION OF THE NATURE OF DAMAGE

N.B. Pirmatov¹, M.U. Muminov², Sh.Z. Raykhonov², A.D. An²

¹Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

²Almalyk State Technical Institute, Almalyk, Uzbekistan.

ABSTRACT This article examines the main factors influencing the reliability of high-voltage cable insulation used in mining enterprises. The effects of temperature, humidity, and mechanical loads on the degradation of insulating materials are analyzed. Special attention is paid to the influence of the aggressive mining environment, pressure fluctuations, and vibrations typical of underground workings. Based on experimental data and operational case studies, the typical mechanisms and types of insulation damage-such as partial discharges, breakdown, and material aging-have been identified. Diagnostic and preventive methods aimed at increasing the durability and operational reliability of cable systems are proposed. The research results can be used in the design, maintenance, and modernization of power supply systems in mining enterprises.

KEYWORDS high-voltage cables, insulation, reliability, mining enterprises, damage, diagnostics, material aging, breakdown, conductor, short circuit.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Специальные кабельные изделия: учебное пособие / В.М.Аникеенко, И.В.Флеминг; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 127 с.
2. «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 40 с.
3. Щеглов, Н. В. — *Современные виды изоляции. Часть 6. Изоляция силовых электрических кабелей*. Издательство: Новосибирский государственный технический университет. ISBN 978-5-7782-2377-6.
4. Высоковольтные гибкие кабели/В.С.Дмитревский, Д.Д.Румянцев.—М.:Энергия,1974.—176с.
5. Соболев В.Г. Шахтные бронированные кабели.—М.:Недра,1973.—136. с.
6. Хошмухамедов И.М. и др. Монтаж, наладка и эксплуатация эл. оборудования. Изд-во Московского Гос. горного университета. М 2005 (621.31 (075.8)).

7. Каминский М.Л. Проверка и испытание электрических машин. М., «Энергия», 1977. 404 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 462).
8. Муминов, М.У., Ш.Ю. Дархонова, и И.А. Усманалиева. «Функции и условия эксплуатации гибких кабелей, используемых в горнодобывающей промышленности». *Таълим фидойлари* 19 (2022): 21-24.
9. Пешков И.Б., Уваров Е.И. Кабельная промышленность 100 лет в содружестве с энергетиками / XX век. // Электроэнергетика. М.: Мастер, 2003.
10. М.И. Семененко, Г.К. Хромова, Т.Ф. Кузина Электрическая прочность высоковольтных кабельных бумаг при постоянном, переменном и импульсном напряжениях. Электрическая промышленность. Серия Кабельная техника, 1970, № 8.
11. С.Е. Глейзер Электрическое поле при постоянном напряжении в маслonaполненных кабелях с градирующей изоляцией. Электротехническая промышленность. Серия Кабельная техника, 1975, № 7. Старший преподаватель кафедры электротехники и электромеханики
12. С.Д. Холодный, Э.Т. Ларина, В.М. Леонов Конструирование изоляции кабельных изделий. — М.: МЭИ, 1988 г.
13. Основы кабельной техники. Учебное пособие для вузов. Под. редакцией. В.А. Привизенцева. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: 1975.
14. Muminov M.U., Lapasov H “Egiluvchan elektr kabellarning konstruktiv xususiyatlari va ishlatiladigan materiallar tahlili”. (2025). *Образование наука и инновационные идеи в мире*, 70(8), 420-426. <https://scientific-jl.com/obr/article/view/18801>.

Information about authors:

Pirmatov Nurali Berdiyrovich	— Professor, Department of Electrical Machines and Drives Engineering, Tashkent State Technical University; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Street, 2, Republic of Uzbekistan ORCID: 0000-0001-5212-2593, e-mail: pirmatovnurali@gmail.com
Muminov Maxmudjon Umurzakovich	— Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Almalyk State Technical Institute, 110100, Almalyk city, Republic of Uzbekistan, M. Ulugbek street, 45. ORCID: 0009-0005-0865-6404, e-mail: muminov33355@mail.ru
Raykhonov Shuhrat Zaripovich	— Head of the Department of “Electrical Engineering and Electromechanics” of the Almalyk State Technical Institute, Associate Professor, 45 M. Ulugbek Street, Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0009-0004-5895-6758, e-mail: shuhratrayxonov1990@gmail.com
An Arthur Dmitriyevich	— Senior lecturer at the department of Electrical Engineering and Electromechanics, Almalyk State Technical Institute, 110100, Almalyk, M.Ulug‘bek 45 Str., Republic of Uzbekistan ORCID: 0009-0005-2763-9589, e-mail: arturan1993@mail.ru

НОАЁН ҚУТБЛИ СИНХРОН ГЕНЕРАТОРНИНГ ЎЗ-ЎЗИНИ ҚЎЗГАТИШ ЖАРАЁНИ ЗОНАЛАРИНИНГ ЧЕГАРАЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

А.Е. Бекишев, У.Н. Бердиёров

Тошкент давлат техника университети, Тошкент, Ўзбекистон

Doi: 10.5281/zenodo.18093055

АННОТАЦИЯ

Ушбу мақолада ноаён қутбли синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни зоналарининг чегараларини математик моделлаштириш масаласи кўриб чиқилган. Маълумки синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни салбий ҳолат ҳисобланади, чунки кучланиш ва тоқларнинг қийматлари жуда катта бўлиши мумкин ва энг асосийси уларни бошқариб бўлмайди. Шу сабабли синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни зоналарининг чегараларини таҳлил қилиш эксплуатация жараёнида муҳим ҳисобланади.

КАЛИТ СЎЗЛАР

синхрон генератор, ўз-ўзини қўзғатиш жараёни, синхрон ва асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш жараёни, математик моделлаштириш.

КИРИШ

Ўз-ўзини қўзғатиш - бу система элементлари ва генератор чулғамларида кучланиш ва тоқнинг

(U ва I) ўз-ўзидан ортиб кетиши билан характерланувчи электромагнит нотурғунликдир [1-8].