

## **Методика выбора параметров сигналов автоматической локомотивной сигнализации в системе интервального регулирования движения поездов с временным разделением каналов**

БЕСТЕМЬЯНОВ П.Ф., ЗАХАРОВ Д.П.

Приведены требования к параметрам сигнала автоматической локомотивной сигнализации при временном разделении каналов. Произведен выбор значения минимального тока в шунте для рельсовых цепей системы автоматической локомотивной сигнализации при временном разделении канала опроса рельсовых цепей и канала передачи информации с пути на локомотив. Выполнен расчет, который показывает возможность обеспечения режима локомотивной сигнализации при различных вариантах схем замещения рельсовых цепей для выбранного значения тока при выполнении нормального и шунтового режима работы рельсовой цепи. При этом нет необходимости повышения мощности передающей аппаратуры для обеспечения режима локомотивной сигнализации. Показано, что передача информации на локомотив возможна при нахождении головы поезда на опрашиваемой рельсовой цепи или на смежной от питающего конца опрашиваемой рельсовой цепи, причем при нахождении головы поезда на смежной от релейного конца опрашиваемой рельсовой цепи, возможность приема сигнала локомотивной сигнализации имеет значительные ограничения. Предложенная методика позволяет выбирать значения тока локомотивной сигнализации для различных частот несущего сигнала.

*Ключевые слова:* рельсовая цепь, временное разделение каналов, автоматическая локомотивная сигнализация, автоматическая блокировка.

The requirements on signal parameters of system automatic cab signaling for time-division of channels. Selection is made for the value of the minimum current track circuit of system automatic cab signaling for time-division of channels track circuits control and information channel from the rail on the locomotive. The calculation, which shows the possibility of providing mode locomotive cab signaling in different variants of the equivalent circuits of rack circuit for the selected current when the normal operating mode and shunt the track circuit. There is no need to increase the transmit power to provide locomotive signaling mode. It is shown that the transmission of information to the locomotive be available when the head train on the polling track circuit or on the adjacent transmitting end of the polling track circuit. It is shown that when the head train on the adjacent end of the relay interrogated track circuit, the possibility of receiving a signal locomotive signaling has significant limitations. This technique allows the selection of the values of the current locomotive signal for different frequencies of the carrier signal.

*Key words:* track circuit, time division of channels, automatic cab signaling, automatic block system.

## **Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением**

БАДЁР М.П., ИНЬКОВ Ю.М.

Совершенствование системы электрической тяги и перспективы её развития predetermined необратимым процессом обновления всей системы преобразования энергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Применение преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток, тиристорных преобразователей уровня напряжения постоянного тока, создание высокоэкономичных алгоритмов компьютерного управления преобразованием электроэнергии, замена коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные трехфазного тока составляют основное направление технического перевооружения систем электрической тяги и в настоящее время широко используются в ряде промышленно развитых стран. Предложены новые системы тягового

электроснабжения для участков с высокоскоростным движением, которые требуют прокладки дополнительных проводов и использования многопроводных линий. Сформулированы требования и рассмотрена методика обоснования электромагнитной совместимости многопроводных линий тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры. Показано, что электромагнитная связь линий имеет место при наличии одновременного электрического и магнитного влияний между двумя или несколькими электрически длинными линиями. В электрически длинных линиях напряжения и токи не могут рассматриваться независимыми друг от друга. Они связаны друг с другом через волновое сопротивление соответствующей линии (подобно тому, как электрические и магнитные поля электромагнитных волн связаны друг с другом через волновое сопротивление пространства). Выполненные исследования и проведенный анализ показали возможность моделирования распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, которые позволяют определять не только токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии, но и одновременно наведенные напряжения в смежной линии. Всё это позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникации связи и рельсовыми цепями на участках с высокоскоростным движением.

*Ключевые слова:* система тягового электроснабжения, высокоскоростное движение, энергоэффективность, электромагнитная совместимость, потери электроэнергии, элементы инфраструктуры, линии продольного электроснабжения, наведенные напряжения, коммуникации связи, цепи железнодорожной автоматики

Improving the electric traction system and its development prospects predetermined irreversible process of updating the whole conversion system power consumption by the transportation process. Application of DC converters in the three-phase alternating current, thyristor converters DC voltage level, the creation of highly efficient algorithms for computer control of electric power conversion, exchange commutator motor DC brushless three-phase AC current is the core technical upgrading of electric traction systems and are now widely used in a number industrialized countries. Proposed new traction power supply system for areas with high traffic, which require running additional wires and use multiconductor lines. The requirements and discusses the methodology justification EMC multiconductor lines traction power supply and infrastructure. It is shown that electromagnetic coupling lines takes place in the presence of one simultaneously electric and magnetic effects between two or more on electrically long lines. In electrometrically long line voltages and currents can not be considered independent of each other. They are connected with each other via impedance the corresponding line (similar to the electrical and magnetic field of electromagnetic waves associated with each other via impedance space). The studies and the analysis showed the possibility of simulating the propagation of electromagnetic waves along the multi-line traction power lines, which allow to determine not only the currents and voltages at any given point of a multi-line, but also simultaneously induced voltages at the adjacent lines. All this allows a high degree of accuracy to conduct justification EMC Traction Network and longitudinal lines of communication with the power supply connection and track circuits in areas with high traffic.

*Key words:* traction power supply system, high-speed, electromagnetic compatibility, loss of electricity, elements of infrastructure, lines of longitudinal power supply, induced voltage, communication of connection, chain of railway automatics.

**Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена**

БАРАНОВ Л.А., ГРЕЧИШНИКОВ В.А., ЕРШОВ А.В., РОДИОНОВ М.Д., ШЕВЛЮГИН М.В.

Показано, что в решении задачи экономии электрической энергии в системе тягового электроснабжения Московского метрополитена, наибольший эффект дает повышение эффективности использования полномасштабного рекуперативного торможения электроподвижного состава с асинхронными двигателями. Рассматривались конкретные линии Московского метрополитена (Филевская, Арбатско-Покровская, Бутовская, Кольцевая), на которых используются поезда с асинхронными двигателями типа 81-740/741 «Русич» с возможной экономией энергии рекуперации до 10–12% от энергии тяги. Для повышения эффективности рекуперативного торможения предложено использовать стационарные накопители энергии. Из множества существующих типов накопительных систем был выбран стационарный накопитель энергии неуправляемого типа на базе накопительных модулей Российской фирмы «Элтон». Описана схема стационарного накопителя энергии для использования в условиях системы тягового электроснабжения Московского метрополитена. Представлены электротехнические характеристики накопителя, эксплуатационные особенности и функциональные возможности системы. На основе экспериментальных замеров рассмотрены электроэнергетические показатели работы стационарного накопителя энергии при штатной эксплуатации на тяговой подстанции Филевской линии Московского метрополитена в течение нескольких месяцев. Определены максимальные уровни обрабатываемых энергий, цикличность и КПД работы установки. Длительный мониторинг штатной эксплуатации показал высокую надежность стационарного накопителя энергии. Все системы, включая коммутационные органы, системы контроля и диагностики накопительных модулей, системы управления и сигнализации, в том числе и на диспетчерском пункте, работали безотказно. Получены дополнительные положительные эффекты от включения стационарного накопителя энергии, в числе которых стабилизация напряжения на шинах тяговой подстанции, возможность снижения установленной мощности тяговой подстанции за счет сглаживания графика энергопотребления, возможность при аварийном отключении внешнего электроснабжения вывода поезда с пассажирами из тоннеля до ближайшей станции. Показана сходимость данных теоретических расчетов и данных экспериментальных замеров.

*Ключевые слова:* рекуперация энергии торможения, емкостной накопитель энергии.

For saving of electric energy in the traction power supply system of the Moscow Metro the greatest effect is more efficient use of the full regenerative braking of electric rolling stock with asynchronous motors. Addressed specific line of Moscow Metro (Filevskaya, Arbatsko-Pokrovskaya, Butovskaya, Koltsevaya), which trains the type of 81-740/741 «Rusich» used with asynchronous motors with the possible energy savings of 10–12% recovery of traction energy. To improve the efficiency of regenerative braking is proposed to use the stationary energy storage. Of a variety of types of storage systems has been selected stationary energy storage unmanaged type based on cumulative units of the Russian company «Elton.» Describe the circuit of stationary energy storage for use in traction power supply system of the Moscow Metro. Electrical data of the energy storage, operational features and functionality of the system presented. Based on experimental measurements considered electricity performance stationary energy storage during normal operation on traction substation Fili Moscow Metro for several months. Defined maximum levels of circulated energy, efficiency and cyclicity of the system. Long-term monitoring of regular operation showed high reliability of the stationary energy storage. All systems, including switching bodies, monitoring and diagnostics system storage module, control systems and alarms, including the control office, worked smoothly. Received additional positive effects from the inclusion of of the stationary energy storage, including voltage regulation on tire traction substation, the possibility of reducing the installed capacity of traction substation by smoothing the graphics power, the possibility of failure occurs when the external power supply output trains with passengers from the

tunnel to the nearest station. The convergence of these theoretical calculations and experimental data measurements.

*Key words:* traction power supply system of underground, capacitive energy storage, energy recuperation braking.

### **Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя**

ЛИТОВЧЕНКО В.В., КОКОРИН Д.В., НАЗАРОВ Д.В.

Рассмотрена математическая модель коллекторного тягового двигателя, позволяющая исследовать переходные и установившиеся процессы. В модели электрической части двигателя выделены четыре компонента: цепи якоря, компенсационной обмотки, дополнительных полюсов и обмотки главных полюсов с шунтирующими резисторами ослабления возбуждения. В модели магнитной части учтены нелинейность магнитной характеристики главных и дополнительных полюсов, а также влияние вихревых токов в массивных участках магнитной цепи на изменение магнитного потока. При описании процессов в цепи главных полюсов учтены магнитодвижущие силы обмоток возбуждения, компенсационной обмотки, дополнительных полюсов, реакции якоря и вихревых токов в массивных частях магнитной системы. При этом реакция якоря рассматривается в виде трех составляющих: поперечной и продольной реакции якоря и составляющих добавочных коммутационных токов в связи с изменением характера коммутации (ускоренной или замедленной). Показано, что при исследовании аварийных режимов, связанных с образованием «кругового огня», необходимо использовать полную модель. В случае переходных режимов отличных от «кругового огня» возможно упрощение математической модели, что позволяет существенно сократить время расчета электромагнитных процессов. *Ключевые слова:* тяговый электродвигатель, математическая модель, аварийные режимы, переходные процессы.

The mathematical model of the engine used for traction purposes was examined. This model allows investigating transient and steady-state processes in the described area. Four components have been outlined in the electrical part of motor model: rotor circuit, compensating field winding circuit, additional magnetic poles circuit and main poles circuit incl. shunting resistors for the poles field regulation. Magnetic model is stood out by considering of the main and additional poles magnetic characteristics nonlinearity and the influence of eddy currents in the massive sections of the magnetic circuit at the changing of the magnetic flux. The description of the processes in main poles circuit took into account magneto-motive forces of excitation windings, compensating field winding, additional magnetic poles winding, armature interference and eddy currents in the massive sections of the magnetic circuit. Here with armature interference is researched as three partials: cross-section, axial and the sum of the additional commutative currents caused by the speeded up or down type of commutation. It was shown that full model has to be used to analyze the emergency processes, caused by flashover. For the investigation of the transient process which do not include flashover it is better to use some simplified mathematical model. This can significantly reduce the calculation time.

*Key words:* tractive motor, mathematical model, emergency modes, transient processes

### **Микропроцессорная система автоматического управления пневматическим торможением грузовых длинносоставных поездов**

ПУДОВИКОВ О. Е., МУРОВ С.А.

Предложен алгоритм для микропроцессорной системы автоматического управления пневматическим торможением грузовых поездов. Предусмотрена работа в режиме стабилизации скорости поезда при его движении по спуску, а также реализация прицельного торможения. В системе реализован пропорционально-дифференцирующий закон управления. Для повышения качества управления целесообразно выполнять процедуру идентификации параметров тормозной системы поезда. Показано, что предлагаемый алгоритм обеспечивает необходимое качество управления, позволяя предотвратить глубокие снижения скорости и исключая превышения допустимого значения скорости движения при её стабилизации, а также осуществлять прицельное служебное торможение с приемлемой для этого точностью.

*Ключевые слова:* система автоматического управления, пневматический тормоз, грузовой поезд, стабилизация скорости движения, функциональная схема, тяговый расчёт, прицельное торможение.

An algorithm for the microprocessor automatic control system of pneumatic braking freight trains. Considered the work in the mode of train speed regulation as it moves down the slope, as well as implementation of the target braking. In system is implemented proportional plus derivative control. To improve the quality control procedure is advisable to carry out parameter identification of the brake system of the train. It is shown that the proposed algorithm provides the necessary quality control by preventing deep speed reduction and except in the case of exceeding the value of the actual speed of their allowable values in the mode of train speed regulation, and - implement target braking with acceptable accuracy for this.

*Key words:* automatic control system, pneumatic brake, freight train, speed regulation, functional diagram, predictive tractive calculation, target braking.

### **Процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовых линиях**

ШАМАНОВ В.И.

Главным источником помех в устройствах автоматики и телемеханики на электрифицированных железных дорогах являются тяговые токи и их гармоники. От действия этих помех на железных дорогах России каждый час происходит в среднем до трех десятков сбоев автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН). Электрические и электромагнитные процессы, в результате действия которых появляются эти помехи, оставались до конца не ясны. Оставалось непонятным, почему асимметрия тягового тока в рельсовой линии является функцией этого тока и всегда больше асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. В статье приведены некоторые результаты выяснения этих причин. Установлено, что первопричиной возникновения асимметрии тягового тока в рельсовых линиях является появление асимметрии сопротивлений рельсов в рельсовых нитях. Однако асимметрии тягового тока в большей степени определяется создаваемой при этом асимметрией действующих удельных сопротивлений взаимной индуктивности рельсовых нитей. Выяснено также, почему рост тягового тока в рельсах при движении тяжеловесных поездов и в районах тяговых подстанций не приводит к пропорциональному росту количества сбоев в работе рельсовых цепей и АЛСН.

*Ключевые слова:* рельсовые линии, тяговые токи, устройства автоматики и телемеханики, источники помех.

The main source of interferences in devices of automatics and telemechanics on electrified railways are electric traction currents and their harmonics. From the action of these interferences on the railways of Russia, for example, every hour comes to an average of thirty failures automatic

locomotive signaling. Electric and electromagnetic processes, as a result of which there are these interferences are not clear. It remained unclear why the asymmetry in rail electric traction current is a function of the magnitude of this current and is always greater than the asymmetry resistances of these threads. The article presents some results elucidate these reasons. Found that the primary cause of asymmetry in traction current rail lines is the emergence of resistance asymmetry rails rail threads. However, the asymmetry of the traction current in the largely determined by the asymmetry of the generated while operating resistivity's rail mutual inductance threads. Also explained why the increase of traction current in the rails when driving heavy trains and traction substations in areas does not lead to a proportional increase in the number of failures in the rail electric circuits and automatic locomotive signaling.

*Key word:* rail traction lines, electric traction currents, devices of automatics and telemechanics, source of interferences.

### **Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных элементов**

КОСМОДАМИАНСКИЙ А.С., КЛЯЧКО Л.М., ВОРОБЬЕВ В.И., ПУГАЧЕВ А.А.

Разработана система управления, осуществляющая минимизацию потерь и контроль температуры тягового электропривода. В качестве греющих потерь приняты статические и динамические потери силовых ключей, а также потери в меди обмоток и стали статора асинхронного двигателя. В качестве показателей потерь, лимитирующих по нагреву и мощности, рассмотрены частота коммутации силовых ключей и ток обмотки статора. Представлены структуры и математическое описание ключевых функциональных блоков системы управления. Предложены численные методы для определения точки минимума мощности потерь. Показано, что в результате применения предлагаемой системы управления уменьшение потерь может составить до 15% по сравнению с классическим вариантом системы векторного управления.

*Ключевые слова:* тяговый электропривод, асинхронный двигатель, система управления, минимизация потерь, температура обмоток и транзисторов.

The design of control system performing the power losses minimization and temperature check of traction electric drive is considered. The transistors and diodes conduction and switching losses and induction motor copper and iron losses are used as a losses leading to overheating. The transistors switching frequency and stator winding current are suggested to use as a variables limited from thermal condition and power losses. The structures and mathematical description of control system main units are presented. The application of numeric methods for definition of optimal operating mode is proposed. It is shown that as a result of the suggested system application the power losses reduction may be led up to 15% relatively to classical vector control system.

*Key words:* tractive drive, induction motor, control system, power losses minimization, winding and transistor temperature

### **Потери мощности в асинхронных тяговых двигателях перспективного электроподвижного состава**

ИНЬКОВ Ю.М., ФАДЕЙКИН Т.Н, БРЕДИХИНА Я.А.

При питании от автономных инверторов напряжения в асинхронных тяговых двигателях перспективного электроподвижного состава ухудшается качество напряжения и тока, что приводит к снижению коэффициента полезного действия и коэффициента мощности таких двигателей по сравнению с аналогичными показателями при питании двигателей от источника энергии синусоидального напряжения. В результате гармонического анализа кривых выходного напряжения и тока двухуровневых автономных инверторов напряжения с амплитудной широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения, выполненного с

использованием программного пакета MatLab/Simulink и Mathcad установлено, что для перспективного асинхронного тягового двигателя типа ДТА-1200А применение широтно-импульсной модуляции выходного напряжения автономного инвертора напряжения лишь незначительно ухудшает его энергетические показатели. В то же время применение многоуровневых автономных инверторов напряжения, вызывающих усложнение и увеличение стоимости преобразовательного электрооборудования, в настоящее время вряд ли оправдано.

*Ключевые слова:* перспективный электроподвижной состав, асинхронные тяговые двигатели, потери мощности, коэффициент мощности, КПД, автономный инвертор напряжения.

When powered autonomous inverter voltage of asynchronous traction engines of promising electric rolling stock is deteriorating quality of curves voltage and current, which reduces efficiency and power factor such engines in comparison with the similar indicators in the power of the engines from the energy source of the sine wave. In the harmonic analysis of output voltage and current two-level autonomous inverter voltage amplitude and pulse-width modulation of output voltage, made with the use of software package MatLab/Simulink and Mathcad, it was found that for perspective asynchronous traction motor type DTA-A use pulse width modulation of output voltage of autonomous inverter voltage only slightly impairs its energy indicators. At the same time, the use of multi-level autonomous inverter voltage, causing complicate and increase the cost of converter of electrical equipment currently hardly justified.

*Key words:* promising electrorolling stock, asynchronous traction engines, power dissipation, power factor, efficiency, autonomous inverter voltage.

## **Показатели эффективности конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена**

РЯБЦЕВ Г.Г., ЖЕЛТОВ К.С.

Предложена методика оценки показателей эффективности конденсаторных накопителей энергии, размещаемых непосредственно на вагонах метрополитена для приёма электрической энергии тяговых электрических машин, работающих в режиме рекуперативного торможения. Сравнительный анализ эффективности накопителей предложено выполнять по следующим показателям: коэффициенту возврата электроэнергии в полном пускотормозном цикле работы вагона; относительной оценке возврата электроэнергии в тормозном режиме и перерасхода электроэнергии в ходовом режиме работы вагона; коэффициенту возврата энергии электродинамического торможения тяговых электрических машин; относительной оценке массы накопителя энергии. Анализ эффективности накопителей энергии предложено выполнять с учётом особенностей их конструктивного исполнения. Накопители энергии могут быть изготовлены в моноблочном или ступенчатом исполнении. Предлагаемая методика сравнительного анализа энергетических и массогабаритных показателей вагонов метрополитена с накопителями энергии позволяет при минимальном количестве исходных данных проводить оценку эффективности их работы. Установка накопителей энергии увеличивает массу и расход электроэнергии на тягу вагона, но этот перерасход существенно ниже объема энергии, возвращаемого с помощью накопителя в режиме рекуперативного торможения тяговых электрических машин. Накопители энергии дают возможность создания эффективных систем автономного рекуперативного торможения на вагонах метрополитена. Ступенчатое исполнение накопителей энергии обеспечивает снижение их массогабаритных показателей и повышение энергетической эффективности. Основным недостатком накопителей энергии, препятствующим их внедрению на вагонах метрополитена, можно считать только значительные их габариты.

*Ключевые слова:* вагон метрополитена, конденсаторный накопитель энергии, экономия электроэнергии, масса, габариты.

The procedure of estimation of efficiency of condenser energy storages, which are placed directly on underground cars for reception of electric power of traction electric cars, working in a mode of recuperative braking, was offered. Comparative analysis of efficiency of energy storages was offered to perform on the basis of following parameters: index of electric power recovery in a full start-brake cycle of the car operation; relative estimation of electric power recovery in a braking mode and electric power waste in a active mode of the car operation; index of electric power recovery in electrodynamic braking of traction electric cars; relative evaluation of mass of energy storages. Analysis of efficiency of energy storages was offered to perform with consideration of features of their design. Energy storages can be manufactured in monoblock or stepped design. The offered procedure of comparative analysis of energy and mass-dimensional characteristics of underground cars with energy storages allow to perform estimation of their operation with a minimum number of source data. Placing of energy storages increases the mass and energy expenditure on car operation, but this waste is essentially less than the energy volume, recovered with energy storage in a mode of recuperative braking of traction electric cars. Energy storages allow to create effective systems of autonomic recuperative braking on underground cars. Stepped design of energy storages decreases their mass-dimensional characteristics and increases energy efficiency. The principal disadvantage of energy storages, which prevents their implementation, is only considerable dimensions.

*Key words:* an underground car, a condenser energy storage, energy saving, storage, mass, dimensions.

### **Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя**

РОЗАНОВ Ю.К., ЛЕПАНОВ М.Г., КИСЕЛЕВ М.Г.

Рассмотрен многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе полупроводникового преобразователя постоянного/переменного тока. Регулятор предназначен для компенсации неактивной мощности в трехфазных системах электроснабжения и выполняет такие функции, как регулирование реактивной мощности, активная фильтрация и симметрирование токов нагрузки. Это позволяет улучшить качество электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения. Рассматриваются алгоритмы управления устройством, реализующие функции компенсации неактивной мощности. Алгоритмы системы управления основаны на использовании преобразования сигналов из трехфазных стационарных координат в двухфазную вращающуюся (синхронную) систему координат (abc/dq-преобразование), а управление преобразователем осуществляется методом синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Для исследования работы регулятора качества электроэнергии и алгоритмов управления разработана компьютерная модель в программе MatLab/Simulink. Представлены результаты моделирования регулятора в различных режимах работы: компенсация реактивной мощности, устранение высших гармоник тока сети, компенсация токов при несбалансированной нагрузке, а также полная компенсация неактивной мощности в случае нелинейной несимметричной нагрузки.



*Ключевые слова:* качество электроэнергии, силовой электронный преобразователь, реактивная мощность, активная фильтрация, симметрирование нагрузки, широтно-импульсная модуляция.

The article presents the multifunctional controller based on ac-dc power electronic converter. The controller is assigned for nonactive power compensation in three-phase power systems, and performs the following functions: reactive power control, active filtering and load balancing. It enables to improve the power quality in low-voltage distribution power systems. The realization of control algorithms is considered. These algorithms use the control signal transformation from three-phase stationary coordinates to two-phase rotating (synchronous) frame (abc/dq- transformation). The converter control is based on sinusoidal pulse-width modulation technique. The MatLab/Simulink model was developed to study the controller operation and efficiency of proposed algorithms. The simulation results for different operation modes are presented such as reactive power compensation, eliminating of current harmonics, compensation of currents for unbalanced load, and also the mode of nonactive power compensation in case of nonlinear unbalanced load.

*Key words:* power quality, power electronic converter, reactive power, active filtering, load balancing, pulse-width modulation.

**Метод совместного моделирования электрических цепных и полевых задач в теории индукционного нагрева**  
ДЕМИДОВИЧ В.Б., РАСТВОРОВА И.И.

Предложен и реализован комбинированный метод численного расчета электромагнитного поля в индукционных нагревательных системах, заключающийся в комбинации методов интегральных уравнений для расчета электро- магнитного поля в области вне загрузки и методов конечных элементов или конечных разностей для расчета электромагнитного поля внутри загрузки. На основе этого предложен метод моделирования электротехнических систем с одновременным решением цепных и полевых задач. На примере устройств индукционного нагрева формулируется внешняя задача, связанная с расчетом цепей индукторов, источников питания, компенсирующих конденсаторов и внутренняя задача, связанная с расчетом электромагнитного поля и внутренних источников теплоты в загрузке. Рассмотрено моделирование индукционных нагревателей с учетом особенностей работы тиристорного преобразователя частоты с параллельным инвертором.

*Ключевые слова:* моделирование электромагнитного поля, экономичный метод расчета электромагнитного поля, моделирование цепных схем, совместное моделирование цепных схем и электромагнитного поля, моделирование устройств индукционного нагрева.

The combined method of numerical computation of electromagnetic field in the induction heating systems, consisting in a combination of methods of the integral equations for computation of electromagnetic field in the area out of loading and methods of final elements or final differences for computation of electromagnetic field in loading is offered and realized. On the basis of it the method of modeling of electrotechnical systems with the simultaneous solution of chain and field tasks is offered. On the example of devices of induction heating the external task connected with computation of chains of inductors, the power supplies, compensating condensers and the internal task connected with calculation of electromagnetic field and internal sources of heating in loading is formulated. Modeling of induction heaters taking into account features of operation of the thyristor converter of frequency with the parallel inverter is considered.

*Key words:* modeling of an electromagnetic field, economic method of computation of electromagnetic fields problems, modeling of chain schemes, joint modeling of chain schemes and electromagnetic field, modeling of induction heating devices.