

**Обеспечение надёжности электроснабжения конечных потребителей в условиях рыночной экономики**  
СКОПИНЦЕВ В.А.

Одной из важных для решения задач создаваемого электросетевого комплекса ОАО «Российские сети» является обеспечение необходимого уровня надежности электроснабжения конечных потребителей. Анализ показателей надежности электроснабжения, используемых в настоящее время в отечественной практике, показал, что все они характеризуют средние системные оценки для всей совокупности потребителей, подсоединенных к определенной электрической сети. Для выделенного конечного потребителя не приняты приемлемые для практического использования показатели. На основе положений математической статистики и теории случайных процессов обоснованы показатели надежности электроснабжения конечного потребителя, которые рекомендуются применять в договорах на поставку электроэнергии. При этом действующие в настоящее время по данному вопросу нормативные, методические и управленческие документы должны быть пересмотрены с учетом требований рынка электроэнергии.

*Ключевые слова:* электросетевой комплекс, конечный потребитель, надежность электроснабжения, показатели надежности, рынок электроэнергии

One of conditions important for solving the tasks imposed on the JSC Russian Networks electric network complex, which is being established, is to secure the required reliability of supplying power to end consumers. An analysis of the power supply reliability indicators that are presently used in the practice of domestic power systems has shown that all of them characterize the average system estimates for the entire totality of consumers connected to a certain electric network. As regards an individual end consumer, indicators acceptable for practical use have not been adopted as yet. Indicators characterizing the reliability of power supply to an end consumer are substantiated based on the principles of mathematical statistics and theory of random processes, which are recommended for use in contracts for supplying electric energy. In view of this, the regulatory, methodical, and managerial documents on this matter that are currently in force should be revised with due regard of the electric energy market requirements.

*Key words:* electric network complex, end consumer, power supply reliability, reliability indicators, market of electric energy

**Применение систем резервного электропитания на основе маховичных агрегатов переменного тока и газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов для стабилизации режимов энергосистем**

ГОНЧАРЕНКО Р.Б., КИСЕЛЕВ А.А., ПОПОВ В.Е., РУТБЕРГ Ф.Г.

В последние десятилетия участились крупные системные аварии. Предотвращение таких аварий требует наличия резервных источников мощности, а также стабилизации напряжения и частоты в энергосистемах. Удачное решение многих проблем, возникающих при этом, обеспечивается при использовании газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов совместно с маховичными генераторами переменного тока и полупроводниковыми преобразователями частоты. Как известно, в энергосистемах стабилизация напряжения обеспечивается за счет регулирования значения реактивной мощности генераторов, электромашинных и статических компенсаторов реактивной мощности и путем подключения и отключения реактивных нагрузок (реакторов). Стабилизация частоты энергосистемы обеспечивается за счет регулирования активной мощности электростанций. В настоящее время регулирование реактивной мощности в энергосистемах осуществляется со скоростью до 20–50% ее номинального значения в секунду и даже быстрее (последнее для статических компенсаторов). Такая скорость

регулирования напряжения является в большинстве случаев достаточной для обеспечения качественной стабилизации напряжения в энергосистемах. Рассмотрены возможности применения газоаккумулирующих установок плазменной газификации отходов совместно с маховичными генераторами переменного тока и полупроводниковыми преобразователями частоты в качестве резервных источников мощности и для стабилизации режимов в энергосистемах. Показано, что целесообразно выполнять такие источники резервного электропитания на мощность 10–20 МВт для установки на местных подстанциях с напряжением 10 кВ и на мощность 100–200 МВт для установки на крупных подстанциях с напряжением 100–500 кВ.

*Ключевые слова:* энергосистемы, устойчивость, накопитель энергии, резервный источник мощности, плазменная газификация отходов

The recent decades have seen more frequent cases of large system-wide failures. Availability of backup power sources and means for stabilizing the voltage and frequency in power systems is the necessary condition for preventing the occurrence of such failures. Many problems arising under such conditions can efficiently be solved through the use of gas-storage installations for plasma-assisted gasification of wastes in combination of flywheel AC generators and semiconductor frequency converters. As is well-known, the voltage in power systems is stabilized by adjusting the reactive power of generators, rotary and static reactive power compensators, as well as by connecting/disconnecting reactive loads (reactors). The power system frequency is stabilized by adjusting the active power output of power stations. At present, reactive power is controlled in power systems at a rate of up to 20–50% of its nominal value per second or even faster (the latter is achieved through the use of static reactive power compensators). In the majority of cases, such voltage control rate is sufficient for achieving good stabilization of voltage in power systems. The possibilities of using gas-storage installations for plasma-assisted gasification of wastes in combination with flywheel AC generators and semiconductor frequency converters as backup power sources and for stabilizing the operating modes in power systems are considered. It is shown that such sources of backup power supply should have capacities equal to 10–20 MW when installed at local 10 kV substations and 100–200 MW when installed at large 100–500 kV substations.

*Key words:* power systems, stability, energy storage, plasma-assisted gasification of wastes

## **Регулирование напряжения в тяговой сети переменного тока железных дорог ГЕРМАН Л.А., КИШКУРНО К.В.**

Наиболее простой и эффективный способ регулирования напряжения в тяговой сети электрических железных дорог – это регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции и в тяговой сети на посту секционирования при двухсторонней схеме питания. На тяговых подстанциях для регулирования используют устройство ступенчатого регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (УРПН), установки поперечной и продольной емкостной компенсации, вольтодобавочные трансформаторы и т.д., а на посту секционирования – регулируемые установки поперечной емкостной компенсации, ФКУ и т.д. Рассмотрено регулирование напряжения с помощью автоматики УРПН, снижающей потери мощности в системе электроснабжения при нормированных ограничениях по режиму напряжения в тяговой сети переменного тока. На основании единой матричной модели совместного рассмотрения систем тягового и внешнего электроснабжения разработан метод расчета потерь и прироста потерь мощности при изменяющемся коэффициенте трансформации силовых трансформаторов тяговых подстанций и определяющий составляющие потерь мощности в тяговой сети от уравнивающих токов и тяговой нагрузки, а также в системе внешнего электроснабжения (включая силовые трансформаторы) от нагрузки подстанций. Предложен способ регулирования напряжения в тяговой сети

переменного тока электрических железных дорог с помощью трансформаторов с РПН с использованием расчетов прироста потерь мощности по напряжению в системе тягового электроснабжения с учетом продольной и поперечной несимметрии её параметров. Для повышения эффективности регулирования напряжения на участке тяговой сети с группой тяговых подстанций предлагается ввести регулирование в пределах всего диапазона изменения напряжения путем введения дополнительных порогов регулирования, а также ввести централизованное управление напряжением группой тяговых подстанций, при этом управление осуществляется в зависимости от прогнозируемых значений потерь мощности в системе электроснабжения. На примере реального участка электрической железной дороги выполнены расчеты по разработанному алгоритму, доказывающие эффективность предлагаемого способа регулирования.

*Ключевые слова:* тяговая сеть, регулирование напряжения, трансформатор, потери мощности, порог регулирования, расчет, эффективность

The simplest and most effective way to control the voltage in electric traction network of railways – it's voltage regulation on buses of traction substation and traction network in section pillar for two-sided power scheme. On traction substation for regulation is using a device of stepwise voltage regulation of transformer on load (OLTC), devices of cross and series capacitive compensation, boosting transformers etc., and on section pillar – regulated devices of cross capacitive compensation, filtercompensating device, etc. In this article is considered voltage regulation using automation of OLTC, reducing the power loss in power system at normalized restriction on mode voltage AC traction. On the basis of a single matrix model joint consideration of the traction systems and external power supply developed a method for calculating losses and gains power loss at varying CT ratio of power transformers of traction substations and defining components of power loss in the traction network from balanced currents and a traction load as well as on the system external power supply (including power transformers) from load substations. A method for controlling voltage in the AC traction network of electric railways using transformers with OLTC and calculations of gain of power losses in the traction power supply system considering the cross and series asymmetry of its parameters. To improve the efficiency of voltage regulation in the area of traction network with a group of traction substations proposed to introduce regulation in the entire voltage range by introducing additional regulatory limits and also introduce centralized voltage control by group of traction substations, wherein the control is carried out according to the predicted values of power losses in electricity. On an example for the real area of the electric railway calculations are made by the developed algorithm, demonstrating the efficiency of the proposed method of regulation.

*Key words:* the method of voltage regulation, electric traction network, transformer, power losses and gain of power loss, limits of regulation, predicted loss, calculations, efficiency

## **Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований** СТАВИНСКИЙ А.А., СТАВИНСКИЙ Р.А., АВДЕЕВА Е.А.

В последние десятилетия расширяется диапазон мощности использования прямоугольных сечений стержневых и витых элементов магнитопроводов индукционных статических устройств. Перспективным направлением решения задач новых разработок трехфазных трансформаторов является создание пространственных разъемных магнитопроводов с витыми элементами. Рассмотрены особенности нетрадиционных структур и конструкций трехфазных планарной и пространственных аксиальных, а также радиальной статической электромагнитных систем соответственно с прямоугольными, секторными и шестигранными образующими контурами стержней стыковых магнитопроводов и обмоточных катушек. Планарный магнитопровод отличается от традиционных шихтованных и витых аналогов

соответственно меньшими массой и потерями и исключением добавочных потерь от третьих гармоник секционных магнитных потоков. Пространственные структуры отличаются повышенной компактностью и пониженной трудоемкостью производства вариантов комбинированного и витых магнитопроводов. Рассмотрен метод оптимизационного сравнительного анализа электромагнитных систем, отличающихся положением в пространстве, конфигурацией образующих контуров и способами изготовления элементов. Метод использует целевые функции с относительными показателями технического уровня и относительными геометрическими управляемыми переменными. Показана идентичность относительных показателей технического уровня и оптимальных геометрических соотношений одинаковых структур активной части трансформаторов и реакторов при соответственно идентичных критериях оптимизации, используемых материалах и технологиях производства.

*Ключевые слова:* трансформатор, реактор, магнитопровод, обмотка, образующие контуры, метод анализа, управляемые переменные

In recent decades, a power range of using rectangular rods sections and twisted elements of magnetic cores of induction static devices is expanding. Promising direction of solving the problem of new developments of three-phase transformers is creation of spatial detachable magnetic cores with twisted elements. The features of non-traditional structures and designs of three-phase planar and spatial axial and radial static electromagnetic systems, respectively, with rectangular, sectorial and hexagonal forming contours of rods of butt magnetic cores and winding coils are considered. Planar magnetic core differs from traditional laminated and twisted analogues respectively smaller mass and losses and exception of additional losses from third harmonics of sectional magnetic fluxes. Spatial structures are characterized by high compactness and low labor intensity of production of combined and twisted magnetic cores variants. The method of optimization comparative analysis of electromagnetic systems that are different in position in space, forming circuit configuration and manufacturing elements methods is considered. The method uses a target function with relative indicators of technical level and relative geometric controlled variables. The identity of the relative performance of technical level and optimal geometric relationships of the same structures of the active part of transformers and reactors with a correspondingly identical optimization criteria, materials and production technologies is shown.

*Key words:* transformer, reactor, magnetic core, planar, spatial, winding, forming contours, analysis, relative controlled variables, relative indicators

## **Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления**

ВАСИЛЬЕВ Б.Ю.

Рассмотрены режимы работы силовых полупроводниковых преобразовательных устройств на примере автономного инвертора (АИ) асинхронного электропривода, а также обеспечивающие эти режимы алгоритмы управления: релейной модуляции («токовый коридор»); широтно-импульсной модуляции; пространственно-векторной модуляции (ПВМ). Дана краткая характеристика этих алгоритмов. Представлена структура алгоритма ПВМ и рассмотрены методы повышения эффективности работы автономного инвертора с таким алгоритмом управления. Эффективность повышается за счет угловой дифференциации (разбиения) координатной плоскости на подсекторы различного размера и за счет изменения алгоритма активации основных векторов на модуляционном периоде, т.е. путем перехода от симметричной ПВМ к разрывной с различной последовательностью коммутаций инвертора. Проанализированы результаты исследования приведенных в статье методов повышения эффективности работы автономного инвертора; дана классификация алгоритмов ПВМ.

*Ключевые слова:* автономный инвертор, пространственно-векторная модуляция, электромагнитная совместимость, алгоритм управления, эффективность управления

The article considers the operating modes of power semiconductor converters (taking as an example the self-excited inverter for an induction electric drive) and certain control algorithms supporting converter operation in these modes: relay modulation (so called «current corridor»), pulse-width modulation, and spatial-vector modulation (SVM). A brief characterization of these algorithms is given. The structure of an SVM algorithm is presented, and methods for achieving more efficient performance of a self-excited inverter with such control algorithm are considered. More efficient performance is achieved owing to angular differentiation (division) of the coordinate plane into subsectors of different sizes and by changing the algorithm activating the main vectors in the modulation period, i.e., by making a shift from symmetrical SVM to discontinuous one with different inverter switching sequences. The results from a study of the considered methods for achieving more efficient operation of a self-excited inverter are analyzed, and classification of SVM algorithms is given.

*Key words:* self-excited inverter, spatial-vector modulation, electromagnetic compatibility, control algorithm, control efficiency

### **Вектор Пойнтинга и новая теория трансформатора. Ч. 1** ШАКИРОВ М.А.

Представлена новая формула (модель) принципа действия силового трансформатора, вытекающая из характера распределения вектора Пойнтинга в промежутке между его первичной и вторичной обмотками. На базе этого принципа получены развернутые 4Т-образные схемы замещения и векторные диаграммы с локализациями на них всех магнитных потоков в окне и стали трансформатора. Подтверждена достоверность возникновения как при установившемся, так и при внезапном коротком замыкании одной из обмоток одновременно в различных частях магнитопровода сверх- и антипотоков. Делается вывод о необходимости пересмотра теории трансформатора. Это утверждение предопределено работами многих авторов, выступавших с критикой его Т- и П-образных схем замещения. В данной статье показано, что решение проблемы возможно только при более глубоком понимании физических основ работы трансформатора.

*Ключевые слова:* трансформатор, первичная и вторичная обмотки, магнитный поток, векторная диаграмма, схема замещения, короткое замыкание, напряженность магнитного поля, напряженность электрического поля

A new formula (model) describing the operating principle of a power transformer is presented, which follows from the Poynting vector distribution pattern in the gap between the transformer's primary and secondary windings. Developed 4E-shaped equivalent circuits and vector diagrams containing localized values of all magnetic fluxes in the magnetic core aperture and in the transformer iron have been obtained proceeding from this principle. It is confirmed that superfluxes and antfluxes really emerge simultaneously in different parts of the magnetic core during both steady and abrupt short-circuit faults in one of the windings. A conclusion is drawn about the need to revise the transformer theory. This statement was predetermined by works of many researchers criticized the T- and Pi-shaped equivalent networks of a transformer. It is shown that the problem can be solved only through gaining a deeper insight in the physical principles of transformer operation.

*Key words:* transformer, primary and secondary windings, magnetic flux, vector diagram, equivalent circuit, short-circuit fault, magnetic field strength, electric field intensity

## **Анализ магнитоэлектрических машин с преобразованием энергии на высшей гармонике поля якоря** СМИРНОВ А.Ю.

Рассмотрены схемы обмотки якоря, конструктивные схемы индуктора и методы расчета магнитоэлектрических машин, для преобразования энергии в которых используется одна из высших гармоник поля якоря. Использование высшей (третьей, пятой или зубцовой) гармоники для преобразования энергии в магнитоэлектрических машинах с ограниченным числом пазов на статоре позволяет увеличить относительную радиальную длину воздушного зазора, приблизить за счет этого форму поля в зазоре к синусоидальной, а также снизить неблагоприятное действие реактивных моментов, обусловленных поперечной реакцией якоря. Переход к рабочей гармонике выше первого порядка можно рассматривать и как способ сокращения длины вылета лобовых частей путем размещения сосредоточенных катушек, стороны которых находятся в соседних пазах, без чрезмерного уменьшения значения обмоточного коэффициента. Практическая возможность и целесообразность применения магнитоэлектрических машин с преобразованием энергии на третьей гармонике поля якоря получили подтверждение при использовании их в ответственных механизмах систем автоматики энергетических установок.

*Ключевые слова:* магнитоэлектрическая машина, постоянные магниты, якорь, индуктор, обмотка, высшие гармоники, преобразование энергии

The armature winding schematic arrangements and inductor design arrangements are considered together with methods for calculating magnetolectric machines that use one of armature field higher harmonic components for energy conversion. Owing to the use of a higher (third, fifth, or tooth) harmonic component for energy conversion in magnetolectric machines with a limited number of slots on the stator it becomes possible to make the air gap with a larger relative radial length, due to which the field waveform in the gap becomes closer to a sine-wave one. In addition, the undesirable effect of reactive torques resulting from the armature reaction in the quadrature axis is reduced. The changeover for using the working harmonic component higher than the fundamental one can be regarded as a method for decreasing the winding end-face part projection length by placing lumped coils the sides of which are in the neighboring slots, without excessively decreasing the winding coefficient. The feasibility and advisability of applying magnetolectric machines with energy conversion at the third harmonic component of armature field have been confirmed in the course of using them in the important actuators of automatic control systems of power installations.

*Key words:* magnetolectric machine, permanent magnets, armature, inductor, winding, higher harmonic components, energy conversion

## **Улучшение энергетических показателей линейного двигателя переменного тока** МАЛИНОВСКИЙ А.Е., САВАТЕЕВА И.С.

Наиболее известным способом компенсации продольного краевого эффекта линейного двигателя переменного тока является использование дополнительной короткозамкнутой обмотки, охватывающей магнитопровод индуктора [1]. Однако полной компенсации поля краевого эффекта достигнуть не удается. Неполная пространственная компенсация приводит к дополнительным потерям во вторичном теле, снижает КПД и тяговое усилие машины. Кроме того, наличие короткозамкнутой обмотки, которая должна быть рассчитана на большие токи, усложняет конструкцию индуктора и приводит к дополнительным потерям энергии в двигателе, ухудшающим его тепловой режим. В статье рассматриваются способы компенсации продольного краевого эффекта в линейных асинхронных двигателях, которые позволяют обеспечить более полную пространственную компенсацию поля продольного

краевого эффекта. Предлагаются функциональные схемы устройств компенсации, реализующих эти способы. Для компенсации поля продольного краевого эффекта предлагается использовать питание фазных обмоток линейных асинхронных двигателей несимметричной системой напряжений. Наряду с упрощением конструкции предлагаемые способы обеспечивают повышение КПД линейного двигателя и его коэффициента мощности.

*Ключевые слова:* линейный двигатель, продольный краевой эффект, компенсирующий виток, несимметричная система питающих напряжений, магнитный поток нулевой последовательности, устройство компенсации, КПД линейного двигателя

The best known method for compensating the longitudinal edge effect in a linear AC motor is to use an additional short-circuited winding embracing the magnetic core [1]. However, this measure does not allow the edge effect field to be compensated to a full extent. Incomplete spatial compensation results in additional losses in the secondary body, in lower efficiency, and in smaller traction force developed by the machine. In addition, the presence of a short-circuited winding, which must be designed for high currents, complicates the inductor design and gives rise to additional loss of energy in the motor, which has an adverse effect on its temperature operating conditions. Methods of compensating the longitudinal edge effect in linear induction motors are considered, using which the field caused by the longitudinal edge effect is spatially compensated to a fuller extent. The functional diagrams of compensating devices implementing these methods are proposed. For compensating the field caused by the longitudinal edge effect it is proposed to organize power supply to the phase windings of linear induction motors by an unbalanced system of voltages. Along with obtaining a simpler design, the use of the proposed methods makes it possible to achieve better efficiency of the linear motor and a higher value of its power factor.

*Key words:* linear motor, longitudinal edge effect, compensating turn, unbalanced system of power supply voltages, zero-sequence magnetic flux, compensating device, linear motor efficiency.