

Крупномасштабные применения сверхпроводимости спустя столетие после ее открытия **ВЫСОЦКИЙ В.С.**

V.S. Vysotskii, Large-Scale Applications of Superconductivity after a Century of Its Discovery

Возможности применения сверхпроводимости стали обсуждаться сразу же после ее открытия в апреле 1911 г. голландским ученым Каммерлинг-Оннесом. Главные ожидания были связаны с получением сильных магнитных полей и передачей электроэнергии без потерь. Эти ожидания начали сбываться только в начале 1960-х годов, когда впервые были синтезированы сверхпроводники Nb₃Sn, NbZr и NbTi, позволяющие сохранить высокую плотность тока в сильных магнитных полях. Следующий этап практического применения явления сверхпроводимости относится к середине 1980-х годов с открытием высокотемпературных сверхпроводников, способных работать при температуре жидкого азота. В предлагаемой читателю статье (обзоре) указаны как успехи, так и неудачи в применении низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, делается попытка наметить и обсудить современные тенденции разработок в этой области. Даны ссылки на некоторые общедоступные интернет-ресурсы, которые помогут заинтересованным читателям получить больше информации о конкретных сверхпроводниковых устройствах.

Ключевые слова: явление сверхпроводимости, обзор исследований, низко- и высокотемпературная сверхпроводимость, успехи и неудачи, современные тенденции применения

The possibilities of using superconductivity began to be discussed immediately after it was discovered in April 1911 by the Dutch scientist Kamerlingh-Onnes. The main expectations were connected with the possibility of obtaining strong magnetic fields and transmission of electric power without losses. These expectations began to be come reality only in the early 1960s when the Nb₃Sn, NbZr, and NbTi superconductors were synthesized for the first time, the use of which made it possible to retain high density of current in strong magnetic fields. The next stage of using the superconductivity phenomenon for practical applications relates to the mid 1980s with the discovery of high-temperature superconductors able to operate at the liquid nitrogen temperature. The proposed article (are view) indicates both successes and failures in the use of low- and high-temperature superconductivity, and an attempt is made to outline discuss the modern trends relating to developments in this field. References to commonly accessible Internet resources are given that will help the interested readers to get more information about particular superconducting devices.

Key words: superconductivity phenomenon, review of investigations, low- and high-temperature superconductivity, successes and failures, modern trends of application

Высоцкий Виталий Сергеевич окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1972 г. В 2004 г. получил ученую степень доктора технических наук. Директор научного направления, заведующий отделением ОАО «ВНИИКП».

Vysotskii Vitalii Sergeevich (Moscow, Russia) – Doctor Tekhn. Sci., Head at science, JSC «All-Russia Scientific Institute of the Cable Industry».

Состояние оперативной блокировки безопасности на объектах энергетики и мероприятия по повышению её надёжности

БОРИСОВ Р.К., ЖУЛИКОВ С.С., КОВАЛЕВ Д.И., КОКОРИН С.А., УСИТВИНА А.А., ЧЕРНОКОЗ А.Я.

R.K. Borisov, S.S. Zhulikov, D.I. Kovalev, S.A. Kokorin, A.A. Usitvina and A.Ya. Chernokoz, Analysis of the State of Operative Safety Interlock at Operating Power Facilities and Development of Technical Measures for Improving Its Reliability

Представлены результаты комплексной диагностики систем оперативной блокировки безопасности (ОББ) на более чем 60 действующих объектах энергетики. По результатам диагностики проведен анализ их текущего состояния: выявлены основные недостатки и наименее надежные элементы, определены основные причины их возникновения. На основе статистических данных проведен расчет надежности как отдельных элементов, так и системы ОББ в целом: истинное значение вероятности безотказности системы ОББ находится в пределах от 0 до 14 %. Предложены технические решения по усовершенствованию систем ОББ, среди которых применение терминалов с алгоритмом блока логики, использование каналов связи по цепям электропитания или радиоканалов для передачи информации о положении оборудования и разрешении/запрете оперирования тем или иным коммутационным аппаратом, снижение влияния «человеческого фактора» за счет обеспечения принципа полноты системы ОББ (для контроля наличия напряжения в высоковольтной линии, которое может быть подано с противоположной ее стороны, устанавливаются датчики напряжения на линейных разъединителях), непрерывный мониторинг состояния системы посредством самоконтроля и периодические полные проверки ОББ на объектах (рекомендуемая периодичность 5 лет), контроль использования деблокирующих устройств (аварийных ключей) путем регистрации их расположения на объекте с помощью специального датчика, резервирование электропитания системы и каналов передачи информации с помощью отдельной аккумуляторной батареи, суперконденсатора или блока бесперебойного питания, использование экранированных кабелей с заземлением экранов с двух сторон для обеспечения требований ЭМС. Перечисленные технические решения реализованы в системе нового поколения ОББ «Блокпост-1», расчетное значение надежности которой составляет 90%. Работа имеет огромное практическое значение, так как внедрение ее результатов позволяет повысить электробезопасность персонала энергообъектов при осуществлении оперативных переключений.

Ключевые слова: объекты энергетики, оперативный персонал, безопасность, система оперативной блокировки, вероятность безопасной работы

Results from comprehensive diagnostics of operative safety interlock systems (OSI) carried out at more than 60 operating power engineering facilities are presented. The current state of these systems is analyzed based on the results of the performed diagnostics: the main shortcomings and the least reliable elements are revealed, and the main factors causing their occurrence are determined. The reliability of individual components and of the entire OSI system is calculated on the basis of statistical data: the true probability of OSI system failure-free operation lies in the range from 0 to 14%. Technical solutions on improving OSI systems are proposed, including the use of terminals with a logic block algorithm, the use of communication channels via the power supply circuits or radio channels for transmitting information about the position of equipment and permitting/prohibiting to manipulate with one or another switching apparatus), reducing the influence of the human factor by fulfilling the OSI system completeness principle (for checking the availability of voltage in a high-voltage power line, which can be applied from the opposite end, voltage sensors are installed on the line disconnector switches), continuous monitoring of system state by carrying out its self-checks and periodic full checks of OSI at the facilities (the recommended frequency is once in 5 years), checking the use of unblocking devices (emergency switches) by recording their position at the facility using a dedicated sensor, backing up power supply of the system and data transmission channels using an individual storage battery, supercapacitor, or an interruptible power supply, and using shielded cables with their shields grounded at both ends to fulfill the electromagnetic compatibility requirements. The above-mentioned technical requirements are implemented in the new-generation Blockpost_1 OSI system, the calculated reliability of which is equal to 90%. The presented work is of great practical significance because the use of its results for practical applications makes it possible to achieve a higher level of electrical safety for the personnel of power facilities in making operative switching operations.

Key words: power engineering facilities, operative personnel, safety, operative interlock system, probability of failure-free operation

Борисов Руслан Константинович окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию в МЭИ. Ведущий научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»).

Borisov Ruslan Konstantinovich (Moscow, Russia) – Cand. Tech. Sci. He is a Leading Scientific Researcher of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»).

Жуликов Сергей Сергеевич окончил ЭЭФ в МЭИ в 1981 г. В 2003 г. в Московском техническом университете связи и информатики защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методов и технических средств для решения проблем электромагнитной совместимости на объектах связи». Ведущий инженер НИУ «МЭИ».

Zhulikov Sergei Sergeevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci., He is a Leading Engineer of the NRU «MPEI».

Ковалев Дмитрий Игоревич окончил Институт электроэнергетики НИУ «МЭИ» в 2007 г. Аспирант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ».

Kovalev Dmitrii Igorevich (Moscow, Russia) – Ph. D. Student in the NRU «MPEI».

Кокорин Сергей Анатольевич окончил приборостроительный факультет Владимирского политехнического института в 1980 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование экстраполяционных методов определения статических магнитных характеристик электротехнических сталей» в Московском приборостроительном институте. Научный сотрудник ООО «НПФ ЭЛНАП».

Kokorin Sergei Anatol'yevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci. He is a Scientific Researcher in the LLC «NPF ELNAP».

Уситвина Анна Андреевна окончила НИУ «МЭИ» в 2011 г. Аспирант НИУ «МЭИ».

Usitvina Anna Andreevna (Moscow, Russia) – Ph. D. Student in the NRU «MPEI».

Чернокоз Александр Яковлевич окончил радиотехнический факультет Казанского авиационного института в 1970 г. Научный сотрудник ООО «НПФ ЭЛНАП».

Chernokoz Sergei Anatol'yevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn. Sci., He is a Scientific Researcher in the LLC «NPF ELNAP».

Алгоритмы подавления апериодической составляющей в аварийных токах

КУЛИКОВ А.Л., ФАЛЬШИНА В.А., КОЛОБАНОВ П.А.

A.L. Kulikov, V.A. Fal'shina and P.A. Kolobanov, Digital Filters of Fault Currents with Suppressing the DC Component

Выявление повреждений в электроэнергетических системах осуществляется устройствами релейной защиты и противоаварийной автоматики на основе анализа аварийных токов и напряжений. Для обработки сигналов токов и напряжений в цифровой РЗА широкое распространение получило дискретное преобразование Фурье. Информационной в электрическом сигнале является составляющая промышленной частоты. Все остальные компоненты, в том числе высшие гармоники и апериодическая составляющая, являются помехами, снижающими точность оценки аварийных параметров сигнала. Проведен анализ работы цифровых фильтров аварийных токов с подавлением аварийных составляющих по

модельным и натурным экспериментам. Приведены упрощенные алгоритмы квадратурной фильтрации и определены преимущества алгоритмов по объему вычислительных затрат и точности.

Ключевые слова: энергосистема, аварии, аварийные токи и напряжения, активное и реактивное сопротивление, цифровые фильтры

Faults occurring in an electric power system are detected by relay protection and emergency automatic control (RPEC) devices based on an analysis of emergency currents and voltages. The discrete Fourier transform has received wide use for processing the current and voltage signals in digital RPEC devices. The power frequency component is used as a source of information in the electric signal. All other components, including higher harmonic components and the DC component, are noise degrading the accuracy of evaluating the emergency parameters in the signal. Digital filters of fault currents fitted with means for suppressing DC components are analyzed using the results of model and full-scale experiments. Simplified quadrature filtration algorithms are presented, and their advantages in terms of the required computation effort and achieved accuracy are determined.

Key words: power system, failures, fault signals, currents, voltages, digital filters, resistance, reactance

Куликов Александр Леонидович в 2007 г. защитил докторскую диссертацию «Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов» в Ивановском государственном энергетическом университете. Директор филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС, профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета (ЭЭСЭ НГТУ).

Kulikov Aleksandr Leonidovich (Nizhnii Novgorod, Russia) – Doctor Techn. Sci. He is Head of the Branch of the JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System» (FGC UES), Professor of the Nizhnii Novgorod State Technical University (NSTU).

Фальшина Вера Анатольевна окончила факультет автоматики и электромеханики НГТУ в 2011 г. Аспирант кафедры ЭЭСЭ НГТУ. Инженер филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – Нижегородское ПМЭС.

Fal'shina Vera Anatol'yevna (Nizhnii Novgorod, Russia) – Ph. D. student at the NSTU and Engineer of the FGC UES.

Колобанов Петр Алексеевич окончил факультет автоматики и электромеханики НГТУ в 2012 г. Аспирант кафедры ЭЭСЭ НГТУ, инженер ООО «ЭТС-Проект» (Н. Новгород).

Kolobanov Petr Alekseyevich (Nizhnii Novgorod, Russia) – Ph. D. Student at the NSTU and Engineer of the LLC «ETS–Project».

Об оценке пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при ее эксплуатации

КОВАЛЕВ А.П., СОЛЕНАЯ О.Я.

A.P. Kovalev, O.Ya. Solenaya, On the Fire Hazard of a 0,4/0,22 kV Electric Network during Its Operation

Возгорание горючего материала в электрифицированном помещении может наступить всякий раз при совпадении в пространстве и времени следующих трех случайных событий: произошло повреждение электрической проводки, которая находится под напряжением; отказала в срабатывании система защиты, которая обеспечивает пожарную безопасность электрической сети; появился горючий материал вблизи места возможного повреждения электрической проводки. На основе регулярных однородных марковских процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем предложена методика оценки пожарной опасности сети 0,4/0,22 кВ при ее эксплуатации. Получена новая аналитическая зависимость вероятности возгорания горючего материала в течение времени t от частоты повреждения сети, надежности средств защиты и сроков ее диагностики, а также от частоты появления горючего материала вблизи возможного повреждения электрической проводки и длительности его нахождения в

недопустимо близком расстоянии от места возможного появления источника поджигания. Приведен пример расчетов.

Ключевые слова: электросеть 0,4/0,22 кВ, короткое замыкание, частота появления пожаров, пожаробезопасность, марковский процесс

Inflammation of combustible material in a room fitted with electrical equipment may take place when the following three random events coincide in space and time: a fault occurred in the energized electric wiring, the protection system intended for ensure fire safety of the electric network failed to come in action, and there was combustible material near the place of possible fault in the electric wiring. A procedure for estimating the fire hazard of a 0.4/0.22 kV network during its operation is proposed on the basis of regular homogeneous Markov processes with a discrete number of states and continuous time. A new analytic dependence for the probability of combustible material to ignite within time t on the network fault occurrence frequency, reliability of protection system and frequency of its diagnostics, as well as on the frequency of combustible material to appear near the place in which possible fault may occur in the electric wiring and the time for which this material dwells at inadmissibly close distance to the place in which an ignition source may appear. A calculation example is given.

Key words: 0.4/0.22 kV electric network, short-circuit fault, fire occurrence frequency, fire safety, Markov process

Ковалев Александр Петрович окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института в 1971 г. и математический факультет Донецкого государственного университета в 1976 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Основы теории и методы оценки безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах». Профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» Донецкого национального технического университета (ДНТУ).

Kovalev Aleksandr Petrovich (Donetsk, Ukraine) – Doctor Techn. Sci. He is a Professor of the Donetsk National Technical University (DNTU).

Солёная Оксана Ярославовна окончила электротехнический факультет ДНТУ в 2007 г. и факультет менеджмента ДНТУ в 2009 г. Аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ДНТУ.

Solenaya Oksana Yaroslavovna (Donetsk, Ukraine) – Ph. D. Student at the DNTU.

Вероятностное моделирование выпуска продукции и электропотребления дугowymi сталеплавильными печами

КУРЕННЫЙ Э.Г., ДМИТРИЕВА Е.Н., ЛЮТЫЙ А.П., БУЛГАКОВ А.А.

E.G. Kurennyi, E.N. Dmitrieva, A.P. Lyutyi and A.A. Bulgakov, Probabilistic Modeling of Production Output and Power Consumption by Arc Steel Melting Furnaces

Рассматриваются вероятностные распределения параметров режима плавок в дугowych сталеплавильных печах (ДСП). В стационарном режиме для объема выпуска продукции и расхода электроэнергии приняты нормальные законы распределения. Получено общее решение для распределения удельного расхода электроэнергии. Показано, что для ДСП это распределение можно считать нормальным. Числовые характеристики нормальных распределений параметров режима предложено определять по массиву опытных данных с корректировкой значений с недовыпуском продукции и перерасходом электроэнергии. В общем случае корректировка осуществляется путем симметрирования массива опытных значений выпуска продукции и расхода электроэнергии. Для ДСП рекомендуется симметрировать статистическую функцию распределения удельных расходов электроэнергии. Найдены области практически достоверных параметров режима: в общем случае в виде эллипса равной плотности вероятностей системы «выпуск продукции – расход электроэнергии», для ДСП – диапазона расчетных значений

удельных расходов электроэнергии. Полученные результаты позволяют решать задачи нормирования удельных расходов электроэнергии и энергосбережения.

Ключевые слова: сталеплавильная печь, выпуск продукции, расход электроэнергии, вероятностное распределение, опытные данные, корректировка незакономерных отклонений

Probabilistic distributions of melt operating parameters in arc steel melting furnaces (ASMFs) are considered. Gaussian distribution laws are adopted for the amount of released product and electric energy expenditure in a steady mode of operation. A general solution for the distribution of specific electric energy expenditure is obtained. It is shown that for an ASMF this distribution can be regarded to be a Gaussian one. A proposal is given to determine the numerical characteristics of Gaussian distributions of operating parameters from the array of experimental data with correcting the values involving underproduction of goods and over expenditure of electric energy. In the general case, correction is carried out by balancing the array of experimentally obtained values of production release and expenditure of electric energy. For ASMFs it is recommended to balance the statistical distribution function of specific electric energy expenditures. Regions of practically trustworthy operating parameters are found: in the general case in the form of ellipsis of equally dense probabilities of the production release- electric energy expenditure system, and for an ASMF as a range of calculated values of specific expenditures of electric energy. By using the obtained results one can solve matters concerned with standardizing specific expenditures of electric energy and energy conservation.

Key words: steel melting furnace, production release, expenditure of electric energy, probabilistic distribution, experimental data, correction of irregular deviations

Куренный Эдуард Григорьевич в 1961 г. окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Основы общей теории вероятностных процессов в заводских электрических сетях» в НПИ. Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов Донецкого национального технического университета (ДонНТУ).

Kurennyi Eduard Grigor'yevich (Donetsk, Ukraine) – Doctor Techn. Sci., Professor in the Department of the Donetsk National Technical University (DNTU).

Дмитриева Елена Николаевна в 1968 г. окончила электромеханический факультет Донецкого политехнического института. В 1976 г. защитила кандидатскую диссертацию. Скончалась в 2013 г.
Dmitriyeva Elena Nikolayevna – Cand. Techn. Sci. She died in 2013.

Лютый Александр Павлович, кандидат технических наук, главный инженер ОАО «Днепрспецсталь»

Lyutyi Aleksandr Pavlovich (Donetsk, Ukraine) – Cand. Techn. Sci. He is Chief Power Engineer in the JSC «Dneprspetsstal'».

Булгаков Александр Александрович окончил электротехнический факультет ДонНТУ в 2011 г. Ассистент кафедры электрических систем ДонНТУ.

Bulgakov Aleksandr Aleksandrovich (Donetsk, Ukraine) — Assistant in the Department of the DNTU.

Типовые ячейки-многополюсники решетчатых схем замещения плоскомеридианных электромагнитных и температурных полей в задачах электротехники

ИНКИН А.И., АЛИФЕРОВ А.И., БЛАНК А. В.

A.I. Inkin, A. I. Aliferov and A. V. Blank, Standard Multipoint Cells of Lattice-Type Equivalent Networks for Representing Plane-Meridian Electromagnetic and Temperature Fields in Solving Electric Engineering Problems.

Двумерные осесимметричные электромагнитные и температурные поля – один из распространенных видов полей, к исследованиям которых приводит постановка различных инженерных задач в области теоретической электротехники. Общих теоретических решений таких задач не существует. В связи с этим в инженерной практике обычно используются различные эмпирические зависимости и основанные на них методики либо применяются численные методы решения дифференциальных уравнений теории поля. В статье разработаны алгоритмы синтеза типовых схем замещения прямоугольных ячеек малых размеров для плоскомеридианных электромагнитных и температурных полей. В основе предложенных алгоритмов лежат фундаментальные законы электромагнетизма и теории теплопередачи в интегральной форме, что обеспечивает простоту, наглядность и адекватность схемной аппроксимации электромагнитных и температурных полей. Представлены конкретные примеры, иллюстрирующие расчеты плоскомеридианного электромагнитного и температурного полей с использованием решетчатых схем в сравнении с численными расчетами. Статья имеет прикладную направленность и дает основание считать перспективным использование решетчатых схем замещения полей в научных исследованиях и инженерной практике.

Ключевые слова: электромагнитное поле, температурное поле, исследование, инженерные задачи, решетчатые схемы замещения

Two-dimensional axially symmetrical electromagnetic and temperature fields are one of widely encountered kinds of fields the need to analyze which follows from the statement of various practical problems in the field of theoretical electrical engineering. There are no general theoretical solutions to such problems. In view of this, various empirical dependences and techniques based on these dependences are commonly used in engineering practice, or numerical methods for solving the differential equations of field theory are applied. Algorithms for synthesizing standard equivalent networks of small-size rectangular cells for plane-meridian electromagnetic and temperature fields are developed. The proposed algorithms are based of the fundamental laws of electromagnetism and theory of heat transfer in integral form due to which the equivalent circuits approximating electromagnetic and temperature fields are simple and clear and adequately reflect the originals. Specific examples illustrating the calculations of plane-meridian electromagnetic and temperature fields with the use of lattice-type equivalent networks in comparison with numerical calculation methods are presented. The article is aimed at solving applied problems and gives us grounds to consider that application of lattice-type equivalent networks for analyzing fields has good prospects for use in scientific research works and in engineering practice.

Key words: electromagnetic field, temperature field, investigation, engineering problems, Lattice-type equivalent networks

Инкин Алексей Иванович окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) в 1959 г. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию «Теория и электромагнитный расчет электрических машин с составными активными объемами» в Московском энергетическом институте. Профессор кафедры теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Inkin Aleksei Ivanovich (Novosibirsk, Russia) – Doctor Techn. Sci. He is Professor at the Novosibirsk State Technical University (NSTU).

Алиферов Александр Иванович окончил электромеханический факультет НЭТИ в 1978 г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Электротепловые процессы в токоведущих проводниках произвольной конфигурации. Теория и практика» в НГТУ. Заведующий кафедрой автоматизированных электротехнологических установок НГТУ.

Aliferov Aleksandr Ivanovich (Novosibirsk, Russia) – Doctor Techn. Sci. He is Head of the Department at the NSTU.

Бланк Алексей Валерьевич окончил электромеханический факультет НГТУ в 1999 г. В 2005 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка метода расчета магнитного поля в дискретно-однородных цилиндрических структурах явнополюсных электрических машин» в НГТУ. Доцент

кафедры теоретических основ электротехники НГТУ.

Blank Aleksei Valer'yevich (Novosibirsk, Russia) – Cand. Techn. Sci. He is Associate Professor at the NSTU.

Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона

БУТЫРИН П.А., ГУСЕВ Г.Г., КУЖМАН В.В., МИХЕЕВ Д.В.

P.A. Butyrin, G.G. Gusev, V.V. Kuzhman and D.V. Mikheev, Mathematical and Physical Modeling of a Coilcap-Based Filtering and Compensating Device Taking into Account Nonlinear and Distributed Nature of Its Parameters

Предлагается подход к математическому и физическому моделированию фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона, который представляет собой единый объект и реализует функции компенсатора реактивной мощности и фильтра высших гармоник. Каткон выгодно отличается по массогабаритным параметрам от традиционных фильтрокомпенсирующих устройств, собранных отдельно из компенсаторов реактивной мощности и фильтров высших гармоник. Применение каткона в качестве фильтрокомпенсирующего устройства является удачным техническим решением, так как напряжения высших гармоник на катконе, возникающие при резонансе, не являются критичными для его изоляции. Это обусловлено тем, что составляющие напряжения сети высших гармоник и основной частоты напряжения питания по уровню не соизмеримы. Моделирование каткона с магнитопроводом осуществляется как моделирование нелинейного объекта с распределёнными параметрами на основе метода усреднения. В результате получены простые аналитические выражения интегральных параметров устройства. Особое внимание уделено зависимости резонансной частоты каткона от длины немагнитного зазора магнитопровода реактора. Анализируются частотные характеристики фильтрокомпенсирующего устройства, определяются коэффициенты аппроксимации. Физический эксперимент подтверждает адекватность полученных выражений реальным параметрам фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующее устройство, реактор, конденсатор, магнитопровод, цепь с распределёнными параметрами, математическая модель, метод усреднения, эквивалентная индуктивность

The article describes an approach to mathematical and physical modeling of a coil-capacitor-based (coil cap) filtering and compensating device, which is made as an integer piece of equipment implementing the functions of a reactive power compensator and a filter of higher harmonic components. The coil cap differs advantage from conventional filtering and compensating devices assembled from reactive power compensators and filters of higher harmonic components in its mass and dimension characteristics. The use of a coil cap as a filtering and compensating devices a successful technical solution because the higher harmonic voltages across the coil cap that arise under resonance conditions are not critical for its insulation. This feature is stemming from the fact that the higher harmonic components of network voltage are not commensurable in level with the fundamental harmonic component of power supply voltage. The coil cap with a magnetic core is modeled as an online object with distributed parameters using the averaging method. As a result, simple analytic expressions for the device's integral parameters are obtained. Special attention is paid to the dependence of coil cap resonance frequency on the reactor core nonmagnetic gap's length. The frequency characteristics of the filtering and compensating device are analyzed, and the approximation coefficients are determined. The adequacy of the obtained expressions to the real parameters of a coil cap-based filtering and compensating device is confirmed by a physical experiment.

Key words: filtering and compensating device, reactor, capacitor, magnetic core, circuit with distributed parameters, mathematical model, averaging method, equivalent inductance, resonance frequency, gap, frequency response, experiment

Бутырин Павел Анфимович окончил энергетический факультет Челябинского политехнического института в 1974 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте (МЭИ). Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники (ТОЭ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), член-корреспондент РАН. **Butyrin Pavel Anfimovich** (Moscow, Russia) – corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department, Moscow Power Engineering Institute (MPEI).

Гусев Геннадий Григорьевич окончил МЭИ в 1962 г. защитил докторскую диссертацию в 1996 г. Профессор кафедры ТОЭ НИУ «МЭИ». **Gusev Gennadii Grigor'yevich** (Moscow, Pussia) – Doctor Techn. Sci., Professor of the Department, MPEI.

Кужман Виктор Валерьевич окончил факультет вычислительной техники Московского института электронной техники в 2003 г. Аспирант кафедры ТОЭ НИУ «МЭИ». **Kuzhman Viktor Valer'yevich** (Moscow, Russia) – Ph. D. student in the Department of the MPEI.

Михеев Дмитрий Владимирович окончил Институт электротехники НИУ «МЭИ» в 2014 г. Аспирант кафедры ТОЭ НИУ «МЭИ». **Mikheev Dmitry Vladimirovich** (Moscow, Pussia) Ph. D. student in the Department of the MPEI.

Электромагнитная индукция в проводниках обмотки, расположенной в пазах якоря электрической машины постоянного тока
МАЛЫГИН В.М.

V.M. Malygin, Electromagnetic Induction in Conductors of the Winding Placed in the Armature Slots of a DC Electrical Machine

Предлагается объяснение возникновения ЭДС в проводниках обмотки якоря машины постоянного тока. Для этого предложено разделить результирующее поле в пазу на составляющие, связанные с первичными и вторичными источниками поля, движущимися относительно друг друга. Действие закона электромагнитной индукции при возникновении ЭДС объясняется тем, что расположенные в пазах проводники движутся в замкнутом потоке, проходящем сквозь обмотку возбуждения, и неподвижны во вторичном магнитном поле зубцов. Этим подтверждается правильность той точки зрения, что ослабление в статике постоянного магнитного поля в области экранирования с помощью магнетика определенной формы происходит за счет взаимной компенсации действия вторичного магнитного поля этих тел (магнетика) и внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: электрическая машина постоянного тока, обмотка якоря, ЭДС, магнитное поле, электромагнитная индукция

An explanation why an EMF is excited in the conductors of the DC machine armature winding is proposed. To this end, it is proposed to decompose the resulting field in the slot into components connected with the primary and secondary field sources moving with respect to each other. The electromagnetic law's coming into picture when an EMF appears is attributed to the fact that the conductors placed in the slots move in a closed flux passing through the excitation winding and are immobile with respect to the secondary magnetic field of teeth. This confirms the correctness of the opinion according to which a stationary DC magnetic field is attenuated in the zone of screening by means of a suitably shaped magnetic material due to mutual compensation of the action caused by the secondary magnetic field of these bodies (magnetic) and the external magnetic field.

Key words: DC electrical machine, armature winding, EMF, magnetic field, electromagnetic Induction

Малыгин Вячеслав Михайлович окончил в 1966 г. Московский институт инженеров железно_

дорожного транспорта. В 1987 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию «Диагностирование подшипниковых узлов высокоскоростных электрических машин». Начальник лаборатории НИИ электромеханики, г. Истра.

Malygin Vyacheslav Mikhailovich (Istra, Moscow oblast, Russia) – Cand. Techn. Sci.,
Head of the Laboratory of the Electromechanics and Research Institute (Istra, Moscow oblast).

Михаил Васильевич Шулейкин (1884–1939) (К 130-летию со дня рождения)

Григорьев Н.Д.

N.D. Grigor'yev, Mikhail Vasil'yevich Shuleikin (To Mark the 130th Anniversary)