

**Содержание**

*Электротехника, 2022, №6, стр.2-8*

**Симметрирование режимов работы трехфазных линий электропередачи  
полупроводниковыми регуляторами мощности**

ПАНФИЛОВ Д.И., АСТАШЕВ М.Г., ЧАСОВ А.В.

Представлен подход к разработке управляемых устройств поперечного регулирования для автоматического симметрирования режимов работы трёхфазных линий электропередачи с несимметричными нагрузками. Сформулирована общая задача построения силовых схем и определения законов управления устройствами. На примере одной из возможных схем построения устройства поперечного регулирования продемонстрирован подход к определению ее параметров и закона управления с применением метода симметричных составляющих для токов фаз в линии электропередачи и нагрузки. Представлен анализ электромагнитных процессов, поясняющий принцип работы устройства. Предложена имитационная модель устройства и приведены результаты моделирования режимов ее работы при несимметричной нагрузке. Приведены результаты экспериментальных исследований работы макетного образца устройства в линии электропередачи при различных нагрузках.

**Ключевые слова:** трехфазные трехпроводные линии электропередачи, трехфазные четырехпроводные линии электропередачи, полупроводниковый регулятор мощности, несимметричная нагрузка, компенсация обратной последовательности токов нагрузки.

An approach to the development of controlled transverse control devices for automatic symmetry of operating modes of three-phase power transmission lines with asymmetric loads is presented. The general task of constructing power circuits and determining the laws of device control is formulated. Using the example of one of the possible schemes for constructing a transverse control device, an approach to determining its parameters and the control law using the method of symmetric components for phase currents in power transmission lines and loads is demonstrated. The analysis of electromagnetic processes explaining the principle of operation of the device is presented. A simulation model of the device is proposed and the results of modelling the modes of its operation under an asymmetric load are presented. The results of

experimental studies of the operation of a mock-up sample of the device in a power transmission line under various loads are presented.

**Key words:** three-phase three-wire power transmission lines, three-phase four-wire power transmission lines, semiconductor power regulator, asymmetric load, compensation of the reverse sequence of load currents.

*Электротехника, 2022, №6, стр.9-15*

### **К расчету симметрирующих устройств для трехфазных трехпроводных линий электропередачи**

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

Рассмотрена задача симметрирования режимов работы и компенсация реактивных мощностей в трехфазных трехпроводных линиях электропередачи с помощью симметрирующих устройств при несимметричной нагрузке. Описаны подходы к расчету параметров симметрирующих устройств с использованием метода симметричных составляющих и баланса мощностей. Рассмотрена задача симметрирования режимов работы линий электропередачи с помощью управляемых реактивных элементов. На примере конкретных параметров несимметричных нагрузок представлены результаты расчета и имитационного моделирования работы двух схем построения симметрирующих устройств на основе реактивных элементов - схемы, построенной на основе двух реактивных элементов для симметрирования режима работы линии электропередачи, и схемы, построенной на основе трех реактивных элементов для одновременного симметрирования режима работы и компенсации реактивных мощностей в линии электропередачи.

**Ключевые слова:** трехфазные трехпроводные линии электропередачи, симметрирующие устройства, метод симметричных составляющих, баланс мощностей трехфазной трехпроводной линии электропередачи, компенсация реактивной мощности, моделирование устройств симметрирования.

The problem of operation mode symmetry and reactive power compensation in three-phase three-wire power transmission lines with the help of symmetrical devices with an asymmetric load is considered. Approaches to calculating the parameters of symmetrical devices using the

method of symmetric components and power balance are described. The problem of symmetrization of the modes of operation of power transmission lines using controlled reactive elements is considered. Using the example of specific parameters of asymmetric loads, the results of calculation and simulation of the operation of two schemes for constructing symmetrical devices based on reactive elements are presented - a scheme based on two reactive elements for balancing the operating mode of a power line, and a scheme based on three reactive elements for simultaneous balancing of the operating mode and compensation of reactive capacities in a power line.

**Key words:** three-phase three-wire transmission lines, symmetrical devices, method of symmetrical components, power balance of three-phase three-wire transmission line, reactive power compensation, simulation of symmetry devices.

*Электротехника, 2022, №6, стр.16-22*

#### **Устройства симметрирования режимов работы трехфазных четырехпроводных линий электропередачи**

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

Представлен подход к разработке управляемых устройств поперечного регулирования для автоматического симметрирования режимов работы и компенсации реактивных мощностей в трёхфазных четырехпроводных линиях электропередачи с несимметричными нагрузками. Сформулирована задача построения силовых схем и систем управления устройствами поперечного регулирования. Рассмотрен один из вариантов построения силовой схемы устройства. Выполнен анализ электромагнитных процессов, поясняющий принцип работы устройства и системы управления. Приведены расчеты параметров элементов силовой схемы устройства поперечного регулирования и результаты моделирования режимов работы линии электропередачи при несимметричных нагрузках.

**Ключевые слова:** трехфазные четырехпроводные линии электропередачи, устройства симметрирования, метод симметричных составляющих, регулятор мощности, компенсатор реактивной мощности.

An approach to the development of controlled transverse control devices for automatic symmetry of operating modes and reactive power compensation in three-phase four-wire power transmission lines with asymmetric loads is presented. The problem of constructing power circuits and control systems for transverse control devices is formulated. One of the options for constructing a power circuit of the device is considered. The analysis of electromagnetic processes is carried out, explaining the principle of operation of the device and control system. Calculations of the parameters of the elements of the power circuit of the transverse control device and the results of modeling the modes of operation of the power transmission line under asymmetric loads are given.

**Key words:** three-phase four-wire power transmission lines, symmetry devices, method of symmetrical components, power regulator, reactive power compensator.

*Электротехника, 2022, №6, стр.23-32*

### **Устройства симметрирования режимов работы трехфазных четырехпроводных линий электропередачи**

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

Представлен подход к разработке управляемых устройств поперечного регулирования для автоматического симметрирования режимов работы и компенсации реактивных мощностей в трёхфазных четырехпроводных линиях электропередачи с несимметричными нагрузками. Сформулирована задача построения силовых схем и систем управления устройствами поперечного регулирования. Рассмотрен один из вариантов построения силовой схемы устройства. Выполнен анализ электромагнитных процессов, поясняющий принцип работы устройства и системы управления. Приведены расчеты параметров элементов силовой схемы устройства поперечного регулирования и результаты моделирования режимов работы линии электропередачи при несимметричных нагрузках.

**Ключевые слова:** трехфазные четырехпроводные линии электропередачи, устройства симметрирования, метод симметричных составляющих, регулятор мощности, компенсатор реактивной мощности.

An approach to the development of controlled transverse control devices for automatic symmetry of operating modes and reactive power compensation in three-phase four-wire power transmission lines with asymmetric loads is presented. The problem of constructing power circuits and control systems for transverse control devices is formulated. One of the options for constructing a power circuit of the device is considered. The analysis of electromagnetic processes is carried out, explaining the principle of operation of the device and control system. Calculations of the parameters of the elements of the power circuit of the transverse control device and the results of modeling the modes of operation of the power transmission line under asymmetric loads are given.

**Key words:** three-phase four-wire power transmission lines, symmetry devices, method of symmetrical components, power regulator, reactive power compensator.

*Электротехника, 2022, №6, стр.33-38*

### **Влияние мощной преобразовательной нагрузки на качество энергии автономной электроэнергетической системы транспортного объекта**

ЕПИФАНЦЕВ И.Р., ЖИЛЕНКОВ А.А., МАРКОВКИНА Н.Н.

Приведены результаты измерения показателей качества электроэнергии в автономной электроэнергетической системе автопарома с электродвижением. Питание гребных двигателей судна осуществляется через мощные тиристорные преобразователи частоты, вследствие чего мощность преобразовательной нагрузки соизмерима с мощностью электростанции. Соизмеримость мощностей полупроводниковой нагрузки и генераторов типична для электроэнергетических систем современных судов и буровых платформ, и как правило, приводит к необходимости обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии, а следовательно, к необходимости разработки всё более эффективных методов и средств активного контроля процессов генерирования и потребления неактивной мощности. В статье оцениваются перспективы применения пассивных и активных средств фильтрации для снижения выявленных негативных эффектов, наблюдаемых в электроэнергетической системе судна.

**Ключевые слова:** автономные энергосистемы, качество электроэнергии, гармонический состав, активный фильтр, коэффициент мощности.

The results of measuring the quality of electricity in an autonomous electric power system of an electric motor vehicle are presented. The power supply of the vessel's rowing engines is carried out through powerful thyristor frequency converters, as a result of which the power of the converter load is commensurate with the power of the power plant. The commensurability of the capacities of the semiconductor load and generators is typical for the electric power systems of modern ships and drilling platforms, and as a rule, leads to the need to ensure the required indicators of the quality of electricity, and consequently, to the need to develop more and more effective methods and means of active control of the processes of generation and consumption of inactive power. The article assesses the prospects for the use of passive and active filtration means to reduce the identified negative effects observed in the ship's electric power system.

**Key words:** autonomous power systems, power quality, harmonic composition, active filter, power factor.

*Электротехника, 2022, №6, стр.39-44*

### **Определение интергармоник тока асинхронного двигателя с переменной периодической нагрузкой**

АВДЕЕВ Б.А., ЧЕРНЫЙ С.Г., МОИСЕЕВ И.С., ЖИЛЕНКОВ А.А.

Статья посвящена определению интергармоник тока, возникающих при работе асинхронного электродвигателя с переменной периодической нагрузкой. В имитационной модели, состоящей из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, блока переменной периодической нагрузки, источника трехфазного напряжения и подсистемы спектрального анализа тока, определены параметры основной гармоник тока. Найдена разность между током фазы статора асинхронного двигателя и его выделенной основной гармоник. Показано, что кроме основной гармоник тока при работе электродвигателя на переменную периодическую нагрузку, в статоре проявляются другие пульсации тока, не являющиеся номерными гармониками от основной. Путём представления полученной разности в виде гармонического ряда Фурье определены частоты, амплитуды и фазы интергармоник. Для уменьшения интергармоник тока для устройств, работающих с переменной периодической нагрузкой, предложено использовать активные фильтры гармоник фиксированной фильтрации или с автоматической подстройкой параметров фильтрации.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, переменная периодическая нагрузка, интергармоники, высшие гармоники, моделирование, активный фильтр.

The article is devoted to the determination of the current interharmonics that occur during the operation of an asynchronous electric motor with a variable periodic load. In a simulation model consisting of an asynchronous motor with a short-circuited rotor, a variable periodic load unit, a three-phase voltage source and a current spectral analysis subsystem, the parameters of the main harmonic of the current are determined. The difference between the phase current of the asynchronous motor stator and its dedicated fundamental harmonic is found. It is shown that in addition to the main harmonic of the current when the electric motor is operating on a variable periodic load, other current pulsations appear in the stator that are not numbered harmonics from the main one. By representing the resulting difference in the form of a harmonic Fourier series, the frequencies, amplitudes and phases of the interharmonics are determined. To reduce the current interharmonics for devices operating with variable periodic load, it is proposed to use active harmonic filters of fixed filtration or with automatic adjustment of filtration parameters.

**Key words:** asynchronous motor, variable periodic load, interharmonics, higher harmonics, modeling, active filter.

*Электротехника, 2022, №6, стр.45-51*

### **Эффективность активного фильтро-компенсирующего устройства на судне с электродвижением**

**ЖИЛЕНКОВ А.А., МОИСЕЕВ И.С., СЕРЕБРЯКОВ М.Ю.**

Исследуется эффективность применения активных фильтро-компенсирующих устройств в составе автономных электроэнергетических систем для повышения качества электроэнергии. Большинство таких автономных систем имеют в своём составе преимущественно преобразовательную нагрузку, существенно влияющую на качество электроэнергии в сети. Рассматривается электроэнергетическая система судна с электродвижением, где гребные электродвигатели питаются от сети переменного тока через тиристорные преобразователи. Предложена топология активного фильтро-компенсирующего устройства, позволяющая повысить его эффективность при работе в

рассматриваемой системе. Рассмотрены подходы к повышению эффективности использования фильтрокомпенсирующего устройства за счёт адаптивного управления.

**Ключевые слова:** автономные энергосистемы, качество электроэнергии, гармонический состав, активный фильтр, коэффициент мощности.

Effectiveness of the use of active filter-compensating devices as part of autonomous electric power systems to improve the quality of electricity is investigated. Most of these autonomous systems have mainly a conversion load in their composition, which significantly affects the quality of electricity in the network. The electric power system of a vessel with electric propulsion is considered, where the rowing electric motors are powered from an alternating current network through thyristor converters. The topology of an active filter-compensating device is proposed, which makes it possible to increase its efficiency when working in the system under consideration. Approaches to increasing the efficiency of using a filter-compensating device due to adaptive control are considered.

**Key words:** autonomous power systems, power quality, harmonic composition, active filter, power factor.

*Электротехника, 2022, №6, стр.51-55*

### **Идентификация гармонического состава токов и напряжений в автономной энергосистеме при нестабильной частоте тока**

ПОДЕЛЕНЮК П.П., ЧЕРНЫЙ С.Г., КАЙНОВА Т.Д., ЖИЛЕНКОВ А.А.

В статье рассматривается метод и основанная на нём система наблюдения в режиме реального времени параметров гармоник сигнала, частота которого не является стационарной. Такая система актуальна, например, для задач идентификации гармонического состава сложного сигнала. Она востребована при применении активных фильтров для подавления высших гармоник или компенсаторов для компенсации сдвига фаз между основными гармониками напряжения и тока в автономной электроэнергетической системе, когда системе управления активным фильтром или компенсатором требуется задание опорных сигналов, определяющих подавляемые составляющие гармонического сигнала. Предложен вариант получения таких опорных сигналов в условиях существенной нестабильности частоты тока в сети.

**Ключевые слова:** идентификация нестационарных сигналов, гармонический состав, параметры гармонического сигнала.

Article discusses the method and the system based on it for monitoring in real time the parameters of the harmonics of a signal whose frequency is not stationary. Such a system is relevant, for example, for the identification of the harmonic composition of a complex signal. It is in demand when using active filters to suppress higher harmonics or compensators to compensate for the phase shift between the main harmonics of voltage and current in an autonomous electric power system, when the control system of an active filter or compensator requires setting reference signals that determine the suppressed components of the harmonic signal. A variant of obtaining such reference signals under conditions of significant instability of the current frequency in the network is proposed.

**Key words:** identification of non-stationary signals, harmonic composition, harmonic signal parameters.

*Электротехника, 2022, №6, стр.56-60*

### **Система поддержки принятия решений для эффективного управления активным фильтром в сети с преобразовательной нагрузкой**

ВОРОНОВА А.В., ЖИЛЕНКОВ А.А., ДЕМИДОВА К.А.

В статье исследуется подход к формализации задачи поддержки принятия решений для оптимального управления активным фильтро-компенсирующим устройством, работающим в составе автономной электроэнергетической системе, основная мощность в которой потребляется преобразовательной нагрузкой. Для повышения эффективности системы улучшения показателей качества электроэнергии предложено вводить условие максимизации использования установленной мощности устройства при обеспечении оптимальных показателей качества. Дана математическая постановка задачи управления и разрабатываются методы и алгоритм многокритериальной оптимизации для её решения. Для реализации интеллектуальной системы поддержки принятия решений предложено использовать аппарат нечётких множеств.

**Ключевые слова:** автономные энергосистемы, качество электроэнергии, гармонический состав, активный фильтр, коэффициент мощности, многокритериальная оптимизация.

The article explores an approach to formalizing the problem of decision support for optimal control of an active filter-compensating device operating as part of an autonomous electric power system, the main power in which is consumed by a converter load. To increase the efficiency of the system for improving the quality of electricity, it is proposed to introduce a condition for maximizing the use of the installed capacity of the device while ensuring optimal quality indicators. The mathematical formulation of the control problem is given and the methods and algorithm of multi-criteria optimization for its solution are developed. To implement an intelligent decision support system, it is proposed to use the fuzzy sets apparatus.

**Key words:** autonomous power systems, power quality, harmonic composition, active filter, power factor, multi-criteria optimization.

*Электротехника, 2022, №6, стр.61-64*

### **Моделирование работы трехфазного твердотельного трансформатора при изменении нагрузки**

ЦАРЕВА П.Е., АВДЕЕВ Б.А., МАРКОВКИНА Н.Н., ЕПИФАНЦЕВ И.Р., ЖИЛЕНКОВ А.А.

Рассматривается работа трехфазного трехступенчатого твердотельного трансформатора при изменении нагрузки. Приведена принципиальная схема трансформатора, описаны принцип его работы и область применения. Рассмотрены системы управления каждого блока, позволяющие изменять режимы работы. Входной инвертор позволяет регулировать напряжение первой вставки постоянного тока и повышать коэффициент мощности; двойной активный мост регулирует напряжение на второй вставке; выходной инвертор контролирует амплитуду, частоту и фазы выходного трехфазного напряжения. В пакете MATLAB Simulink выполнено численное моделирование режимов трансформатора. Приведены осциллограммы тока и напряжения, подтверждающие правильность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** твердотельный трансформатор, система управления, двойной активный мост, инвертор, выпрямитель.

The operation of a three-phase three-stage solid-state transformer is considered when the load changes. The schematic diagram of the transformer is given, the principle of its operation and the scope of application are described. The control systems of each unit are considered, which allow changing the operating modes. The input inverter allows you to adjust the voltage of the first DC insert and increase the power factor; the double active bridge regulates the voltage at the second insert; the output inverter controls the amplitude, frequency and phases of the output three-phase voltage. Numerical simulation of transformer modes is performed in the MATLAB Simulink package. The current and voltage waveforms confirming the correctness of the proposed approach are presented.

**Key words:** solid-state transformer, control system, double active bridge, inverter, rectifier.

*Электротехника, 2022, №6, стр.65-70*

### **Экспериментальное и численное исследование потерь в ВТСП катушках переменного тока**

ЗАНЕГИН С.Ю., ЗУБКО В.В., ИВАНОВ Н.С., КОВАЛЕВ К.Л., ПОДГУЗОВ В.А.

Выполнены исследования потерь электрических машин переменного тока с катушками, изготовленными на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения. Экспериментальные исследования потерь мощности (потерь) проводились на одиночной ВТСП катушке, затем на собранной магнитной системе из нескольких катушек с общим магнитопроводом, представляющим собой кольцевую обмотку статора электрической машины. Далее потери исследовались с ротором, установленным внутри статора. В этом случае каждая ВТСП катушка находится во внешнем магнитном поле, при этом ротор в одном эксперименте статичен, а в другом - приводится в движение внешним электродвигателем, то есть испытательный стенд работает в генераторном режиме. Во всех экспериментах ток был чисто синусоидальным (и незначительно искажен третьей гармоникой в генераторном режиме). Численное исследование потерь методом конечных элементов проводилось в стопке ВТСП лент при протекании в ней переменного тока в присутствии внешнего как переменного, так и постоянного магнитного поля. Наличие такой модели важно для лучшего прогнозирования потерь на переменном токе в ВТСП устройствах. Выполнено качественное сравнение результатов измерений и моделирования потерь для некоторых режимов работы при чисто синусоидальном токе.

**Ключевые слова:** электрическая машина, ВТСП обмотка, потери на переменном токе, метод измерения потерь, моделирование переменного тока.

Studies of power losses of alternating current electric machines with coils made on the basis of high-temperature superconductors (HTS) of the second generation have been carried out. Experimental studies of AC losses were carried out on a single HTS coil, then on an assembled magnetic system of several coils with a common magnetic core, which is an annular stator winding of an electric machine. Further, AC losses were investigated with a rotor mounted inside the stator. In this case, each HTS coil is located in an external magnetic field, while the rotor is static in one experiment, and in the other it is driven by an external electric motor, that is, the test bench operates in generator mode. In all experiments, the current was purely sinusoidal (and slightly distorted by the third harmonic in the generator mode). Numerical investigation of AC losses by the finite element method was carried out in a stack of HTS tapes when alternating current flows in it in the presence of external both alternating and permanent magnetic fields. The presence of such a model is important for better forecasting of AC losses in HTS devices. A qualitative comparison of the results of measurements and modeling of AC losses for some operating modes with a purely sinusoidal current is performed.

**Key words:** AC electric machine, HTS winding, AC loss, AC loss measurement method, AC loss modeling.

*Электротехника, 2022, №6, стр.71-72*

**Авторы номера**