

Испытания макетов мощных силовых трансформаторов для проверки их стойкости при коротких замыканиях. Ч. 2. Примеры макетов блочных трансформаторов

АДЖИЕВ Д.К., ЛАРИН В.С., ПАНИБРАТЕЦ А.Н.

В предыдущей статье (Ч. 1) рассмотрены основные принципы и мировой опыт (по данным CIGRE) разработки, расчетов и испытаний на стойкость при коротких замыканиях масштабных макетов мощных однофазных силовых трансформаторов, а также правила распространения результатов испытаний макета на реальный трансформатор с целью подтверждения его стойкости при коротких замыканиях.

Отмечена важность разработки и испытаний таких макетов для обоснования надежности мощных трансформаторов отечественного производства. В настоящей статье приведены более подробные расчеты одного из макетов трансформатора мощностью 570 МВА, описанного в предыдущей статье. Также рассмотрены результаты эскизного проектирования двух наиболее часто применяемых в РФ блочных трансформаторов мощностью 630 МВА и 417 МВА и соответствующих им макетов на базе расчетов стойкости при коротких замыканиях по методике РЭСТ-ВЭИ.

Ключевые слова: трансформаторы силовые, демонстрация стойкости при КЗ, расчеты и испытания масштабных макетов.

In the previous article (Part 1) the basic principles and international experience (according to CIGRE) of the development, calculation and testing of short-circuit resistance of large-scale models of powerful single-phase power transformers, as well as the rules for distributing test results of the model to a real transformer in order to confirm its resistance to short circuits, are considered. The importance of developing and testing such models to substantiate the reliability of high-power transformers of domestic production was noted. This article provides more detailed calculations of one of the 570 MVA transformer layouts described in the previous article. The results of the preliminary design of the two most commonly used block

transformers in the Russian Federation with a capacity of 630 MVA and 417 MVA and their corresponding layouts based on calculations of resistance to short circuits using the REST-VEI method are also considered.

Key words: power transformers, short-circuit resistance demonstration, calculations and tests of scale models.

Электротехника, 2026, №3, стр. 17-22

Резистивное переключение в порошковых полупроводниковых материалах

АЛТУДОВ Ю.К., ГАЕВ Д.С., РЕХВИАШВИЛИ С.Ш.

Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования эффекта резистивного переключения в сжатых порошковых образцах кремния *n*- и *p*-типа, германия *p*-типа и оксида меди *p*-типа. Измеренные вольт-амперные характеристики имеют симметричную форму и гистерезис, площадь петель которого зависит от удельного сопротивления и дисперсности материала. Германий и оксид меди обладают сравнительно низкими коэффициентами теплопроводности, поэтому из-за недостаточного отвода тепла в этих материалах имеет место тепловой пробой; для кремния характерен лавинный пробой. Разработана теоретическая модель резистивного переключения в порошковом материале, основанная на применении функции активации и принципов автоматизации. Расчеты, проведенные в рамках такой модели, качественно описывают полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: порошковые полупроводники, резистивное переключение, электрический пробой, мемристор, динамический гистерезис, имитационная модель.

The results of an experimental and theoretical study of the effect of resistive switching in compressed powder samples of *n*- and *p*-type silicon, *p*-type germanium, and *p*-type copper oxide are presented. The measured volt-ampere characteristics have a symmetrical shape and hysteresis, the loop area of which depends on the resistivity and dispersion of the material. Germanium and copper oxide have relatively low thermal conductivity coefficients, therefore, due to insufficient heat dissipation in these materials, thermal breakdown occurs; avalanche breakdown is characteristic of silicon. A theoretical model of resistive switching in a powder material based on the application of the activation function and the principles of automation has been developed. The calculations carried out within the framework of such a model

qualitatively describe the experimental data obtained.

Key words: powder semiconductors, resistive switching, electrical breakdown, memristor, dynamic hysteresis, simulation model.

Электротехника, 2026, №3, стр. 22-28

Разработка магнита с обмоткой из ВТСП-2 лент для исследовательских целей

ИВАНОВ Н.С., КАДЕРОВ В.А., ЗУБКО В.В., ШИШОВ Д.М., ЗАНЕГИН С.Ю.

Для исследовательских целей разработан магнит на основе ВТСП-2 лент с известными свойствами. Конструктивным параметром является магнитное поле в достаточно широкой апертуре магнита, которое достигнуто максимальным уменьшением нормальной составляющей магнитного поля к широкой поверхности ВТСП-ленты обмотки с помощью формы магнитопровода. При оптимизации формы магнита использовался метод конечных элементов. Максимальное магнитное поле в апертуре магнита составляет около 1,25 Тл при температуре 77,4К. Магнит будет использован для изучения анизотропии критического тока различных ВТСП-2 лент и потерь во внешнем магнитном поле.

Ключевые слова: ВТСП магнит, ВТСП-2 лента, оптимизация.

A magnet based on HTS-2 tapes with known properties has been developed for research purposes. The design parameter is the magnetic field in a sufficiently wide aperture of the magnet, which is achieved by maximizing the reduction of the normal component of the magnetic field to the wide surface of the HTS-tape winding using the shape of the magnetic circuit. The finite element method was used to optimize the shape of the magnet. The maximum magnetic field in the aperture of the magnet is about 1,25 Tl at a temperature of 77,4 K. The magnet will be used to study the anisotropy of the critical current of various HTS-2 tapes and losses in an external magnetic field.

Key words: HTSP magnet, HTSP-2 tape, optimization.

Электротехника, 2026, №3, стр. 29-35

Определение неисправного конденсатора в составе статического тиристорного компенсатора

ТУГУЛЬБАЕВ С.А., КОРНИЛОВ Г.П., АНОХИН В.В.

Рассмотрена проблема определения неисправного элемента конденсаторной батареи в составе фильтра высших гармоник статического тиристорного компенсатора.

Проанализированы существующие способы поиска поврежденного конденсатора, основанные на анализе тока и напряжения небаланса. Показана возможность применения метода анализа токов небаланса при поиске неисправного конденсатора для статических тиристорных компенсаторов, устанавливаемых в системах электроснабжения дуговых сталеплавильных печей высокой и сверхвысокой мощности.

Для широкополосного фильтра второй гармоники предложен анализ тока резистора с целью дополнительного сокращения области поиска поврежденного конденсатора.

Исследование проводилось с помощью имитационной модели в пакете MATLAB Simulink. Показано значительное сокращение времени поиска неисправного элемента конденсаторной батареи в составе фильтров. Предложенный способ реализуем в условиях производства с использованием возможностей существующей системы автоматического управления статическим тиристорным компенсатором MACH2.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, дуговая сталеплавильная печь, конденсаторная батарея, неисправный конденсатор, фильтр высших гармоник, ток небаланса.

The problem of determining a faulty element of a capacitor bank in the composition of a higher harmonic filter of a static thyristor compensator is considered. The existing methods of searching for a damaged capacitor based on the analysis of current and voltage imbalance have been analyzed. The possibility of using the unbalance current analysis method in the search for a faulty capacitor for static stationary compensators installed in power supply systems of arc furnaces of high and ultra-high power is shown. For a broadband second harmonic filter, an analysis of the resistor current is proposed in order to further reduce the search area for a damaged capacitor. The study was conducted using a simulation model in the MATLAB Simulink package. A significant reduction in the search time for a faulty capacitor battery element in the filters is shown. The proposed method is implemented in production conditions using the capabilities of the existing automatic control system for the static thyristor compensator MACH2.

Key words: static thyristor compensator, arc steel furnace, capacitor bank, faulty capacitor,

high harmonic filter, unbalance current.

Электротехника, 2026, №3, стр. 36-42

Расчет и анализ коэффициента преобразования и характеристик повышающего квази-ШИМ преобразователя постоянного напряжения

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А., БОНДАРЕНКО Д.Н., ЯКОВЛЕВ И.Б.

Выполнен аналитический расчет и анализ основных интервалов работы повышающего квази-ШИМ преобразователя на периоде частоты коммутации. По результатам анализа определены условия устойчивой работы преобразователя в режиме мягкой коммутации с резонансом напряжения при выключении силового ключа. По результатам расчета усредненного на периоде коммутации значения тока в резонансном дросселе получена аналитическое выражение для коэффициента преобразования постоянного напряжения повышающего преобразователя. Показано, что в общем случае коэффициент преобразования является сложной функцией трех переменных: частоты коммутации, коэффициента регулирования по методу ШИМ и тока нагрузки. При выборе тока нагрузки в качестве параметра при постоянной частоте коммутации получена формула для расчета семейства регулировочных характеристик преобразователя. При выборе в качестве параметра коэффициента регулирования при постоянной частоте коммутации получена формула для расчета семейства нагрузочных характеристик. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие правильность основных теоретических расчетов. Отмечено дуальное соответствие между двумя базовыми вариантами повышающего и понижающего квази-ШИМ преобразователей.

Ключевые слова: повышающий квази-ШИМ преобразователь, резонансный контур, коэффициент преобразования, регулировочная характеристика, внешняя характеристика.

An analytical calculation and analysis of the main operating intervals of a quasi-PWM boost converter during the switching frequency period has been performed. Based on the results of the analysis, the conditions for stable operation of the converter in the soft switching mode with voltage resonance when the power switch is turned off are determined. Based on the calculation results of the current value in the resonant choke averaged over the switching

period, an analytical expression for the DC voltage conversion coefficient of the boost converter is obtained. It is shown that, in the general case, the conversion coefficient is a complex function of three variables: the switching frequency, the PWM control coefficient, and the load current. When selecting the load current as a parameter at a constant switching frequency, a formula was obtained for calculating the family of control characteristics of the converter. When selecting the control coefficient as a parameter at a constant switching frequency, a formula was obtained for calculating a family of load characteristics.

Experimental results confirming the correctness of the basic theoretical calculations are presented. The dual correspondence between the two basic variants of the step-up and step-down quasi-PWM converters is noted.

Key words: quasi-PWM boost converter, resonant circuit, conversion coefficient, adjustment characteristic, external characteristic.

Электротехника, 2026, №3, стр. 43-50

Моделирование и исследование ветроэлектрических установок с активно-реактивными синхронными машинами

ВОРОНЦОВ А.Г., РОЗБИЦКИЙ Г.Г., ПРОНИН М.В., ГЛУШАКОВ В.В.

Рассмотрено техническое решение, основанное на использовании активно-реактивных синхронных машин (АРСМ), содержащих в роторе модули машин реактивных и на постоянных магнитах с общим статором. Дано математическое описание АРСМ в виде единой модели, описана компьютерная модель. Предусмотрена стабилизация заданной активной мощности ветроэлектрических установок (ВЭУ) путем регулирования амплитуды тока статора нагрузкой. Предусмотрена стабилизация напряжения статора путем регулирования фазы вектора тока относительно поперечной оси реактивного модуля ротора. Определены характеристики конкретной АРСМ в зависимости от частоты вращения и заданного взаимного сдвига продольных осей частей ротора, относящихся к реактивному модулю и модулю с постоянными магнитами. Для конкретной конструкции рекомендован взаимный сдвиг продольных осей ротора, равный 70° .

Ключевые слова: активно-реактивная синхронная машина, синхронная машина с постоянными магнитами, анизотропная магнитная проводимость, преобразователь частоты, моделирование.

A technical solution based on the use of active-reactive synchronous machines (ARSM) containing modules of reactive and permanent magnet machines with a common stator in the rotor is considered. A mathematical description of the ARSM is given in the form of a single model, and a computer model is described. It is planned to stabilize the set active power of wind turbines by regulating the amplitude of the stator current by the load. The stator voltage is stabilized by adjusting the phase of the current vector relative to the transverse axis of the rotor reaction module. The characteristics of a specific APSM are determined depending on the rotational speed and a given mutual displacement of the longitudinal axes of the rotor parts related to the reactive module and the permanent magnet module. For a specific design, a mutual displacement of the longitudinal axes of the rotor equal to 70° is recommended.

Key words: active-reactive synchronous machine, synchronous machine with permanent magnets, anisotropic magnetic conductivity, frequency converter, modeling.

Электротехника, 2026, №3, стр. 51-56

Повышение энергоэкономичности электромагнитного привода исполнительных механизмов систем топливоподачи среднеоборотных дизелей

АХТЫРСКИЙ С.А.

Рассмотрена схема блока силовых ключей, предназначенного для увеличения мощности электрических сигналов специальной формы, питающих обмотки электромагнитов дозирующих клапанов или форсунок систем подачи топлива среднеоборотных дизелей. Выбранная форма управляющего сигнала состоит из трех ступеней: форсирующей, удерживающей и размагничивающей. Схема обеспечивает повышение энергоэкономичности и надежности электромагнитного привода благодаря уменьшению рассеиваемой мощности на этапе формирования намагничивающего тока и повышения стабильности его работы. Это достигается путем применения в схеме дифференцирующих устройств, которые в комплексе с другими дополнительными элементами ограничивают действие форсирующего импульса в момент притяжения якоря электромагнита к его сердечнику. Выполнено расчетное моделирование электромагнитного привода, представлены расчетные зависимости тока в обмотке, напряжения на ней и перемещения якоря. Предложенный способ ограничения длительности форсирующего импульса и схемные решения целесообразно применять к

любой конструкции блока силовых ключей, так как надежность электромагнитного привода повышается не только благодаря уменьшению потребляемой мощности, но и благодаря исключению датчика перемещения затвора электромагнита.

Ключевые слова: электромагнитный привод, электромагнит, электронные системы подачи топлива, блок силовых ключей, энергоэкономичность, время срабатывания электромагнита, моделирование электромагнитного привода, форсирующий импульс управления.

The scheme of a block of power switches designed to increase the power of special-shaped electrical signals feeding the windings of electromagnets of metering valves or injectors of fuel supply systems of medium-speed diesel engines is considered. The selected control signal form consists of three stages: forcing, retaining, and demagnetizing. The circuit provides an increase in the energy efficiency and reliability of the electromagnetic drive by reducing the power dissipation at the stage of forming the magnetizing current and increasing the stability of its operation. This is achieved by using differentiating devices in the circuit, which, in combination with other additional elements, limit the effect of the forcing pulse at the moment of attraction of the armature of the electromagnet to its core. Computational modeling of an electromagnetic drive has been performed, and calculated dependences of the current in the winding, the voltage on it, and the armature displacement are presented. The proposed method of limiting the duration of the forcing pulse and circuit solutions should be applied to any design of the power key block, since the reliability of the electromagnetic drive increases not only by reducing power consumption, but also by eliminating the sensor for moving the gate of the electromagnet.

Key words: electromagnetic drive, electromagnet, electronic fuel supply systems, power switch block, energy efficiency, electromagnet response time, electromagnetic drive simulation, boost control pulse.

Электротехника, 2026, №3, стр. 56-62

Система автоматического управления токами коллекторных тяговых электродвигателей электровоза переменного тока с управляемыми преобразователями возбуждения

САВОСЬКИН А.Н., МИХАЛЬЧУК Н.Л., ПУДОВИКОВ О.Е., ЧУЧИН А.А.

Рассматривается система автоматического управления токами коллекторных тяговых электродвигателей электровозов переменного тока с управляемыми мостовыми транзисторными IGBT-преобразователями, шунтирующими обмотки возбуждения электродвигателей. Система обеспечивает возможность реализации тяговых характеристики независимого и последовательного возбуждения двигателей, а также поосного и потележечного управления силой тяги электровоза. Предложена математическая модель тягового двигателя, учитывающая нелинейность кривой намагничивания и выполняющая отдельный учёт вихревых токов, создаваемых обмоткой главных полюсов, а также обмотками добавочных полюсов и компенсационными обмотками. Расчёты электромагнитных, электромеханических и механических процессов, возникающих при трогании и разгоне электровоза с грузовым поездом, подтвердили эффективность предложенной системы автоматического управления токами тяговых двигателей.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, коллекторные тяговые электродвигатели, управляемый полупроводниковый транзисторный преобразователь возбуждения, независимое возбуждение коллекторных тяговых электродвигателей, математическая модель, процессы трогания и разгона грузового поезда.

A system for automatic current control of collector traction electric motors of alternating current electric locomotives with controlled bridge transistor IGBT converters shunting the excitation windings of electric motors is considered. The system provides the possibility of realizing the traction characteristics of independent and sequential excitation of engines, as well as axial and lateral control of the traction force of an electric locomotive. A mathematical model of a traction motor is proposed that takes into account the nonlinearity of the magnetization curve and separately accounts for eddy currents generated by the winding of the main poles, as well as windings of additional poles and compensation windings. Calculations of electromagnetic, electromechanical and mechanical processes occurring when starting and accelerating an electric locomotive with a freight train have confirmed the effectiveness of the proposed system for automatic control of traction motor currents.

Key words: alternating current electric locomotive, collector traction motors, controlled semiconductor transistor excitation converter, independent excitation of collector traction motors, mathematical model, processes of starting and accelerating a freight train.

Использование нейронной сети в системе индивидуального электропривода тепловоза

ЛОГИНОВА Е.Ю., АГАФОНОВ К.В.

Предложена система комплексной защиты тяговых агрегатов тепловоза на базе индивидуального электропривода. Система объединяет функции защит от боксования и перегрева обмоток тягового электродвигателя. Для повышения быстродействия работы системы и упрощения ее структуры обосновано применение нейронной сети управления напряжением тягового электродвигателя в аварийных режимах.

Управление напряжением ограничивает проскальзывание колеса относительно рельса в пределах 3 % и температуру обмотки якоря электродвигателя в пределах 5 °С относительно допустимого значения. Архитектура нейронной сети предусматривает два скрытых слоя и шесть входных нейронов. Для повышения точности работы сети ее алгоритм используется процедура стандартизации значений входных нейронов.

Выходной нейрон генерирует значение напряжения на входе тягового электродвигателя; для напряжения принималась линейная функция активации. Для скрытых слоев сети приняты функции активации типа ReLU. Обучение нейронной сети выполнялось с использованием расчетных данных моделирования управления напряжением тягового электродвигателя для восстановления сцепления колеса с рельсом и поддержания температуры обмотки якоря на заданном уровне. Результаты обучения сети показали, что ее архитектура соответствует требованиям решаемой задачи: на 20-м цикле обучения ошибка составляет менее 1 % от заданного значения напряжения. При напряжении тягового электродвигателя менее 600 В генерируемое значение целевого напряжения практически соответствует заданному. При напряжении тягового электродвигателя более 600 В генерируемое целевое напряжение может определяться неоднозначно, а его максимальное отклонение от заданного значения не превышает 8 %, что объясняется недостаточным объемом статистических данных при напряжении двигателя более 600 В.

Ключевые слова: индивидуальный тяговый электропривод, защита от боксования, защита от перегрева обмоток тягового электродвигателя, нейронная сеть, архитектура нейронной сети, обучение нейронной сети управления напряжением.

A system of integrated protection of traction units of a diesel locomotive based on an individual electric drive is proposed. The system combines the functions of protection against boxing and overheating of the traction motor windings. To increase the speed of the system and simplify its structure, the use of a neural network for voltage control of a traction electric motor in emergency modes is justified. Voltage control limits the wheel slip relative to the rail within 3% and the temperature of the armature winding of the electric motor within 5 °C relative to the permissible value. The neural network architecture provides for two hidden layers and six input neurons. To improve the accuracy of the network, its algorithm uses a procedure for standardizing the values of input neurons. The output neuron generates the voltage value at the input of the traction motor; a linear activation function was used for the voltage. Activation functions of the ReLU type have been adopted for hidden network layers. The neural network was trained using calculated simulation data for controlling the voltage of a traction electric motor to restore the wheel's grip on the rail and maintain the temperature of the armature winding at a set level. The results of the network training showed that its architecture meets the requirements of the problem being solved: on the 20th training cycle, the error is less than 1% of the set voltage value. When the voltage of the traction motor is less than 600 V, the generated value of the target voltage practically corresponds to the set value. With a traction motor voltage of more than 600 V, the target voltage generated can be ambiguously determined, and its maximum deviation from the set value does not exceed 8%, which is explained by insufficient statistical data at a motor voltage of more than 600 V.

Key words: individual traction electric drive, protection against boxing, protection against overheating of traction motor windings, neural network, architecture neural network, neural network voltage control training.

Электротехника, 2026, №3, стр. 70-79

Моделирование работы фильтрокомпенсирующего устройства в среде SimInTech СБИТНЕВ Е.А., СЕМЕНОВ Д.А, КОНДРАНЕНКОВА Т.Е.

В связи с ростом доли нелинейной нагрузки в электрических сетях увеличивается суммарный коэффициент гармонических составляющих. На начальном этапе работы по улучшению качества электрической энергии конкретного объекта вместо инструментальных обследований возможно применение виртуальной компьютерной модели, созданной на основе реальной схемы электроснабжения. В статье проведен

анализ влияния высших гармоник на качество электроэнергии, рассмотрены методы и работа модели фильтра высших гармоник для снижения несинусоидальности питающего напряжения. В основу моделирования положены библиотеки программы SimInTech. Виртуальная модель позволяет изменять параметры внешней питающей сети и нагрузки в реальном времени под любой конкретный объект с предварительным расчетом схемы замещения. Результаты моделирования показали, что в исследуемых режимах коэффициенты искажения несинусоидальности тока при включении в работу фильтрокомпенсирующего устройства уменьшаются до допустимых значений.

Ключевые слова: качество электрической энергии, нелинейная нагрузка, несинусоидальность, фильтрокомпенсирующее устройство, моделирование, SimInTech.

Due to the increasing share of nonlinear load in electrical networks, the total coefficient of harmonic components increases. At the initial stage of work to improve the quality of electrical energy of a particular facility, instead of instrumental surveys, it is possible to use a virtual computer model based on a real power supply scheme. The article analyzes the influence of higher harmonics on the quality of electricity, discusses the methods and operation of the higher harmonic filter model to reduce the non-sinusoidal supply voltage. SimInTech software libraries are used as the basis for modeling. The virtual model allows you to change the parameters of the external supply network and load in real time for any specific object with a preliminary calculation of the replacement scheme. The simulation results showed that in the studied modes, the distortion coefficients of the non-sinusoidal current decrease to acceptable values when the filter compensating device is switched on.

Key words: electrical energy quality, nonlinear load, non-sinusoidal, filter compensating device, modeling, SimInTech.

Электротехника, 2026, №3, стр. 80-85

Защита секционированной сверхпроводящей магнитной системы магнитно-резонансного томографа

ЧЕРНОГУБОВСКИЙ М.А., АСТРОВ М.С., ГРИГОРЬЕВ С.А.

Снижение температуры и напряжения при выводе тока в случае пассивной защиты достигается секционированием сверхпроводящих обмоток магнитов диодно-резисторными цепями. Использование резисторов в качестве нагревателей,

активирующихся после возникновения нормальных зон, ускоряет переход в нормальное состояние сверхпроводника всех секций, но системы такого рода предусматривают большое число элементов для многокатушечных магнитов. Более практичный способ перевода в нормальное состояние обмоток нескольких секций при шунтировании цепями с вентильными свойствами и компоновке катушек в секции близкой индуктивности обеспечивает защиту, позволяющую эффективно снизить предельные температуры и напряжения в многокатушечной СП магнитной системе.

Ключевые слова: МРТ, секционированная СП магнитная система, пассивная защита, моделирование защитного вывода тока

The reduction of temperature and voltage during current output in the case of passive protection is achieved by sectioning the superconducting magnet windings with diode-resistor circuits. The use of resistors as heaters, which are activated after the occurrence of normal zones, accelerates the transition to the normal state of the superconductor of all sections, but systems of this kind provide for a large number of elements for multi-coil magnets. A more practical way to restore the windings of several sections to a normal state when shunting circuits with valve properties and arranging coils in a section of close inductance provides protection that effectively reduces the temperature and voltage limits in a multi-coil joint magnetic system.

Key words: MRI, sectioned joint magnetic system, passive protection, simulation of protective current output

Электротехника, 2026, №3, стр. 86-88

Авторы номера