

Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения

ЕВСТАФЬЕВ А.М., КИРЮШИН Д.Е., НИКИТИН В.В., ПУДОВИКОВ О.Е.

Энергетическая эффективность является одним из основных требований, предъявляемых к современному тяговому подвижному составу магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также городского транспорта. Качественное улучшение показателей энергетической эффективности тягового подвижного состава может быть обеспечено путем построения бортовых энергетических комплексов с использованием накопителей электрической энергии большой емкости, позволяющих организовать эффективный энергообмен между основным источником (контактной сетью, дизель-генераторной установкой), накопителями и потребителями энергии в различных режимах работы. Подвижной состав с энергосистемой подобного типа получил в мировой практике наименование гибридного тягового подвижного состава. В статье предложена классификация гибридного тягового подвижного состава, характеризующая специфику архитектуры его силовых энергоустановок. Для оценки свойств гибридного тягового подвижного состава предложена система количественных показателей, которые позволяют сформировать комплексную сравнительную оценку технического уровня, энергетической эффективности и конкурентоспособности различных типов гибридного подвижного состава. Обоснована наиболее перспективная топология силовой гибридной энергоустановки тягового подвижного состава, обеспечивающая возможность независимого управления потоками энергии и оптимизации режимов работы бортовых систем хранения энергии.

Ключевые слова: гибридный тяговой подвижной состав, гибридная силовая установка, накопитель энергии, энергетическая эффективность.

Energy efficiency is one of the main requirements for modern traction rolling stock of mainline and industrial railway transport, as well as urban transport. A qualitative improvement in the energy efficiency indicators of traction rolling stock can be ensured by building on-board power complexes using high-capacity electric energy storage units, which make it possible to organize efficient energy exchange between the main source (contact network, diesel generator set), storage devices and energy consumers in various operating modes. The rolling stock with an energy system of this type has received the name hybrid traction rolling stock in world practice. This article proposes a classification of hybrid traction rolling stock, which characterizes the specifics of the architecture of its power plants. To assess the properties of hybrid traction rolling

stock, a system of quantitative indicators has been proposed, which make it possible to form a comprehensive comparative assessment of the technical level, energy efficiency and competitiveness of various types of hybrid rolling stock. The most promising topology of a power hybrid power plant of traction rolling stock is substantiated, which provides the possibility of independent control of energy flows and optimization of the operating modes of on-board energy storage systems.

Key words: hybrid traction rolling stock, hybrid power plant, energy storage, energy efficiency.

Электротехника, 2021, №2, стр. 7-11

Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей

ТИТОВА Т.С., САЦУК Т.П., ТЕРЁХИН И.А., ТАРАБИН И.В.

Представлена перспективная малообслуживаемая система заземления опор контактной сети путем применения железобетонных опор и фундаментов в качестве естественных заземлителей. Разработан алгоритм выбора оптимальной длины троса группового заземления, учитывающий сопротивление системы, электромагнитное влияние, допустимую плотность тока, стекающего с арматуры опоры контактной сети и условия электробезопасности. Создана имитационная модель, позволяющая исследовать условия электробезопасности при эксплуатации системы заземления, при которой опоры контактной сети являются естественными заземлителями. Экспериментально подтверждена правильность работы имитационной модели.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление, система заземления опор контактной сети, тяговое электроснабжение, опора контактной сети, естественный заземлитель, железобетонный фундамент, электрический пробой, трос группового заземления.

A promising low-maintenance grounding system for overhead contact network supports is presented, through the use of reinforced concrete supports and foundations as natural grounding conductors. An algorithm for the optimal choice of the length of the group grounding cable has been developed, taking into account the resistance of the system, the electromagnetic effect, the permissible current density flowing from the reinforcement of the contact network support and the conditions of electrical safety. A simulation model has been created that makes it possible to study the electrical safety conditions during the operation of the grounding system, in which the

overhead supports are natural grounding conductors. An experiment was carried out to confirm the correctness of the simulation model.

Key words: electrical safety, grounding, the grounding system of the contact network supports, traction power supply, contact network support, natural ground electrode, reinforced concrete foundation, electrical breakdown, group grounding cable.

Электротехника, 2021, №2, стр. 12-17

Моделирование многофункционального преобразователя энергии для транспортной гибридной силовой установки

ЦАПЛИН А.Е., ВАСИЛЬЕВ В.А., ВИКУЛОВ И.П., ТЕЛИЧЕНКО С.А.

В статье обоснована актуальность внедрения транспортных гибридных систем, выбраны схемные решения, разработан алгоритм управления многофункционального преобразователя энергии для транспортной гибридной силовой установки. Для анализа работы установки выбрана мультиконвекторная гибридная схема с двумя накопителями энергии (емкостной накопитель на базе суперконденсатора и электрохимический накопитель – аккумуляторная батарея). Моделирование многофункционального преобразователя энергии для транспортной гибридной силовой установки выполнено с использованием программы MATLAB Simulink. Модель способна выполнять функции по рациональному управлению энергией в различных режимах работы транспортных систем, что подтверждает целесообразность конфигурации и выбора схемных решений при создании преобразователя для транспортной гибридной силовой установки.

Ключевые слова: транспортная гибридная силовая установка, многофункциональный преобразователь, компьютерное моделирование, подвижной состав.

The article substantiates the relevance of the introduction of hybrid transport systems, the choice of circuit solutions and the development of control algorithms for a multifunctional energy converter for a transport hybrid propulsion system are made. To analyze the operation of the installation, a multiconvector hybrid circuit with two energy storage units (a capacitive storage based on a supercapacitor and an electrochemical storage battery – a storage battery) was selected. Modeling of a multifunctional energy converter for a transport hybrid propulsion system was performed using the MatLab program with the Simulink application. The model is capable of performing functions of rational energy management under various operating modes

of transport systems, which confirms the feasibility of configuration and choice of circuit solutions when creating a converter for a transport hybrid propulsion system.

Key words: transport hybrid propulsion system, multifunction converter, computer simulation, rolling stock.

Электротехника, 2021, №2, стр. 18-20

Сравнительные экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции электрооборудования после сушки различными способами
КРУЧЕК В.А., ДУЛЬСКИЙ Е.Ю., ВОРОБЬЕВ А.А., МАКАРОВА Е.И.

Статья посвящена оценке результатов сравнительных экспериментальных исследований различных технологий сушки пропитанной изоляции силового электрооборудования в процессе изготовления и ремонта: штатной технологии сушки в конвективных электрических печах высокой мощности и предлагаемой технологии и техники ускоренной сушки в аппаратных комплексах с использованием инфракрасного (ИК) излучения. В частности, в статье представлены результаты анализа микроструктуры поверхности полимерной изоляции после сушки, указанными методами. Исследования проводились в промышленных условиях, с использованием специализированного поверенного оборудования. В теоретическом плане в статье представлены выкладки по обоснованию использования ИК-излучения при сушке многослойной изоляционной конструкции различного состава. Проведенные исследования подтверждают гипотезу об образовании на поверхности и в толще полимерной изоляции микрополостей при использовании конвекции при сушке, которые снижают качество и надежность изоляции электрооборудования в целом. При этом предлагаемая технология и техника ускоренной сушки изоляции электрооборудования с использованием ИК-излучения позволяет повысить качество получаемой полимерной изоляции, повышая ее надежность. Помимо этого, данная технология позволяет в значительной степени повысить производительность ремонта изоляции и снизить затраты электроэнергии.

Ключевые слова: надёжность, изоляция, электрооборудование, микрополости, сушка, конвекция, инфракрасное излучение.

The article is devoted to evaluating the results of comparative experimental studies of various technologies for drying impregnated insulation of power electrical equipment in the process of manufacturing and repair: standard drying technology in high-power convective electric furnaces

and the proposed technology and technology of accelerated drying in hardware complexes using infrared (IR) radiation. In particular, the article presents the results of the analysis of the microstructure of the polymer insulation surface after drying by these methods. The research was carried out in industrial conditions, using specialized attorney equipment. In theoretical terms, the article presents calculations on the justification of the use of IR-radiation in the drying of multilayer insulation structures of various compositions. The conducted studies confirm the hypothesis about the formation of micro-cavities on the surface and in the thickness of the polymer insulation when using convection during drying, which reduce the quality and reliability of the insulation of electrical equipment as a whole. At the same time, the proposed technology and technique of accelerated drying of electrical equipment insulation using IR-radiation can improve the quality of the resulting polymer insulation, increasing its reliability. In addition, this technology can significantly improve the performance of insulation repair and reduce energy costs.

Key word: reliability, insulation, electrical equipment, micro-cavities, drying, convection, infrared radiation.

Электротехника, 2021, №2, стр. 21-27

Расчёт магнитоэлектрических вентильных двигателей методом разделения переменных Фурье

АФНАСЬЕВ А.А.

На базе метода разделения переменных Фурье получена двумерная аналитическая модель вентильного двигателя с постоянными магнитами, в общую расчетную область которой входят ферромагнитные участки и постоянные магниты реальной конфигурации. В качестве источников магнитного поля выступают постоянные магниты ротора, токи обмотки статора и наведенные магнитные индукции в зубцах статора. Расчётные значения магнитных индукций в средах находятся с учётом зубчатости статора, обмоточных гармоник магнитодвижущей силы и геометрической структуры расположения постоянных магнитов. Полученные на модели расчётные функциональные показатели двигателя (ток, момент) близки к его паспортным значениям.

Ключевые слова: магнитоэлектрические вентильные двигатели, метод разделения переменных, постоянные магниты, зубчатость статора, обмоточные гармоники, электромагнитный момент, расчет.

On the basis of the method of separation of variables, Fourier received two-dimensional analytical model of a brushless DC motor with permanent magnets, in the General analysis area, which includes areas of ferromagnetic and permanent magnets the actual configuration.

Permanent rotor magnets, stator winding currents and induced magnetic inductions in the stator teeth act as sources of magnetic field. The calculated values of magnetic inductions in media are based on the stator serration, winding harmonics of magnetomotive force and the geometric structure of the arrangement of permanent magnets. The calculated values of the functional parameters of the engine (current, torque) obtained on the model are close to its passport values.

Key words: magnetolectric valve motors, variable separation method, permanent magnets, stator gear, winding harmonics, electromagnetic torque, serial motor, calculation.

Электротехника, 2021, №2, стр. 28-33

Методы расчёта токовводов ВТСП энергетических кабелей переменного тока

ЖЕЛТОВ В.В., БУЯНОВ Ю.Л., КОПЫЛОВ С.И., АРХАНГЕЛЬСКИЙ А.Ю., БАЛАШОВ Н.Н.

Практическое использование кабелей для передачи электроэнергии на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП кабелей) обусловлено их высокой пропускной способностью. Несмотря на большое количество ВТСП кабелей, экспериментальных и работающих в составе действующих сетей, остаются малоизученными вопросы применения сильноточных, охлаждаемых жидким азотом, трехфазных ВТСП кабелей для передачи электроэнергии большой мощности. Ввод переменного тока в кабельную систему накладывает ряд специфических ограничений при проектировании токовводов. Большинство сверхпроводниковых устройств и аппаратов работают на постоянном токе, поэтому методики расчёта высоковольтных сильноточных токовводов переменного тока практически отсутствуют. В статье рассмотрены характерные особенности работы криотокковводов переменного тока и предложены принципы их расчета, позволяющие более точно определить передаваемую по ним активную мощность. Показана последовательность определения обуславливающих общую длину токовводов геометрических размеров опорных изоляторов токовводов, в зависимости от внешних условий воздействия окружающей среды. Рассмотрено влияние теплообмена в среде газообразного азота на тепловой режим токоввода. Установлено, что вследствие относительно небольшой удельной теплоёмкости газообразного азота влияние

охлаждения на тепловой режим токоввода значительно меньше по сравнению с выделением и распространением тепла. В качестве примера приведены параметры самоохлаждающихся медных токовводов, рассчитанных на 12 кА, при температурах охлаждения 65 и 77,4 К.

Ключевые слова: токовводы для криогенных устройств, расчет криогенных токовводов, ВТСП кабели электропередачи.

Practical use of cables for the transmission of electricity based on high-temperature superconductors (HTS cables) due to their high throughput. Despite the large number of HTS cables, experimental and operating as part of existing networks, there remains little studied the use of high-current, liquid-nitrogen-cooled, three-phase HTS cables for the transmission of high-power electricity from power plants. The introduction of alternating current into the cable system imposes a number of specific limitations in the design of current leads. Most superconducting devices and devices operate on direct current, so the methods for calculating high-voltage, high-current AC current leads are practically absent. The article discusses the characteristic features of the operation of AC current cryo-leads and suggests the principles of their calculation, allowing to increase the active power transmitted through them. The sequence of determining the geometrical dimensions of the supporting insulators of the current leads, which determine the total length of the current leads, is shown, depending on the external environmental conditions. The effect of heat transfer in a nitrogen gas medium on the thermal mode of the current lead is considered. It has been established that, due to the relatively small specific heat capacity of gaseous nitrogen, the effect of cooling on the thermal mode of the current lead is much less compared to the release and distribution of heat. As an example, the parameters of self-cooled copper current leads, designed for 12 kA, are given at cooling temperatures of 65 and 77,4 K.

Key words: current leads for cryogenic devices, calculation of cryogenic current leads, HTS power cables.

Электротехника, 2021, №2, стр. 34-41

Повышение быстродействия последовательного анализа в устройствах автоматики энергосистем энергорайонов с распределенной генерацией

КУЛИКОВ А.Л., ИЛЮШИН П.В., ЛОСКУТОВ А.А.

Рассмотрены особенности электрических режимов в энергорайонах с объектами

распределенной генерации. Обоснована необходимость повышенных требований к быстродействию устройств автоматики энергосистем, особенно в островном (автономном) режиме. Отмечено, что реализация специальной процедуры усечения стандартного последовательного анализа Вальда при принятии решений устройствами автоматики требует дополнительных временных затрат. Обеспечение постоянства ошибок первого и второго рода на каждом шаге процедуры последовательного анализа Вальда позволяет сформировать изменяемые (адаптивные) уставочные значения. На примере устройства автоматической частотной разгрузки показано, что использование модифицированного алгоритма последовательного анализа позволяет повысить быстродействие срабатывания в два раза. Представлены рекомендации по внедрению модифицированного алгоритма как в существующие, так и в разрабатываемые устройства автоматики энергосистем.

Ключевые слова: распределенная генерация, энергорайон, автоматика энергосистем, автоматическая частотная разгрузка, процедура последовательного анализа Вальда, модифицированный алгоритм.

This paper analyzes the electrical parameters of areas that contain distributed generation facilities. It substantiates the necessity of stricter requirements to the performance of energy system automations, especially in islanded operation. It is noted that implementing a special procedure for truncating the standard sequential analysis (the Wald analysis) for automated decision-making is a time-consuming process. By ensuring the constancy of first- and second-kind errors at each step of the Wald analysis, one can generate adaptable settings. The paper uses evidence from an automated under-frequency load shedding unit to show that a modified sequential analysis algorithm performs twice as fast. The authors present guidelines on how to adopt this modified algorithm in the existing or newly developed energy system automations.

Key words: distributed generation, power area, energy system automation, under-frequency load-shedding, Wald sequential analysis, modified algorithm.

Электротехника, 2021, №2, стр. 42-48

Анализ каталожных данных и определение параметров схемы замещения крановых асинхронных электродвигателей

ОСИПОВ В.С.

Выполнен анализ каталожных данных крановых асинхронных электродвигателей серий

MT и MTK с целью проверки достоверности и соответствия каталожных данных общим закономерностям изменения параметров в зависимости от номинальной мощности двигателя. Получены необходимые для расчёта параметров схемы замещения аналитические выражения для определения магнитных и механических потерь, как доли суммарных потерь. Разработанная программа в среде MathCad позволяет определить шесть неизвестных параметров – сопротивлений схемы замещения – таким образом, чтобы выполнялся баланс активных и реактивных мощностей. Приведены результаты расчёта параметров схемы замещения всех двигателей, что позволяет построить механические характеристики.

Ключевые слова: крановые асинхронные электродвигатели, каталожные данные, схема замещения, параметры.

The analysis of catalog data of crane asynchronous motors of MT and MTK series was performed in order to verify the reliability and compliance of catalog data with the General laws of parameter changes depending on the rated power of the engine. The analytical expressions necessary for calculating the parameters of the substitution scheme for determining magnetic and mechanical losses as a share of total losses were obtained. The developed program in the MathCad environment allows you to determine six unknown parameters – the resistances of the substitution circuit – so that the balance of active and reactive power is performed. The results of calculating the parameters of the replacement circuit of all engines are given, which allows us to build mechanical characteristics.

Key words: crane induction motors, catalogue, data, equivalent circuit, parameters.

Электротехника, 2021, №2, стр. 49-58

Информационные свойства и приложения локальной составляющей тока короткого замыкания

КОЧЕТОВ И.Д., ЛЯМЕЦ Ю.Я., МАКАШКИН Ф.А.

Известно и широко применяется разделение тока короткого замыкания (КЗ) на предшествующую и аварийную составляющие. Вторая составляющая несет информацию о месте КЗ, так как создается протекающим там током. В статье рассматривается разделение наблюдаемого тока КЗ на нормальную и локальную составляющие. Локальная составляющая создаётся тем же током, что и аварийная, но в отличие от неё свободна от

влияния внешних связей наблюдаемого объекта. Обособленность объекта в локальном режиме создаётся благодаря тому, что на его модель накладываются шунты в местах наблюдения. В линиях электропередачи обнаруживается инвариантная, то есть не зависящая от внешних связей, зависимость между отношением локальных токов на противоположных сторонах и координатой места КЗ. Будучи собственной характеристикой наблюдаемого объекта, она может служить критерием оценки координаты места КЗ по результатам двухстороннего наблюдения линии. Локальный режим двухпроводного канала создаётся единственным источником, действующим из места КЗ. Нормальный режим создаётся в том же канале, но неповреждённом; его создают ЭДС, действующие в местах наблюдения и равные наблюдаемым напряжениям текущего режима или их аварийными составляющими.

Ключевые слова: линия электропередачи, место повреждения, короткое замыкание, локальная составляющая.

It has long been known and widely used division of short circuit current on the prior and fault components. The second one carries information about the location of the fault, as it is created by the current flowing there. The article is devoted to the recently discovered division of the observable short-circuit current into normal and local components. The latter is created by the same current as the fault component, but – in contrast – it is free from the influence of external influence of the observed object. The isolation of the object in the local mode is created due to the fact that its model has superimposed shunts in places of observation. In the transmission the invariant dependence, that is independent of external relations, was found between the ratio of local currents on opposite sides and the fault location. Being its own characteristic of the observed object, it creates a criterion for evaluating the coordinate based on the results of two-way observation of the line. The local mode of a two-wire channel is created by a single source operating from a fault location. Normal mode is created in the same channel, but in the undamaged. It is created by EMFs operating at the observation sites and equal to the observed voltages of the current mode or their emergency components.

Key words: transmission line, fault location, short-circuit, local component.