

## **Содержание**

*Электротехника, 2024, №6, стр. 2-16*

### **Анализ влияния симметрирующих устройств на режимы работы распределительных сетей**

ЭЛЬХОЛИ А.М., ПАНФИЛОВ Д.И., АСТАШЕВ М.Г., ЧАСОВ А.В., ПАНФИЛОВ И.Д., ОСТРИРОВ В.Н.

Современные распределительные сети характеризуются ростом электрических нагрузок, изменяющихся как по фазам, так и во времени. Динамические изменения режимов работы фаз нагрузок негативно сказываются на эффективности и пропускной способности распределительных сетей. Применение доступных на сегодняшний день подходов и технологий управления режимами работы сетей позволяет эффективно бороться с этими негативными явлениями. Практическая реализация таких подходов основывается на использовании различных устройств, автоматически воздействующих на режимы работы распределительной сети с учетом режимов работы фаз нагрузки. Выбор наиболее эффективного решения зависит от многих факторов. К их числу относятся: физические параметры распределительной сети и характер нагрузок, цели и задачи управления режимами работы сети, функционал и технико-экономические показатели устройств управления. На начальных этапах оценки технологий важно иметь подход, позволяющий выявлять их различие при решении поставленных задач. В качестве такого подхода предлагается проведение расчетов режимов работы распределительных сетей с помощью математических моделей устройств в среде MATLAB Simulink. Представлены результаты расчетов режимов работы трехпроводной и четырехпроводной распределительных сетей при заданных параметрах фаз сетей и нагрузки. На рассматриваемом примере проведен анализ влияния различных технологий управления на режимы работы распределительной сети. В числе таких технологий рассмотрены: компенсация токов нулевой последовательности, компенсация реактивной мощности, симметрирование мощностей по фазам, симметрирование с одновременной компенсацией реактивной мощности в фазах распределительной сети. Приведена краткая информация об устройствах, реализующих рассматриваемые технологии.

**Ключевые слова:** распределительные сети, симметрирующие устройства, MATLAB

Simulink, трансформатор с обмотками, соединенными в зигзаг, качество электроэнергии, потери электрической энергии.

Modern distribution networks are characterized by an increase in electrical loads, varying both in phases and over time. Dynamic changes in the operating modes of the load phases have a negative impact on the efficiency and throughput of distribution networks. The use of currently available approaches and technologies for managing network operation modes makes it possible to effectively combat these negative phenomena. The practical implementation of such approaches is based on the use of various devices that automatically affect the operating modes of the distribution network, taking into account the operating modes of the load phases. Choosing the most effective solution depends on many factors. These include: the physical parameters of the distribution network and the nature of the loads, the goals and objectives of managing the modes of operation of the network, the functionality and technical and economic indicators of control devices. At the initial stages of technology assessment, it is important to have an approach that allows you to identify their differences when solving tasks. As such an approach, it is proposed to calculate the operating modes of distribution networks using mathematical models of devices in the MATLAB Simulink environment. The results of calculations of the operating modes of three-wire and four-wire distribution networks at the specified parameters of the network phases and load are presented. The analysis of the influence of various control technologies on the operating modes of the distribution network is carried out on the example under consideration. Among such technologies, the following are considered: zero sequence current compensation, reactive power compensation, phase power symmetry, symmetry with simultaneous compensation of reactive power in the phases of the distribution network. Brief information about the devices implementing the technologies in question is provided.

**Key words:** distribution networks, balancing devices, MATLAB Simulink, transformer with windings connected in a zigzag, power quality, loss of electrical energy.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 17-24*

**Эффективность полупроводниковых регуляторов мощности при дискретном управлении**

АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., РАШИТОВ П.А., МОСТОВОЙ Д.В., ЧАСОВ А.В.

Рассмотрено влияние дискретности управления на работу полупроводниковых

регуляторов мощности, применяемых в распределительных сетях для симметрирования режима работы и компенсации реактивной мощности. Представлены аналитические выражения для расчета параметров силовой части регуляторов мощности при двух топологиях. Выполнен анализ диапазона необходимых параметров силовой части при их непрерывном управлении, показывающий необходимость ограничений с учетом практической реализации и дискретности регулирования. Предложен способ оценки эффективности регулятора мощности при дискретном управлении его параметрами. Проведён анализ влияния дискретности задания параметров на эффективность работы двух схем регуляторов мощности. Рассмотрены разные методы расчёта дискретных значений параметров силовой части регуляторов мощности. Показано влияние методов расчёта параметров силовых схем на эффективность работы регуляторов мощности и количество итераций, необходимых для расчёта их дискретных значений.

**Ключевые слова:** распределительная трёхфазная электрическая сеть, полупроводниковый регулятор мощности, дискретное регулирование, компенсация реактивной мощности, симметрирование режима работы.

The influence of control discreteness on the operation of semiconductor power regulators used in distribution networks for operation mode symmetry and reactive power compensation is considered. Analytical expressions for calculating the parameters of the power part of power regulators for two topologies are presented. The analysis of the range of necessary parameters of the power unit with their continuous control is performed, showing the need for restrictions, taking into account the practical implementation and discreteness of regulation. A method for evaluating the efficiency of a power regulator with discrete control of its parameters is proposed. The analysis of the effect of the discreteness of setting parameters on the efficiency of two circuits of power regulators is carried out. Different methods of calculating discrete values of the parameters of the power part of power regulators are considered. The influence of methods for calculating the parameters of power circuits on the efficiency of power regulators and the number of iterations required to calculate their discrete values is shown.

**Key words:** three-phase distribution electrical network, semiconductor power regulator, discrete regulation, reactive power compensation, operation mode symmetry.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 25-33*

**Системы управления полупроводниковыми регуляторами мощности в распределительных сетях**

РАШИТОВ П.А., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., МОСТОВОЙ Д.В., ЧАСОВ А.В,  
БЕСПАЛЫЙ В.В.

Представлен подход к построению систем управления полупроводниковыми регуляторами мощности для распределительных сетей с целью симметрирования режимов работы сети и компенсации реактивной мощности. Сформулированы основные функции, которые должны реализовать системы управления полупроводниковыми регуляторами мощности. Представлена обобщённая структура системы управления, применимая для широкого класса схемотехнических решений полупроводниковых регуляторов мощности. Предложен обобщённый алгоритм работы системы управления. Представлен пример реализации аппаратно-программного комплекса системы управления для одной из схем полупроводникового регулятора мощности. Приведены результаты экспериментальных исследований работы системы управления в автоматическом режиме макетного образца одной из схем полупроводникового регулятора мощности, показывающие симметрирование активной мощности в сети при динамически изменяющейся нагрузке.

**Ключевые слова:** полупроводниковый регулятор мощности, система управления, обобщенный алгоритм системы управления, компенсация реактивной мощности, симметрирование режима работы, аппаратно-программный комплекс.

An approach is presented to the construction of control systems for semiconductor power regulators for distribution networks in order to synchronize the operating modes of the network and compensate for reactive power. The main functions that should be implemented by semiconductor power control systems are formulated. A generalized control system structure is presented that is applicable to a wide class of circuit solutions for semiconductor power regulators. A generalized algorithm for the operation of the control system is proposed. An example of the implementation of a hardware and software complex of a control system for one of the circuits of a semiconductor power regulator is presented. The results of experimental studies of the operation of the control system in automatic mode of a mock-up sample of one of the circuits of a semiconductor power regulator are presented, showing the symmetry of active power in the network under dynamically changing load.

**Key words:** semiconductor power regulator, control system, generalized control system algorithm, reactive power compensation, operation mode symmetry, hardware and software complex.

### **Источник питания с передачей энергии трансформаторами тока**

СЕРЕГИН Д.А., АСТАШЕВ М.Г., ВОРОНИН И.П., РАШИТОВ П.А., ПАВЛОВА М.С., МОСТОВОЙ Д.В.

Рассмотрен высоковольтный многоячейковый источник питания с передачей энергии через токовую петлю и трансформаторы тока. Источник питания (статического преобразователя электроэнергии) состоит из инвертора, формирующего ток заданной величины в токовой петле; токовой петли, представляющей из себя отрезок кабеля; трансформаторов тока, первичной обмоткой которых является токовая петля; управляемых выпрямительных ячеек. Такое решение позволяет обеспечить надежную изоляцию между входными и выходными цепями источника при достаточно простой конструкции устройства. За счет использования в структуре однотипных выпрямительных ячеек обеспечивается простое масштабирование источника по уровню выходного напряжения, а также простая настройка и ремонт устройства. Рассмотрен принцип работы, обоснован выбор технических решений основных узлов устройства. Исследована система стабилизации выходного напряжения выпрямительной ячейки как система автоматического регулирования с импульсно-фазовым управлением. Получены частотные характеристики этой системы для двух режимов передачи энергии в нагрузку, проведено сравнение режимов и определен более перспективный. Изготовлен и испытан макет источника питания на напряжение 10 кВ. Испытания подтвердили корректность расчетов и эффективность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** импульсный преобразователь электроэнергии, высоковольтный источник питания, многоячейковый источник питания, высокая точность стабилизации.

A high-voltage multicellular power supply with energy transfer through a current loop and current transformers is considered. The power source (static electricity converter) consists of an inverter that generates a current of a given value in a current loop; a current loop consisting of a cable segment; current transformers, the primary winding of which is a current loop; controlled rectifier cells. This solution allows for reliable isolation between the input and output circuits of the source with a fairly simple device design. Due to the use of the same type of rectifier cells in the structure, a simple scaling of the source according to the output voltage level is provided, as well as simple setup and repair of the device. The principle of operation is considered, the choice of technical solutions for the main components of the device is justified. A system for stabilizing the output voltage of a rectifier cell as an automatic control system with pulse-phase control is investigated. The frequency characteristics of this system for two modes of energy transfer to the

load are obtained, the modes are compared and a more promising one is determined. A mock-up of a 10 kV power supply has been manufactured and tested. The tests confirmed the correctness of the calculations and the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** switching power converter, high-voltage power supply, multicellular power supply, high stabilization accuracy.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 43-51*

### **Адаптивные полупроводниковые регуляторы реактивной мощности с высоким качеством реактивного тока для сетей 0,4 кВ**

КРАСНОПЕРОВ Р.Н., АСТАШЕВ М.Г., АЛЬТЕРГОТ А.В., БАДАЛЯН А.В, ПАВЛОВА М.С., УСТИМОВ Д.М.

Рассмотрен полупроводниковый регулятор реактивной мощности, характеризующийся высоким качеством регулирования реактивного тока и высокими технико-экономическими показателями. Показаны преимущества использования в составе компенсаторов реактивной мощности коммутаторов на основе тиристорных ключей. Представлена технология построения полупроводниковых регуляторов реактивной мощности, основанная на управлении в режиме реального времени величиной эквивалентного реактивного элемента. В качестве одной из наиболее оптимальных реализаций силовой схемы рассмотрено применение «бинарной» тиристорно-переключаемой конденсаторной группы. Предложены алгоритмы активно-адаптивного управления и поддержания высокого качества тока и напряжения в сети, в том числе при переключениях ступеней регулирования реактивного тока. Рассмотрена структурная блок-схема системы управления устройством, обеспечивающая автоматическое поддержание оптимальных режимов работы сетей за счет актуализации параметров цифровых математических двойников сетей и подбора наилучшего режима работы полупроводникового регулятора реактивной мощности. Показаны функциональные возможности устройства, позволяющие интегрировать его в состав современных активно-адаптивных электрических сетей и цифровых подстанций. Представлены результаты эксплуатации опытно-промышленных образцов, подтверждающие эффективность предложенных технических решений. Отмечены возможности масштабирования технологии в широких диапазонах классов напряжений и мощностей. Показаны перспективы развития и применения устройств.

**Ключевые слова:** полупроводниковый регулятор реактивной мощности, компенсация

реактивной мощности, качество электрической энергии, активно-адаптивные электрические сети, алгоритмы управления, опытно-промышленный образец.

A semiconductor reactive power regulator is considered, characterized by high quality reactive current regulation and high technical and economic indicators. The advantages of using switches based on thyristor switches as part of reactive power compensators are shown. A technology for constructing semiconductor reactive power regulators based on real-time control of the value of an equivalent reactive element is presented. The use of a «binary» thyristor-switchable capacitor group is considered as one of the most optimal implementations of a power circuit. Algorithms for active adaptive control and maintenance of high quality of current and voltage in the network, including when switching stages of reactive current regulation, are proposed. The structural block diagram of the device control system is considered, which provides automatic maintenance of optimal network operation modes by updating the parameters of digital mathematical counterparts of networks and selecting the best operating mode of a semiconductor reactive power regulator. The functional capabilities of the device are shown, which allow it to be integrated into modern active-adaptive electrical networks and digital substations. The results of the operation of experimental industrial samples are presented, confirming the effectiveness of the proposed technical solutions. The possibilities of scaling the technology in a wide range of voltage and power classes are noted. The prospects for the development and application of devices are shown.

**Key words:** semiconductor reactive power regulator, reactive power compensation, electric energy quality, active-adaptive electric networks, control algorithms, pilot industrial design.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 52-63*

### **Баланс напряжения нейтральной точки в трехуровневом инверторе напряжения на основе пространственно-векторной ШИМ с семиступенчатой последовательностью переключений**

ШИШКОВ А.Н., ДУДКИН М.М., ЛЕ В.К., ЕРЕМИН Н.А.

Дисбаланс напряжения нейтральной точки (НТ) звена постоянного тока является одним из неотъемлемых ограничений при применении трехуровневых автономных инверторов напряжения с фиксированной нейтральной точкой в системах электроприводов. Для обеспечения баланса напряжения НТ в допустимых пределах предложен алгоритм управления на базе пространственно-векторной ШИМ с семиступенчатой

последовательностью переключений (ПП), позволяющий по сравнению с известными методами управления существенно улучшить баланс напряжения НТ за счет регулирования коэффициента заполнения распределенных базовых векторов на каждом периоде ШИМ на основе фазных токов нагрузки. Алгоритм также устраняет дисбаланс напряжения НТ, вызванный внешними причинами, например, несимметрией конденсаторов постоянного тока или трехфазной нагрузки и других факторов за счет сигнала обратной связи по отклонению напряжений двух конденсаторов звена постоянного тока. Приведена система расчета длительностей включения базовых векторов в семиступенчатой ПП. Эффективность предлагаемого алгоритма подтверждена на основе компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink. Предложенный алгоритм в 1,86 раза снижает среднее значение максимальной относительной ошибки напряжения НТ во всем диапазоне изменения коэффициента модуляции по сравнению с известным способом баланса напряжения НТ на основе сигнала обратной связи по отклонению напряжений двух конденсаторов звена постоянного тока. Это позволяет эффективно сбалансировать напряжение НТ и, как следствие, улучшить эксплуатационную надежность инвертора.

**Ключевые слова:** многоуровневый инвертор, трехуровневый автономный инвертор напряжения с фиксированной нейтральной точкой, баланс напряжения, пространственно-векторная ШИМ, семиступенчатая последовательность переключений.

The voltage imbalance of the neutral point (NT) of the DC link is one of the inherent limitations when using three-level autonomous voltage inverters with a fixed neutral point in electric drive systems. To ensure the NT voltage balance within acceptable limits, a control algorithm based on a space-vector PWM with a seven-stage switching sequence (SS) is proposed, which allows, compared with known control methods, to significantly improve the NT voltage balance by adjusting the fill factor of distributed base vectors at each PWM period based on phase load currents. The algorithm also eliminates the voltage imbalance of the NT caused by external causes, for example, the asymmetry of DC capacitors or three-phase load and other factors due to the feedback signal on the voltage deviation of two DC link capacitors. A system for calculating the durations of the inclusion of basic vectors in a seven-stage SS is presented. The effectiveness of the proposed algorithm has been confirmed on the basis of computer simulation in the MATLAB Simulink environment. The proposed algorithm reduces the average value of the maximum relative error of the NT voltage by 1,86 times over the entire range of variation of the modulation coefficient compared to the known method of balancing the NT voltage based on a



feedback signal for voltage deviation of two DC link capacitors. This allows you to effectively balance the voltage of the NT and, as a result, improve the operational reliability of the inverter.

**Key words:** multilevel inverter, three-level autonomous voltage inverter with a fixed neutral point, voltage balance, spatial vector PWM, seven-stage switching sequence.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 64-70*

## **Сравнительный анализ электрических машин с катящимся ротором с различными схемами обмоток**

МОЛОКАНОВ О.Н.

Низкоскоростные электрические машины с высоким удельным моментом востребованы во многих областях техники, где важны массогабаритные показатели. Традиционно там применяются электрические машины с постоянными магнитами, которые, однако, характеризуются высокой стоимостью и малым диапазоном регулирования частоты вращения. В связи с этим актуальным направлением исследований является повышение удельного момента электрических машин с реактивной природой электромагнитного момента. Одним из способов достижения высоких удельных характеристик таких машин является использование специальной топологии магнитной системы, тесно интегрированной с механической передачей – электрических машин с катящимся ротором. Для эффективного функционирования такие машины должны развивать большую силу радиального притяжения, поэтому в них применяются специальные типы обмоток. Известны несколько вариантов схем исполнения обмоток, однако отсутствуют данные по сравнению их между собой. Для корректного сравнения в статье выполнена многомерная параметрическая оптимизация четырёх вариантов магнитных систем с различными схемами обмоток по критерию максимизации момента. В результате рассчитан удельный момент для каждого варианта магнитных систем. Полученные результаты позволили сделать выводы об эффективности каждой из схем обмоток; это результаты могут быть использованы при проектировании электрических машин с катящимся ротором.

**Ключевые слова:** электрические машины с катящимся ротором, схемы обмоток, циклоидальный редуктор, удельный момент, реактивный момент.

Low-speed electric machines with high specific torque are in demand in many areas of technology where weight and size indicators are important. Traditionally, electric machines with permanent magnets are used there, which, however, are characterized by high cost and a small

range of speed control. In this regard, an urgent area of research is to increase the specific moment of electric machines with the reactive nature of the electromagnetic moment. One of the ways to achieve high specific characteristics of such machines is to use a special topology of a magnetic system closely integrated with mechanical transmission – electric machines with a rolling rotor. For effective operation, such machines must develop a large force of radial attraction, therefore, special types of windings are used in them. Several variants of winding execution schemes are known, but there is no data comparing them with each other. For a correct comparison, the article performs a multidimensional parametric optimization of four variants of magnetic systems with different winding schemes according to the criterion of torque maximization. As a result, the specific moment is calculated for each variant of magnetic systems. The results obtained allowed us to draw conclusions about the effectiveness of each of the winding circuits; these results can be used in the design of electric machines with a rolling rotor.

**Key words:** electric machines with a rolling rotor, winding circuits, cycloidal gearbox, specific torque, reactive torque.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 71-77*

### **Аналитический расчет индуктивности лобового рассеяния обмотки статора электрических машин**

АФАНАСЬЕВ А.А.

Рассматриваются уравнения математической физики, являющиеся решением уравнения Лапласа в частных производных методом разделения переменных для полых цилиндров конечной длины, в качестве основы аналитической модели электрических машин. Ядро и зубцовый слой сердечника статора представлены в модели двумя вложенными цилиндрами, а торцовая зона сердечника – несколькими цилиндрами, состыкованными между собой и с внутренним вложенным цилиндром. Неизвестные постоянные метода разделения переменных находятся из граничных условий электромагнитного поля: скалярные магнитные потенциалы и координатные составляющие магнитной индукции не претерпевают скачка (разрыва). Анализируется магнитное поле, вызванное магнитодвижущей силой (МДС) обмотки статора, в самом сердечнике и вне его – в зоне лобовых частей обмотки. Показано, что известная формула для МДС обмотки в активной части воздушного зазора может использоваться и для определения МДС лобовых проводников. Вычисляется потокосцепление лобовых частей катушки и на его основе индуктивность лобового рассеяния всей обмотки. Справедливость исходных

аналитических подходов для решения названной проблемы продиктована использованием трёхмерных уравнений математической физики в цилиндрической системе координат для электрических машин, преобладающее большинство которых имеют активную зону цилиндрической конструкции. Полученное численное значение этого параметра для вентильного двигателя мощностью 150 кВт достаточно близко к расчётному, найденному по известной полуэмпирической формуле, применяемой в практике проектирования электрических машин.

**Ключевые слова:** электрическая машина, обмотка статора, лобовая часть, вылет и потокосцепление лобовых частей обмотки, магнитная индукция в торцевой зоне, уравнения математической физики, полые цилиндры конечной длины.

The equations of mathematical physics, which are the solution of the Laplace equation in partial derivatives by the method of separation of variables for hollow cylinders of finite length, are considered as the basis of an analytical model of electric machines. The yoke and the tooth layer of the stator core are represented in the model by two nested cylinders, and the end zone of the core is represented by several cylinders docked together and with an internal nested cylinder. Unknown constants of the method of separating variables are found from the boundary conditions of the electromagnetic field: scalar magnetic potentials and coordinate components of magnetic induction do not undergo a jump (rupture). The magnetic field caused by the magnetomotive force (MDF) of the stator winding is analyzed in the core itself and outside it – in the area of the frontal parts of the winding. It is shown that the well-known formula for the MDF of the winding in the active part of the air gap can also be used to determine the MDF of frontal conductors. The flow coupling of the frontal parts of the coil is calculated and, based on it, the inductance of the frontal scattering of the entire winding. The validity of the initial analytical approaches to solving this problem is dictated by the use of three-dimensional equations of mathematical physics in a cylindrical coordinate system for electric machines, the vast majority of which have an active zone of a cylindrical structure. The obtained numerical value of this parameter for a 150 kW valve motor is close enough to the calculated value found by the well-known semi-empirical formula used in the practice of designing electric machines.

**Key words:** electric machine, stator winding, frontal part, outflow and flow coupling of the frontal parts of the winding, magnetic induction in the end zone, equations of mathematical physics, hollow cylinders of finite length.

**О применимости источников информации для системы мониторинга электрических параметров электроустановок зданий**

РЯБЧИЦКИЙ М.В., КРЮКОВ К.В., ВОРОНЦОВ К.К., ЕРКАНАЛИЕВ Д.Р., ГРИДУНОВ Д.В.

В статье рассматриваются подходы к созданию системы мониторинга электроустановок зданий, позволяющей разрабатывать меры по снижению потерь при распределении электроэнергии внутри здания. Для качественной работы системы важно обеспечивать точность измерений, достаточную для исключения ошибок в решениях, принимаемых на базе анализа данных. Проведен анализ используемого оборудования с точки зрения точности измерений параметров. Разработаны математические модели позволяющие оценить влияние точности средств измерения на качество получаемых данных.

**Ключевые слова:** мониторинг системы электроснабжения зданий, энергоэффективность, качество электроэнергии, измерение параметров электроэнергии.

The article discusses approaches to creating a monitoring system for electrical installations of buildings, which allows developing measures to reduce losses in the distribution of electricity inside the building. For the high-quality operation of the system, it is important to ensure the accuracy of measurements sufficient to eliminate errors in decisions made on the basis of data analysis. The analysis of the used equipment from the point of view of accuracy of measurements of parameters is carried out. Mathematical models have been developed to assess the impact of the accuracy of measuring instruments on the quality of the data obtained.

**Key words:** monitoring of the power supply system of buildings, energy efficiency, quality of electricity, measurement of electricity parameters.

**Влияние несинусоидальности напряжения и волн перенапряжения на развитие частичных разрядов в изоляции кабельных линий**

КОРЖОВ А.В., ДЗЮБА М.А., САФОНОВ В.И., БАБАЕВ Р.М.О., КОРОСТЕЛЕВ Я.Е.

Изложены результаты экспериментов по исследованию частичных разрядов в изоляции кабельных линий при несинусоидальном напряжении. При несинусоидальности примерно 10 % моделировалась работа электрической сети в нормальном режиме, а при несинусоидальности около 80 % и гармониках в области частот 2–4 кГц моделировались

волны перенапряжения. При несинусоидальности статистически показано, что основным фактором развития частичных разрядов является разность между амплитудой приложенного напряжения и пороговым напряжением возникновения частичных разрядов, а их мощность слабо зависит от гармонического состава напряжения. Показано, что наибольшее отклонение от линейного закона при увеличении приложенного напряжения наблюдается для мощности частичных разрядов, поэтому эту зависимость наиболее целесообразно использовать при анализе состояния кабельных линий по уровню частичных разрядов. Экспериментально и путем имитационного моделирования показано, что при несинусоидальности 80 % и гармониках в области частот 2–4 кГц количество и мощность частичных разрядов за период основной гармоники существенно возрастают. В этом случае амплитуды гармоники уже хватает для перезарядки дефекта и именно гармоника становится определяющей при формировании частичных разрядов.

**Ключевые слова:** изоляция кабельных линий, несинусоидальность напряжения, волны перенапряжения, коммутационные перенапряжения, частичные разряды, старение изоляционных материалов.

The results of experiments on the study of partial discharges in the insulation of cable lines at non-sinusoidal voltage are presented. With a non-sinusoidality of approximately 10%, the operation of the electrical network in normal mode was simulated, and with a non-sinusoidality of about 80% and harmonics in the frequency range of 2–4 kHz, overvoltage waves were simulated. In case of non-sinusoidality, it is statistically shown that the main factor in the development of partial discharges is the difference between the amplitude of the applied voltage and the threshold voltage of the occurrence of partial discharges, and the partial discharges power weakly depends on the harmonic composition of the voltage. It is shown that the greatest deviation from the linear law with an increase in the applied voltage is observed for the power of the partial discharges, therefore this dependence is most advisable to use when analyzing the state of cable lines by the level of partial discharges. It has been shown experimentally and by simulation that with a non-sinusoidality of 80% and harmonics in the frequency range of 2–4 kHz, the number and power of partial discharges during the period of the main harmonic increase significantly. In this case, the amplitude of the harmonic is already sufficient to recharge the defect and it is the harmonic that becomes decisive in the formation of partial discharges.

**Key words:** insulation of cable lines, non-sinusoidal voltage, overvoltage waves, switching overvoltages, partial discharges, aging of insulating materials.

*Электротехника, 2024, №6, стр. 92-93*

**Авторы номера**