

**Несимметричные режимы в многофазных двигателях и приводах**

ТОМАСОВ В.С., УСОЛЬЦЕВ А.А., МОРАВЕЦ М., ЩЕПАНКОВСКИЙ П.,  
СТШЕЛЕЦКИЙ Р.

Методом симметричных составляющих исследовано влияние асимметрии питания и/или двигателя на распределение нагрузки фаз и пульсации электромагнитного момента в многофазном приводе. При этом показано, что наличие асимметрии вызывает отображение всех гармоник питающего напряжения на все плоскости симметричных составляющих и исключает возможность независимого управления гармониками. На динамической модели пятифазного асинхронного короткозамкнутого двигателя показано, что даже незначительная фазовая или амплитудная асимметрия вызывает асимметрию нагрузки фаз и пульсации электромагнитного момента, уровень которых исключает возможность длительной работы двигателя в таком режиме и требует применения систем управления, обеспечивающих симметрирование нагрузки сохранных фаз.

**Ключевые слова:** многофазные двигатели, многофазные приводы, асимметрия питания, асимметрия двигателя, пульсации момента, распределение нагрузки фаз.

The effect of power supply and/or motor asymmetry on phase load distribution and electromagnetic torque ripple in a multiphase drive is studied using the method of symmetrical components. It is shown that the presence of asymmetry causes the mapping of all harmonics of the supply voltage on all planes of the symmetrical components and excludes the possibility of independent control of harmonics. The dynamic model of a five-phase asynchronous squirrel-cage motor shows that even a small phase or amplitude asymmetry causes asymmetry of the phase load and ripple of the electromagnetic moment, the value of which excludes the possibility of long-term operation of the motor in this mode and requires the use of control systems that ensure the symmetry of the intact phases load.

**Key words:** multiphase motors, multiphase drives, power supply asymmetry, motor asymmetry, torque ripple, phase load distribution.

**Условие баланса энергии и расчет эквивалентного коэффициента заполнения в трехфазном инверторе напряжения с мягкой коммутацией**

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А., РОЗАНОВ Ю.К.

Рассмотрена работа трехфазного инвертора напряжения и составляющих его блоков в режиме мягкой коммутации. Показано, что энергия, потребляемая нагрузкой, зависит не только от длительности открытого состояния основных ключей инвертора, но и от длительности работы его вспомогательных транзисторов, а также от количества запасаемой энергии в резонансной цепи. Определены условия баланса между потребляемой от источника и потребляемой нагрузкой энергии. Показано, что по результатам расчета основных составляющих баланса энергии можно в аналитической форме определить эквивалентный коэффициент заполнения. С учетом эквивалентного коэффициента заполнения в синхронной системе координат построена непрерывная математическая модель трехфазного инвертора напряжения с мягкой коммутацией, представленная также в виде эквивалентной электрической цепи. Расчет этой цепи показывает, что баланс энергии, потребляемой от источника питания и поступающей в нагрузку, справедлив не только для инвертора напряжения в целом, но и для его основных узлов. Уравнения математической модели позволяют разрабатывать системы управления инвертором с контуром регулирования по току, а также многоконтурные системы подчиненного регулирования. Решения уравнений математической модели на постоянном токе и в частотной области определяют динамику и устойчивость процесса управления.

**Ключевые слова:** инвертор напряжения, баланс энергии, коэффициент заполнения, мягкая коммутация, резонансный контур.

The paper considers the main stages of operation of a three-phase voltage source inverter and its constituent parts in the soft switching mode. It has been shown that the power transmitted to the load depends not only on the duration of the open state of the main switches of the inverter, but also on the duration of the operation of its auxiliary transistors, as well as on the amount of stored energy in the resonant circuit. The conditions for the fulfillment of the balance between the power consumed from the source and the power transmitted to the load have been determined. The article shows that according to the results of calculating the components of the power balance at individual intervals of operation, it is possible to determine the equivalent duty ratio for the power switches of the inverter in analytical form. Taking into account the equivalent duty ratio in the synchronous coordinate system, a continuous mathematical model of a three-phase voltage inverter with soft switching has been built and also presented in the form of an equivalent electrical circuit. The calculation of the equivalent electrical circuit shows that the balance of power consumed from the power source and the power supplied to the load is true not

only for the voltage inverter as a whole, but also for its main nodes. The equations of the mathematical model make it possible to develop inverter control systems with a current control loop, as well as multi-loop systems of subordinate control. The solutions of the equations of the mathematical model at direct current and in frequency range determine the dynamics and stability of the control process.

**Key words:** voltage source inverter, power balance, duty ratio, soft switching, resonant tank.

*Электротехника, 2021, №7, стр.21-27*

### **Моделирование тепловых процессов в многокристальных микросхемах вида «корпус-на-корпусе»**

БЕЛЯЕВ М.А., ПУТРОЛАЙНЕН В.В., СЕРЕДОВ П.Н., ЛУНЬКОВ П.В.

Представлены результаты моделирования распределения температуры в микросхеме вида «корпус-на-корпусе». Микросхема будет использоваться в качестве управляющего контроллера распределенной системы сбора и многопараметрического анализа информации. Корпус микросхемы состоит из двух вертикально соединенных подложек с кристаллами памяти и процессора. На основе анализа конструкции микросхемы показаны особенности теплового режима её работы, который обуславливается местом размещения и способом монтажа основного источника тепловыделения – процессора. Для определения температур кристаллов при работе в стационарном режиме была создана трехмерная численная модель, состоящая из корпуса микросхемы, печатной платы системы и верхнего радиатора. Предложены варианты упрощения модели за счёт использования эффективных значений коэффициентов теплопроводности. Выявлены ключевые параметры модели, которые сильнее всего влияют на температуру кристаллов – уровни заполнения меди в печатной плате системы и в нижней подложке микросхемы, а также количество переходных отверстий в области монтажа процессора. Исследованы зависимости температур кристаллов от этих параметров в стационарном режиме при суммарном тепловыделении 7,8 Вт. Найдены оптимальные значения параметров, позволяющие значительно снизить температуру кристаллов. Полученные результаты могут быть полезны при разработке многокристальных микросхем с вертикальной интеграцией кристаллов.

**Ключевые слова:** интегральная микросхема, моделирование тепловых процессов, многокристальное корпусирование, корпус-на-корпусе.

The results of modeling the temperature distribution in a "case-on-case" chip are presented. The chip will be used as a control controller of a distributed system for collecting and multiparametric analysis of information. The chip body consists of two vertically connected substrates with memory and processor crystals. Based on the analysis of the chip design, the features of the thermal mode of its operation are shown, which is determined by the location and installation method of the main heat source-the processor. To determine the temperature of the crystals when working in stationary mode, a three-dimensional numerical model was created, consisting of the chip body, the printed circuit board of the system and the upper radiator. Options for simplifying the model by using the effective values of the thermal conductivity coefficients are proposed. The key parameters of the model that most strongly affect the temperature of the crystals are identified – the levels of copper filling in the printed circuit board of the system and in the lower substrate of the chip, as well as the number of transition holes in the mounting area of the processor. The dependences of the crystal temperatures on these parameters in the stationary mode with a total heat output of 7.8 W are studied. The optimal values of the parameters that allow to significantly reduce the temperature of the crystals are found. The results obtained can be useful in the development of multi-chip chips with vertical integration of crystals.

**Key words:** integrated circuit, simulation of thermal processes, multi-chip enclosure, case-on-case.

*Электротехника, 2021, №7, стр.28-32*

### **Микропроцессорная токовая защита на основе четырехмерного представления режимных параметров**

КИСЕЛЕВ Д.Н., ЕРШОВ Ю.А.

Предложен алгоритм измерительного органа токовой защиты, основанного на четырехмерном представлении сигнала для случаев, когда сигнал на входе может быть представлен суммой комплексных амплитуд с комплексными частотами. По сравнению с существующими итерационными алгоритмами предлагаемый алгоритм имеет более широкую область применения и может быть использован для анализа результатов работы упрощенных детерминированных математических и физических моделей ЭЭС.

**Ключевые слова:** энергосистема, цифровая релейная защита, короткие замыкания, измерительные органы защиты, итерационные алгоритмы.

The algorithm of the current protection measuring device based on the four-dimensional representation of the signal is proposed for cases when the input signal can be represented by the sum of complex amplitudes with complex frequencies. In comparison with the existing iterative algorithms, the proposed algorithm has a wider scope of application and can be used to analyze the results of simplified deterministic mathematical and physical models of power systems.

**Key words:** power system, digital relay protection, short circuits, measuring protection devices, iterative algorithms.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 33-37*

### **Исследование возмущающих факторов, действующих на систему электроснабжения предприятия при эксплуатации**

АТАНОВ И.В., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ГАБРИЕЛЯН Ш.Ж., ШЕМЯКИН В.Н.

В статье в теоретико-вероятностной форме рассматриваются два основных фактора, действующих на систему электроснабжения предприятия – изменение нагрузки потребителей и помехи, поступающие из внешней сети электроснабжения. Изменение напряжения питающей сети рассматривается как случайный процесс. Приводится аналитический аппарат для описания изменений напряжения. На основе теории выбросов получены формулы для среднего числа выбросов и среднего времени пребывания напряжения за пределами установленных допусков. Дан пример расчета таких показателей. Указаны недостатки детерминированного подхода при оценке суммарного электропотребления предприятия. Дана оценка характерных режимов функционирования сельскохозяйственного предприятия. Приведен алгоритм расчета суммарного электропотребления при использовании вероятностного подхода к оценке мощности отдельных потребителей.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, суммарное электропотребление, качество напряжения, помехи, нагрузка, случайный процесс, выбросы напряжения.

In the article, two main factors acting on the power supply system of an enterprise are considered in a probability-theoretic form – interference coming from the external power supply network and changes in the load of consumers. The supply voltage is considered as a random process. An analytical apparatus for describing voltage changes is provided. Using the theory of outliers, formulas for the average number of outliers and the average residence time of the voltage outside

the established tolerances are obtained. There is an example of calculating such indicators. The disadvantages of the deterministic approach in assessing the total power consumption of the enterprise are indicated. The characteristic modes of functioning of an agricultural enterprise are evaluated. An algorithm for calculating the total power consumption using a probabilistic approach to estimating the power of individual consumers is presented.

**Key words:** power supply system, total power consumption, voltage quality, interference, load, random process, voltage outliers.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 38-43*

**Малозыряющий стабилизатор напряжения постоянного тока на базе источника опорного напряжения широкого применения**

БОНДАРЬ С.Н., ВАХТИНА Е.А., МИШУКОВ С.В., КОНСТАНТИНОВА Е.Е.

Развитие цифровых технологий, находящих широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве, предъявляет повышенные требования к источникам стабилизированного напряжения по целому ряду параметров, каждый из которых по-своему важен. Однако дальнейшее повышение разрешающей способности аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, а значит, и всей цифровой обработки сигналов, невозможно без улучшения таких качественных показателей источников стабилизированного напряжения как коэффициент стабилизации и уровень шума. В статье рассмотрен способ и схемное решение построения малозыряющего источника стабилизированного напряжения постоянного тока на базе источника опорного напряжения широкого применения. Предложенное решение обеспечивает понижение уровня выходного шума стабилизатора напряжения до уровня, незначительно превышающего уровень собственных шумов лучших образцов источников опорного напряжения, при одновременном повышении устойчивости системы автоматического регулирования (стабильности выходного напряжения компенсационного стабилизатора).

**Ключевые слова:** стабилизатор напряжения, источник опорного напряжения, шумовая составляющая, уровень шума, коэффициент стабилизации.

The development of digital technologies, which are widely used in industry and agriculture, places increased demands on sources of stabilized voltage for a number of parameters, each of which is important in its own way. However, a further increase in the resolution of analog-to-

digital and digital-to-analog converters, and hence the entire digital signal processing, is impossible without improving such quality indicators of stabilized voltage sources as the stabilization coefficient and noise level. The article describes a method and a circuit solution for constructing a low-noise source of stabilized DC voltage based on a widely used reference voltage source. The proposed solution reduces the output noise level of the voltage stabilizer to a level slightly higher than the natural noise level of the best samples of reference voltage sources, while increasing the stability of the automatic control system (the stability of the output voltage of the compensation stabilizer).

**Key words:** voltage regulator, reference voltage source, noise component, noise level, stabilization factor.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 43-47*

**О реализации дополнительных функций установок для испытания силовых полупроводниковых приборов импульсным током**

АНИКУЕВ С.В., КОСТЮКОВА Е.И., НИКИТЕНКО Г.В., ШАРИПОВ И.К.

Предложено теоретическое обоснование конструктивных решений ряда дополнительных функций установки для испытаний силовых полупроводниковых приборов: проверки электромагнитной совместимости элементов установки, прохождения ударного тока через прибор, обеспечения безопасности проведения испытаний. Дана оценка механизма возникновения кондуктивных помех в испытательном комплексе и минимизации периодической составляющей напряжения методом пакетной модуляции. Отмечены возможные отрицательные стороны тестового контроля силовых полупроводниковых приборов. При оценке безопасности испытаний учтены такие важные факторы, как импульсный характер ударного тока и напряжения и малая их продолжительность. Для ограничения количества периодов синусоидального напряжения рекомендуется использовать метод пакетной модуляции.

**Ключевые слова:** силовые полупроводниковые приборы, испытательная установка, дополнительные функции, помехозащищённость, ударный ток, безопасность испытаний.

A theoretical justification of the design solutions for a number of additional functions of the installation for testing power semiconductor devices is proposed: checking the electromagnetic compatibility of the installation elements, passing shock current through the device, and ensuring

the safety of testing. The evaluation of the mechanism of the occurrence of conductive interference in the test complex and the minimization of the periodic component of the voltage by the method of packet modulation is given. Possible negative aspects of the test control of power semiconductor devices are noted. When evaluating the safety of tests, such important factors as the pulsed nature of the shock current and voltage and their short duration are taken into account. To limit the number of periods of sinusoidal voltage, it is recommended to use the packet modulation method.

**Key words:** power semiconductor devices, test facility, additional functions, noise immunity, shock current, test safety.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 47-51*

**О целесообразности использования силового трансформатора традиционной конструкции для получения ударного тока большой величины**

ЕФАНОВ А.В., АТАНОВ И.В., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ЯРОШ В.А.

Выполнена оценка возможности использования обычного силового трансформатора для получения испытательных импульсов ударного тока большой величины, необходимых при проверке силовых полупроводниковых приборов. Сформирована электрическая цепь, приведен аналитический аппарат оценки переходных процессов в такой цепи. Сделан вывод о возможности снижения потребляемой мощности трансформатора традиционной конструкции в два раза при использовании его для получения импульсных токов большой величины. Указано направление дальнейших исследований, связанное с применением силовых трансформаторов специальной конструкции.

**Ключевые слова:** испытание полупроводниковых приборов, силовой трансформатор, импульс тока, переходной процесс.

The possibility of using a conventional power transformer to obtain high-magnitude shock current test pulses required for testing power semiconductor devices is evaluated. An electrical circuit is formed, and an analytical apparatus for evaluating transients in such a circuit is presented. It is concluded that it is possible to reduce the power consumption of a transformer of traditional design by two times when using it to obtain pulse currents of large magnitude. The direction of further research related to the use of power transformers of special design is



indicated.

**Key words:** testing of semiconductor devices, power transformer, current pulse, transient process.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 51-55*

**Способ управления устройством компенсации реактивной мощности в режиме реального времени при нестационарных нелинейных нагрузках**

ВОРОТНИКОВ И.Н., МАСТЕПАНЕНКО М.А., ГАБРИЕЛЯН Ш.Ж., ШУНИНА А.А.

В статье рассмотрен способ управления устройством компенсации реактивной мощности в режиме реального времени при нестационарных нелинейных нагрузках с вычислением прогнозируемого значения активной мощности на предстоящих периодах. Приведены отличительные характеристики предлагаемого способа управления компенсатором от известных решений.

**Ключевые слова:** устройство компенсации реактивной мощности, нестационарная нелинейная нагрузка, режим реального времени, составляющие мгновенной мощности.

The article describes a method for controlling the reactive power compensation device in real time under non-stationary nonlinear loads with the calculation of the predicted value of the active power for the upcoming periods. The distinctive characteristics of the proposed method of controlling the compensator from the known solutions are given.

**Key words:** reactive power compensation device, non-stationary nonlinear load, real-time mode, instantaneous power components.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 55-58*

**О возможности формирования импульса ударного тока для испытаний силовых полупроводниковых приборов с использованием электрической сети переменного тока**

ШЕМЯКИН В.Н., МАСТЕПАНЕНКО М.А., ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ЕФАНОВ А.В.,  
ВОРОТНИКОВ И.Н.

Показана возможность использования сети переменного тока для получения

электрических импульсов тока большой величины, применяемых при испытаниях силовых полупроводниковых приборов. Отмечены недостатки применяемых в настоящее время испытательных установок на базе конденсаторов. Предложено конструктивное решение секционирования вторичной обмотки трансформатора путем расщепления ее многопроволочного исполнения на отдельные пучки.

**Ключевые слова:** силовой полупроводниковый прибор, силовой трансформатор, испытания, импульс тока.

The possibility of using an alternating current network to obtain high-magnitude electrical current pulses used in testing power semi-conductor devices is shown. The disadvantages of the current capacitor-based test facilities are noted. A design solution for partitioning the secondary winding of a transformer by splitting its multi-wire execution into separate bundles is proposed.

**Key words:** power semiconductor device, power transformer, tests, current pulse.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 59-62*

**Математическое описание переходных процессов в преобразователях и стабилизаторах напряжения систем автономного электроснабжения**  
ХОРОЛЬСКИЙ В.Я., ЕФАНОВ А.В., АНТОНОВ С.Н., ПРИВАЛОВ Е.Е.

Приведено математическое описание переходных процессов в преобразователях и стабилизаторах напряжения систем автономного электроснабжения при коммутации нагрузки и изменении питающего напряжения. Рассматриваются нерегулируемые и регулируемые выпрямители, а также стабилизаторы напряжения. Используется аппарат теории линейных функций; выпрямители идентифицированы колебательным звеном. Приведены необходимый аппарат для расчета нулевого и усредненного значений переходной функции, а также ее первой производной для нерегулируемого выпрямителя. Приведены формулы для определения максимального выброса напряжения и времени переходного процесса. Моделирование регулируемого выпрямителя выполнено с учетом наличия пропорционального регулятора, который позволяет существенно уменьшить статическую нестабильность выходного напряжения. Стабилизатор линейного типа рассматривается как регулируемый объект, описываемый дифференциальным уравнением первого порядка. Получены формулы для анализа динамических режимов таких устройств.

**Ключевые слова:** преобразователь, выпрямитель, стабилизатор напряжения, колебательное звено, дифференциальное уравнение, переходная функция.

The mathematical description of transients in converters and voltage stabilizers of autonomous power supply systems during load switching and supply voltage changes is given. Unregulated and regulated rectifiers, as well as voltage regulators, are considered. The apparatus of the theory of linear functions is used; the rectifiers are identified by the oscillatory link. The necessary apparatus for calculating the zero and average values of the transition function, as well as its first derivative for an unregulated rectifier, is given. The formulas for determining the maximum voltage release and the time of the transient process are given. The simulation of the regulated rectifier is performed taking into account the presence of a proportional regulator, which allows to significantly reduce the static instability of the output voltage. A linear stabilizer is considered as a modifiable object described by a first-order differential equation. Formulas for the analysis of the dynamic modes of such devices are obtained.

**Key words:** converter, rectifier, voltage stabilizer, oscillating link, differential equation, transition function.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 63-73*

**Метод и программно-аппаратные комплексы локационного мониторинга гололедообразования и повреждений на проводах воздушных линий электропередачи**

МИНУЛЛИН Р.Г., КАСИМОВ В.А., ЛУКИН Э.И.

Описываются метод локационной диагностики гололедообразования и повреждений на проводах действующих воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 35–330 кВ и соответствующие программно-аппаратные комплексы. Анализируются результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей многоканального локационного зондирования ЛЭП, выполненных в течение 25 лет (1995–2020 гг.) на шести подстанциях России с регистрацией более 3 млн рефлектограмм. Обсуждаются реализованные способы выделения локационных сигналов на фоне сигналов технологической связи с обеспечением их электромагнитной совместимости. Рассматриваются методики контроля толщины стенки гололедных отложений и контроля их плавки по измерениям уровней затухания и запаздывания отраженных сигналов. Приводятся экспериментально проверенные

имитационные модели изменения параметров отраженных импульсов при появлении повреждений (коротких замыканий, обрывов) и гололедных отложений на проводах ЛЭП. Обсуждаются вариации параметров отраженных сигналов, зарегистрированных на протяжении 10 лет (2009–2019 гг.) на непрерывно контролируемых ЛЭП. Описываются технические параметры и принципы работы реализованных локационных комплексов и способы визуализации результатов измерений. Отмечается, что исследования и аппаратные разработки не имеют мировых аналогов и что последние варианты комплексов представлены в промышленном исполнении и подготовлены к тиражированию с выходом на рынки России и зарубежья.

**Ключевые слова:** воздушные линии электропередачи, повреждения, гололедообразование, мониторинг, локационный метод, программно-аппаратный комплекс.

The developed method for location-based monitoring of icing and damage on the wires of operating overhead power transmission lines (OPL) with a voltage of 35–330 kV and the corresponding hardware and software systems are described. The results of theoretical and experimental studies of the features of multi-channel location-based sounding of power transmission lines, performed for 25 years (1995–2020) at 6 substations in Russia with the registration of 3 mln reflectograms, are considered. The methods of isolating location signals against the background of technological communication signals with ensuring their electromagnetic compatibility are discussed. Techniques for monitoring the wall thickness of ice deposits and controlling their smelting by measuring the attenuation and delay of the reflected signals are considered. Simulation models of changes in the parameters of the reflected signals are given upon the occurrence of short circuits, breaks and ice deposits on the wires of power lines. The daily-annual variations in the parameters of the reflected signals recorded over 10 years (2009–2019) on continuously controlled power lines are discussed. The principles of operation of location systems and methods for visualizing measurement results are described. It is noted that research and hardware developments have no world analogues and that the latest versions of the complexes are presented in industrial design and prepared for replication with access to the markets of Russia and abroad.

**Key words:** overhead power lines, breakage, icing, monitoring, location method, hardware-software complex.

*Электротехника, 2021, №7, стр. 74-75*

**Авторы номера**