

Содержание

Электротехника, 2021, №12, стр. 2-6

О начальной восстанавливающейся прочности низковольтных коммутационных устройств в диапазоне токов короткого замыкания

ВЕДЕШЕНКОВ Н.А., ДЕРГАЧЕВ П.А., РЫЖОВ В.В.

Показано, что начальная восстанавливающаяся прочность низковольтных коммутационных устройств в диапазоне токов короткого замыкания в значительной степени определяется геометрическими параметрами пластин дугогасительной решётки, расстояниями между ними и конструктивными особенностями контактно-дугогасительных систем. Предложена методика определения начальной восстанавливающейся прочности автоматических выключателей в режиме отключения токов короткого замыкания. В результате анализа начальной восстанавливающейся прочности автоматических выключателей различных производителей получены зависимости этого параметра от конструктивных особенностей и номинальных токов выключателей. В программном пакете COMSOL Multiphysics выполнено моделирование распределения напряжённости электрического поля при входе дуги в решётку и сил взаимодействия дуги отключения с пластинами решётки при различной форме выреза пластин. Показана взаимосвязь между значениями сил взаимодействия и начальной восстанавливающейся прочностью.

Ключевые слова: низковольтные коммутационные устройства, ток короткого замыкания, начальная восстанавливающаяся прочность, дугогасительная решётка, напряжённость электрического поля, электромагнитная сила.

It is shown that the initial recovering strength of low-voltage switching devices in the range of short-circuit currents is largely determined by the geometric parameters of the arc-extinguishing grid plates, the distances between them and the design features of contact-arc-extinguishing systems. A method for determining the initial recovering strength of circuit breakers in the short-circuit current disconnection mode is proposed. As a result of the analysis of the initial recovering strength of circuit breakers of various manufacturers, the dependences of this parameter on the design features and rated currents of the circuit breakers are obtained. The

COMSOL Multiphysics software package simulates the distribution of the electric field strength at the entrance of the arc into the grid and the interaction forces of the trip arc with the grid plates with different plate cutout shapes. The relationship between the values of the interaction forces and the initial recovering strength is shown.

Key words: low-voltage switching devices, short-circuit current, initial restoring strength, arc-extinguishing grid, electric field strength, electromagnetic force.

Электротехника, 2021, №12, стр. 7-12

Каскадная $A-H$ -схема замещения машины постоянного тока на основе анизотропной модели в декартовой системе координат

БЛАНК А.В.

В электромагнитных расчетах хорошо зарекомендовали себя плоские и цилиндрические слоистые модели электрических машин. В таких моделях общие решения дифференциальных уравнений в частных производных преобразуются в систему уравнений четырехполюсника, что позволяет синтезировать каскадные схемы замещения электрических машин. В явнополюсных электрических машинах решения дифференциальных уравнений обычно формируются на базе кусочно-непрерывных собственных функций задачи Штурма-Лиувилля. Однако в этом случае не удается синтезировать каскадную схему замещения, так как для обеспечения единственности решения необходимо иметь много кусочно-непрерывных функций в области полюсов и много гладких функций в области рабочего зазора. Разработанный ранее приближенный расчетный метод с использованием одной кусочно-непрерывной функции в области полюсов и множества гладких функций в области рабочего зазора позволяет синтезировать каскадную схему замещения явнополюсной электрической машины. В развитие этого метода в статье описывается каскадная $A-H$ -схема замещения машины постоянного тока на основе плоской развертки в декартовой системе координат. В этой модели поле возбуждения создается настилами тока, расположенными на ярме статора, а полюса статора заменяются анизотропной полосой (без использования кусочно-непрерывных собственных функций, но и без усреднения свойств).

Ключевые слова: электрические машины, явнополюсные машины, машины постоянного тока, каскадная схема замещения, анизотропная модель.

Flat and cylindrical layered models of electric machines have proven themselves well in electromagnetic calculations. In such models, the general solutions of partial differential equations are transformed into a system of four-pole equations, which makes it possible to synthesize cascade replacement circuits of electric machines. In single-pole electric machines, solutions of differential equations are usually formed on the basis of piecewise continuous eigenfunctions of the Sturm-Liouville problem. However, in this case, it is not possible to synthesize a cascade substitution scheme, since in order to ensure the uniqueness of the solution, it is necessary to have many piecewise continuous functions in the field of poles and many smooth functions in the field of the working gap. The previously developed approximate calculation method using a single piecewise continuous function in the field of poles and a set of smooth functions in the field of the working gap makes it possible to synthesize a cascade substitution scheme of a single-pole electric machine. In the development of this method, the article describes a cascade A-H substitution scheme of a DC machine based on a flat scan in a Cartesian coordinate system. In this model, the excitation field is created by current floorings located on the stator yoke, and the stator poles are replaced by an anisotropic strip (without using piecewise continuous eigenfunctions, but also without averaging properties).

Key words: electric machines, single-pole machines, DC machines, cascade substitution scheme, anisotron model.

Электротехника, 2021, №12, стр. 13-19

Опыт проектирования магнитоэлектрических машин с кольцевой обмоткой якоря СМИРНОВ А.Ю.

Предложена методика проектирования синхронных машин с кольцевой обмоткой якоря и постоянными магнитами на роторе, которые могут иметь преимущество перед обычными машинами с барабанной обмоткой в магнитных системах двухполюсных машин с развитым внешним диаметром. В методике использованы уравнения связи между объёмом расточки статора, моментом и электромагнитными нагрузками через постоянную Арнольда, уравнения для линейной нагрузки, для магнитной проводимости постоянных магнитов в функции паспортных параметров магнитотвёрдого материала, для ЭДС фазы. Численная проверка, выполненная путём расчёта угловых (статических) характеристик методом конечных элементов, показала, что спроектированные двигатели с приемлемой кратностью максимального момента удовлетворяют исходным техническим требованиям, что подтверждает достоверность методики. При проведении численной проверки оценено

влияние зубцовых гармоник, обусловленных зубчатостью статора, и даны рекомендации по снижению этого влияния. Представлены результаты сопоставления по моменту и мощности с традиционной машиной с барабанной обмоткой якоря, которые подтверждают возможность достижения обозначенных преимуществ.

Ключевые слова: синхронная машина, кольцевая обмотка, якорь, электромагнитный момент, метод конечных элементов.

A method of designing synchronous machines with an annular armature winding and permanent magnets on the rotor is proposed, which may have an advantage over conventional machines with a drum winding in magnetic systems of two-pole buses with a developed outer diameter. The method uses the equations of the relationship between the stator bore volume, the moment and the electromagnetic loads through the Arnold constant, the equations for the linear load, for the magnetic conductivity of permanent magnets as a function of the passport parameters of a magnetic hard material, for the EMF of the phase. Numerical verification performed by calculating the angular (static) characteristics by the finite element method showed that the designed engines with an acceptable multiplicity of maximum torque meet the initial technical requirements, which confirms the reliability of the method. During the numerical test, the influence of the tooth harmonics caused by the stator gear is estimated, and recommendations for reducing this influence are given. The results of the comparison of the torque and power with the traditional machine with a drum armature winding are presented, which confirm the possibility of achieving the indicated advantages.

Key words: synchronous machine, ring winding, armature, electromagnetic moment, finite element method.

Электротехника, 2021, №12, стр. 19-23

Магнитоэлектрический вентильный двигатель с несоосным ротором

АФАНАСЬЕВ А.А.

На основе конформного преобразования выполнен расчёт магнитного поля магнитоэлектрического вентильного двигателя с несоосным ротором. Для случая вращения эксцентриситета получены выражения для ЭДС холостого хода обмотки статора и электромагнитного момента. Показано, что этот вид несоосности ротора вызывает несинусоидальность ЭДС и пульсации электромагнитного момента с частотой, в $3p$ раз превышающую механическую частоту вращения ротора. При неподвижном

эксцентриситете наводится переменная ЭДС вдоль вала ротора, вызывающая переменный ток в контуре: вал – подшипники – подшипниковые щиты – корпус статора.

Ключевые слова: магнитоэлектрический вентильный двигатель, несоосный ротор, конформные отображения, магнитная индукция, индуктивности взаимной индукции, ЭДС, электромагнитный момент.

On the basis of conformal mapping, the magnetic field of a magnetoelectric valve motor with a misaligned rotor is calculated. For the case of rotation of the eccentricity, expressions for the EMF of the stator winding idling and the electromagnetic moment are obtained. It is shown that this type of misalignment of the rotor causes non-sinusoidal EMF and pulsation of the electromagnetic moment with a frequency 3 times higher than the mechanical speed of the rotor. At a fixed eccentricity, a variable EMF is induced along the rotor shaft, causing an alternating current in the circuit: shaft – bearings – bearing shields – stator housing.

Key words: magnetoelectric valve motor, misaligned rotor, conformal mappings, magnetic induction, mutual inductance, EMF, electromagnetic moment.

Электротехника, 2021, №12, стр. 23-28

Исследование электропривода с оптимизированными виброшумовыми характеристиками

ГОЛУБЕВ А.Н., БЕЛОНОГОВ В.Г.

На основе полевой модели рассмотрена методика проектирования синхронного двигателя при произвольном числе фаз обмотки. Предложена многоканальная система управления электроприводом, реализующая целенаправленное формирование конфигурации поля в зазоре многофазного двигателя. Разработана имитационная модель электропривода, сочетающая в себе полевую модель двигателя в программном комплексе Elcut и систему управления в пакете MATLAB Simulink.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный двигатель, виброшумовые характеристики.

On the basis of the field model, the method of designing a synchronous motor with an arbitrary number of winding phases is considered. A multichannel electric drive control system is proposed, which implements the purposeful formation of the field configuration in the gap of a

multiphase motor. A simulation model of the electric drive has been developed that combines the field model of the motor in the Elcut software package and the control system in the MATLAB Simulink package.

Key words: synchronous electric drive, multiphase motor, vibration-noise characteristic.

Электротехника, 2021, №12, стр. 29-36

Модельно-ориентированная разработка синхронно-слеящего электропривода ПОЛЮЩЕНКОВ И.С.

Рассмотрена микропроцессорная система синхронно-слеящего двухдвигательного электропривода, предназначенного для согласованного движения механизмов, не имеющих кинематической связи. Решены задачи автоматического регулирования положения при движении по траектории, а также вспомогательные задачи. Приведена функциональная схема, в которой контур регулирования положения одного из механизмов обрабатывает заданную траекторию, а его положение является заданием для контура регулирования положения второго механизма. Оценена точность и динамика при использовании различных конфигураций регуляторов положения при обработке электроприводом траектории. Описана структура программного обеспечения, при которой обеспечивается рациональное использование аппаратных модулей и вычислительных ресурсов микроконтроллера. При разработке программного обеспечения системы управления использованы средства модельно-ориентированного программирования с автоматическим генерированием кода. Стандартные модельные блоки использованы в качестве обработчиков периферии и для разработки структуры программного обеспечения, обеспечивающей диспетчеризацию и тактирование выполнения задач управления; программное обеспечение, специфичное для системы управления, разработано на языке высокого уровня.

Ключевые слова: электропривод, микропроцессорное управление, модельно-ориентированное программирование, регулирование положения, синхронно-слеящая система.

A microprocessor system of a synchronous-tracking two-motor electric drive designed for the coordinated movement of mechanisms that do not have a kinematic connection is considered. The problems of automatic control of the position when moving along the trajectory, as well as auxiliary problems, are solved. The functional diagram is given, in which the contour of the

regulation of the position of one of the mechanisms works out a given trajectory, and its position is the task for the contour of the regulation of the position of the second mechanism. The accuracy and dynamics of the use of various configurations of position controllers when working out the electric trajectory are evaluated. The structure of the software is described, which ensures the rational use of hardware modules and computing resources of the microcontroller. In the development of the control system software, the model-oriented programming tools with automatic code generation are used. Standard model blocks are used as peripheral handlers and for developing a software structure that provides dispatching and clocking the execution of control tasks; software specific to the control system is developed in a high-level language.

Key words: electric drive, microprocessor control, model-oriented programming, position control, synchronous tracking system.

Электротехника, 2021, №12, стр.37-43

Алгоритмы управления многоуровневым инвертором напряжения с каскадным включением Н-мостов в аварийном режиме работы

НОС О.В., ДЫБКО М.А., НОС Н.И.

Выполнен сравнительный анализ различных способов технической реализации пространственного сдвига гальванически развязанной от нагрузки средней точки инвертора, позволяющего при наличии внутренней неисправности в АИН обеспечить качественное регулирование скорости исполнительного двигателя переменного тока без автоматического отключения электропривода и таким образом повысить его надежность. В зависимости от конкретного метода синтеза нулевой составляющей, осуществляющей заданное предсказание модулирующих функций, все рассмотренные законы управления преобразователем частоты на базе Н-мостов обеспечивают симметричное питание электрической машины в ограниченном диапазоне мощностей, однако практическое использование последнего подхода, основанного на принудительном сдвиге фазных напряжений, не требует модификации стандартного алгоритма ШИМ и заключается в непосредственном преобразовании выходов регуляторов тока в координатных осях α, β или d, q .

Ключевые слова: многоуровневый инвертор напряжения, каскадное включение Н-мостов, алгоритмы управления, аварийный режим.

A comparative analysis of various methods of technical implementation of the spatial shift of the midpoint of the inverter, which is galvanically isolated from the load, is performed, which allows, in the presence of an internal fault in the AI, to provide high-quality speed control of the AC executive motor without automatically disconnecting the electric drive and thus increase its reliability. Depending on the specific method of synthesis of the zero component, which performs a given pre-distortion of the modulating functions, all the considered control laws of the frequency converter based on H-bridges provide symmetrical power supply to the electric machine in a limited power range, but the practical use of the latter approach, based on forced phase shift, does not require modification of the standard PWM algorithm and consists in direct conversion of the outputs of the current regulators in the coordinate axes α, β or d, q .

Key words: multi-level voltage inverter, cascade switching of H-bridges, control algorithms, emergency mode.

Электротехника, 2021, №12, стр. 43-48

Повышение мощностных характеристик усилителей класса E на основе анализа осциллограммы тока стока транзистора

ГУРОВ К.О., МИНДУБАЕВ Э.А., ДАНИЛОВ А.А.

Предложен новый подход к проблеме повышения мощностных характеристик усилителей мощности класса E на основе определения номиналов шунтирующего и последовательного конденсаторов при проектировании усилителя. В основу метода положен анализ осциллограммы тока стока ключевого транзистора, полученной на основе численного моделирования. Показано, что спроектированные с помощью предложенного метода схемы обеспечивают выходную мощность в 1,1–1,6 раза большую по сравнению со схемами, спроектированными на основе традиционного метода, основанного на анализе формы кривой напряжения сток–исток. Более высокая выходная мощность обеспечивается при том же напряжении питания, при этом общая эффективность схемы и уровень потерь на ключевом транзисторе практически не меняются.

Ключевые слова: усилитель мощности класса E, проектирование усилителя мощности, рабочий режим, выходная мощность усилителя.

A new approach is proposed to the problem of enhancement of class E power amplifier performance by means of new method for determination of the shunt and series capacitances.

The method is based on the analysis of the modelled oscillogram of the drain current of the key transistor. It is shown that the circuits designed using the proposed method provide an output power 1,1–1,6 times higher than the circuits designed by means of the traditional method, based on the analysis of the drain-source voltage waveform. Higher output power is provided at the same supply voltage, while the overall efficiency of the circuit and the level of losses on the switch transistor practically do not change.

Key words: class E power amplifier; power amplifier design; operating mode; output power performance of amplifier.

Электротехника, 2021, №12, стр. 49-53

Особенности работы катода из LaB₆ в технологической электронно-лучевой пушке
ЧУЛКОВ И.С., ГОНЧАРОВ А.Л., ДРАГУНОВ В.К., ХАРИТОНОВ И.А.

Рассмотрена проблема непостоянства параметров нагрева дисковых катодов из LaB₆ в сварочных электронно-лучевых пушках, связанная с разными эмиссионными характеристиками катодов и особенностями установки основного катода. Предложен метод предварительной оценки качества катодов путем построения зависимости тока эмиссии от мощности нагрева. Рассмотрена методика определения работы выхода электронов методом полного тока для оценки эмиссионных характеристик катодов. Установлено, что режимы нагрева и установки основного катода из LaB₆ могут оказывать значительное влияние на эмиссионные характеристики основного катода.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, электронно-лучевая пушка, электронный пучок, работа выхода электронов, LaB₆.

The problem of the variability of the heating parameters of LaB₆ disk cathodes in welding electron beam guns is considered, which is associated with different emission characteristics of the cathodes and the features of the installation of the main cathode. A method of preliminary assessment of the cathode quality by constructing the dependence of the emission current on the heating power is proposed. The method of determining the work of the electron output by the full current method for evaluating the emission characteristics of cathodes is considered. It is established that the heating and installation modes of the main cathode from LaB₆ can have a significant impact on the emission characteristics of the main cathode.

Key words: electron beam welding, electron beam gun, electron beam, electron output operation, LaB₆.

Электротехника, 2021, №12, стр. 54-59

Показатели качества электроэнергии электродуговых промышленных установок постоянного тока

ЕВСЕЕВ А.М., МЕЩЕРЯКОВ В.Н., БОЙКОВ А.И.

Рассмотрены способы повышения энергоэффективности электротехнических комплексов установок дуговой плазменной обработки, и общая характеристика влияния дугового процесса на показатели качества электроэнергии. Рассмотрена структура и общий принцип работы экспериментальной электродуговой установки. Систематизированы и проанализированы данные об изменении таких показателей, как активная, реактивная и полная мощность, суммарные гармонические искажения напряжения и тока, отклонение напряжения, а также уровень искажений тока высших гармоник значимых порядков. Установлены эмпирические зависимости каждого из показателей экспериментальной установки от рабочего тока дуги. Приведены основные соотношения, посредством которых из эмпирических зависимостей энергоэффективная система управления установкой сможет определить активные потери энергии в линиях питания агрегата, образующиеся вследствие снижения показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, плазмотрон, показатели качества электроэнергии, регулируемый выпрямитель, реактивная мощность, потери активной мощности, отклонение напряжения, гармонические искажения.

The ways of increasing the energy efficiency of electrical complexes of arc plasma treatment plants and the general characteristics of the influence of the arc process on the quality of electricity are considered. The structure and general principle of operation of an experimental electric arc installation are considered. Data on changes in such indicators as active, reactive and full power, total harmonic distortions of voltage and current, voltage deviation, as well as the level of current distortions of higher harmonics of significant orders are systematized and analyzed. Empirical dependences of each of the experimental setup indicators on the arc operating current are established. The main relations are given by means of which, from empirical dependencies, an energy-efficient plant control system will be able to determine the active energy losses in the power supply lines of the unit resulting from a decrease in the quality of electricity.

Key words: arc steelmaking furnace, electric arc, plasmatron, power quality indicators, adjustable rectifier, reactive power, harmonic distortion, voltage deviation, active power loss.

Электротехника, 2021, №12, стр. 60-67

О выборе параметров кабельных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при однофазных замыканиях на землю

ШУИН В.А., ШАДРИКОВА Т.Ю., КУТУМОВ Ю.Д.

Показано, что применение моделей кабельных линий в расчетах переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, параметры которых определены на основе справочных данных при частоте 50 Гц, может приводить к грубым ошибкам в оценке параметров разрядных составляющих токов и напряжений. Применение таких моделей допустимо только в расчетах зарядной стадии переходного процесса при небольших удаленностях места замыкания от шин центра питания, когда индуктивность источника питания значительно больше индуктивности поврежденной линии.

Применение в расчетах моделей кабельных линий, параметры которых определены по скорости распространения электромагнитных волн в кабеле, приемлемо при решении задач, связанных с расчетами перенапряжений или действующего значения тока в месте повреждения при дуговых перемежающихся замыканиях, при разработке защит от данного вида повреждений и исследованиях влияния на устойчивость их функционирования переходных процессов. Показано, что при разработке способов дистанционного определения места повреждения требуемую точность расчетов параметров переходных токов и напряжений в диапазоне частот от нескольких килогерц до 20 кГц позволяет обеспечить только применение частотно-зависимых моделей кабельных линий.

Ключевые слова: кабельные линии 6–10 кВ, однофазные замыкания на землю, переходные процессы, параметры кабельной линий.

It is shown that the use of models of cable lines in the calculations of transient processes during earth faults in 6–10 kV cable networks, the parameters of which are determined on the basis of reference data at the fundamental frequency of 50 Hz, can lead to gross errors in the estimation of the parameters of the discharge components of currents and voltages. The use of such models is permissible only in the calculations of the charging stage of the transient process at small distances from the fault point from the buses of the power center, when the inductance of the

power supply is much higher than the inductance of the damaged line. The use of models of cable lines in the calculations, the parameters of which are determined by the speed of propagation of electromagnetic waves in the cable, is acceptable when solving problems related to the calculation of overvoltages or the effective value of the current in the place of damage during alternating arc faults, when developing protection against this type of damage and studies of the effect of transient processes on the stability of their functioning. It is shown that when developing methods for remote determination of the damage location, the required accuracy of calculating the parameters of transient currents and voltages in the frequency range from several kilohertz to 20 kHz can only be provided by the use of frequency-dependent models of cable lines.

Key words: 6–10 kV cable networks, single phase earth faults, transients, cable line parameters

Электротехника, 2021, №12, стр. 67-73

Нестационарные режимы работы переключаемой фильтрокомпенсирующей установки в тяговой сети переменного тока

СЕРЕБРЯКОВ А.С., GERMAN Л.А., ОСОКИН В.Л., ДУЛЕПОВ Д.Е.

Показано, что фильтрокомпенсирующие установки (ФКУ) в тяговых сетях переменного тока должны быть регулируемы или иметь хотя бы две ступени мощности для того, чтобы обеспечить снижение потерь электроэнергии при средних нагрузках и максимально возможное повышение напряжения в тяговой сети при пропуске тяжеловесных составов. Рассмотрена переключаемая двухступенчатая ФКУ, первая ступень которой мощностью 3 Мвар (последовательное включение двух LC секций) включается при средних тяговых нагрузках, вторая ступень мощностью 6 Мвар (одна LC секция) – при движении тяжеловесных поездов. Выполнен анализ переходных процессов в двухступенчатой ФКУ в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Анализ динамических процессов проведен в пакете MATCAD путем решения нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Определены броски тока и напряжения на конденсаторах при шунтировании дополнительной секции и демпфирующего резистора в максимум и ноль тока. Приведены экспериментальные осциллограммы процесса расшунтирования дополнительной секции при переходе от наибольшей мощности к наименьшей. Даны рекомендации по определению оптимальных моментов времени для коммутации элементов схемы.

Ключевые слова: тяговая сеть переменного тока, фильтрокомпенсирующая установка,

компенсация реактивной мощности, потери электроэнергии, компьютерное моделирование, переходный процесс.

It is shown that filter-compensating installations (PKU) in alternating current traction networks must be adjustable or have at least two power values in order to ensure a reduction in power losses at medium loads and the maximum possible increase in voltage in the traction network when passing heavy-weight trains. A switchable two-stage PKU is considered, the first stage of which has a capacity of 3 Mvar (sequential inclusion of two LC sections), turns on at medium traction loads, the second stage with a capacity of 6 Mvar (one LC section) - when moving heavy trains. The results of the analysis of transients in a two-stage PKU in an AC traction network with a voltage of 25 kV are presented. The analysis of dynamic processes was carried out in the MATHCAD package by solving nonlinear differential equations in the Cauchy form by the fourth-order Runge-Kutta method. The current and voltage surges on the capacitors during shunting of the additional section and the damping resistor to the maximum and to the zero of the current are determined. Experimental waveforms of the process of shunting an additional section during the transition from the highest power to the lowest are given. Recommendations are given for determining the optimal moments of time for switching circuit elements.

Key words: AC traction network, filter-compensating installation, reactive power compensation, power losses, computer modeling, transient process.

Электротехника, 2021, №12, стр. 74-82

Тепловые характеристики основных конструктивных схем силовых кабелей переменного тока на основе высокотемпературных сверхпроводников

БУЯНОВ Ю.Л., ЖЕЛТОВ В.В., АРХАНГЕЛЬСКИЙ А.Ю.

Высокотемпературные сверхпроводящие кабели (ВТСП кабели), охлаждаемые жидким азотом, представляют собой альтернативу традиционным кабелям. Количество теплоты, поступающей от ВТСП кабеля к охлаждающему его криоагенту, а также выбор оптимальной схемы циркуляции криоагента и варианта криостатирования сверхпроводящей линии в целом, зависят от внутренней структуры кабеля. В статье представлена теоретическая модель, описывающая распространение теплового потока в цилиндрических слоях кабеля. Получены аналитические уравнения, определяющие удельные линейные тепловые потоки к кабелям различных типов: с тремя отдельными экранированными фазами, содержащимися в обособленных криостатах с общим

возвратным криогенным трубопроводом; с тремя экранированными фазами в обособленных криостатах с организацией обратного потока криоагента внутри криостатов; с тремя экранированными фазами, расположенными в одном криостате, а также в триаксиальном кабеле при различных схемах циркуляции криоагента. Для всех типов кабелей определены соотношения между суммарными линейными теплопритоками через теплоизоляцию криостата и теплопритоками от кабеля в зависимости от массового расхода жидкого азота. Также проведён сравнительный анализ соотношений между удельными теплопритоками, температурами криоагента после охлаждения и гидравлическими сопротивлениями на единице длины кабелей. Предложенная методика позволяет оценить теплогидравлические параметры рассматриваемых конструкций кабелей и выбрать наиболее целесообразное техническое решение.

Ключевые слова: ВТСП кабель, охлаждение ВТСП кабеля, конструкция ВТСП кабеля, теплоприток.

High temperature superconducting cables (HTS cables) cooled with liquid nitrogen are an alternative to traditional cables. The amount of heat supplied from the HTS cable to the cryo-agent as well as the choice of the optimal cryoagent circulation scheme and the option of cooling the superconducting line as a whole, depends on the internal structure of the cable. The article presents a theoretical model describing the transfer of heat flow through the cylindrical layers of the cable. Analytical equations are obtained that determine the specific linear heat flow to cables of various types: with three separate shielded phases contained in separate cryostats with a common return cryogenic pipeline; with three shielded phases in separate cryostats with the organization of a reverse flow of the cryoagent inside the cryostats; with three shielded phases located in one cryostat, as well as in a triaxial cable with different cryoagent circulation schemes. For all types of cables, the ratios between the total linear heat fluxes through the thermal insulation of the cryostat and the heat fluxes from the cable have been determined, depending on the mass flow rate of liquid nitrogen. Also, a comparative analysis of the relationship between specific heat fluxes, temperatures of the cryoagent after cooling and hydraulic resistances per unit length of cables has been carried out. The proposed technique makes it possible to evaluate the thermal-hydraulic parameters of the considered cable structures and to choose the most appropriate technical solution.

Key words: HTS cable, cooling of HTS cable, construction of HTS cable, heat input.

Электротехника, 2021, №12, стр. 83-84

Авторы номера

Электротехника, 2021, №12, стр. 85-90

Содержание журнала за 2021 год