

## **Линейное оценивание состояния методом контрольных уравнений для локальных систем мониторинга переходных режимов**

КОЛОСОК И.Н., КОРКИНА Е.С., БУЧИНСКИЙ Е.А.

Появление нового поколения приборов для синхронизированных измерений векторных электрических величин (напряжений и токов в линиях) позволяют реализовать линейные алгоритмы ОС. Предлагается развитие метода контрольных уравнений для линейного ОС объектов ЭЭС, наблюдаемых по данным синхронизированных векторных измерений (СВИ). Представлены новые алгоритмы формирования контрольных уравнений по данным СВИ, построенные на исключении неизмеренных переменных или компонент вектора состояния из уравнений электрических цепей, записанных в прямоугольных координатах. В силу линейности этих уравнений полученные контрольные уравнения также линейны. Представлены алгоритмы обнаружения грубых ошибок в СВИ, а также алгоритмы расчета оценок с использованием линейных контрольных уравнений, которые позволяют получить решение за одну итерацию. Работоспособность алгоритмов проверена на тестовой схеме, наблюдаемой по измерениям синхронизированных векторных величин. Разработанные алгоритмы дают возможность выполнять локальное ОС отдельных объектов энергосистем (электрических станций, подстанций, районов электрической сети), наблюдаемых по СВИ, в «темпе процесса».

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, оценивание состояния, синхронизированные векторные измерения, метод контрольных уравнений, линейные алгоритмы

With the advent of a new generation of instruments for synchronized measurements of vector electrical quantities (voltages and currents in power lines) it has become possible to implement linear state estimation algorithms. A further development of the method of control equations is proposed for linear estimation of state of electric power system components observed based on the data of synchronized vector measurements (SVMs). New algorithms for forming the control equations based on the SVM data are proposed, which are constructed by eliminating the nonmeasured variables or components of the state vector from the equations of electric circuits written in the Cartesian system of coordinates. In view of the linear nature of these equations, the obtained control equations are also linear. Algorithms for revealing gross errors in SVMs are presented together with estimate calculation algorithms with the use of linear control equations that allow a solution to be obtained within a single iteration. The serviceability of the developed algorithms is checked on a test configuration observed by measurements of synchronized vector quantities. The developed algorithms open the possibility to perform local state estimation of individual power system components (power stations, substations, and electric network areas) observed by SVMs in the online mode.

**Key words:** electric power system, state estimation, synchronized vector measurements, method of control equations, linear algorithms

## **Определение расчетных состояний системы электроснабжения для анализа показателей надежности**

ВАНИН А.С.

Рассмотрены различные аспекты надежности сложной системы электроснабжения, модели ее состояний и способы повышения их расчетной эффективности. Показатели надежности представляют собой комплексную характеристику СЭС и являются следствием влияния многих факторов, которые можно объединить в группы. Структура сети и коммутационные устройства с учетом их параметров определяют структурную надежность системы электроснабжения. Пропускная способность элементов, мощность и диапазоны регулирования источников электроэнергии, компенсирующих и регулирующих устройств определяют функциональную или режимную надежность системы электроснабжения. Настройка релейной защиты, быстродействие выключателей, динамические характеристики генераторов и электроприемников определяют динамическую составляющую надежности системы электроснабжения. Такое разделение влияющих факторов позволяет свести вычисление показателей надежности системы электроснабжения к трем типам расчетов. Для каждой из составляющих показателей надежности показана необходимость предварительного выделения анализируемых состояний и представлены формальные методы их поиска. Приведенные методы анализа состояний построены на едином вычислительном подходе, который основан на использовании обобщенных параметров сети.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, режим, надежность, обобщенные параметры

Various aspects concerned with reliability of a complex power supply system, the models of its states, and methods for improving their calculation efficiency are considered. The reliability indicators represent a comprehensive characteristic of the power supply system and are the consequence from the effect of many factors, such as network structure, transmission capacity of its elements, capacity and adjustment ranges of power sources and compensating elements; the availability, logic, and actuation time of relay protection and emergency control systems; reliability indicators of individual network components, availability of operative personnel and accessibility of network components for maintenance; characteristics of power consumers and the requirements they impose on the power supply quality, and a number of other factors.

**Key words:** electric network, operating mode, reliability, generalized parameters

## **Эффективность критериев целесообразности классификации статистических данных об отказе электрооборудования**

ФАРХАДЗАДЕ Э.М., ФАРЗАЛИЕВ Ю.З., МУРАДАЛИЕВ А.З.

Проблема достоверной оценки показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств ЭЭС относится к одной из наиболее важных, поскольку позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты путем перехода при сопоставлении

вариантов от качественных методов учета надежности к количественным значениям. Достоверная оценка предполагает неслучайный характер расхождения усредненных значений показателей надежности от оценок показателей индивидуальной надежности, вычисленных путем классификации статистических данных по заданным разновидностям признаков. Основная трудность заключается именно в оценке достоверности их расхождения. Характер расхождения может быть установлен путем применения непараметрических критериев проверки исходного предположения. В основе критериев находятся статистики случайных величин вертикального расхождения статистической функции распределения множества исходной совокупности данных и статистической функции распределения выборки данных из этого множества. Непараметрические критерии устранения зависимости результатов сопоставления от функции распределения исходной совокупности данных создают определенные трудности при сравнении их эффективности. Показано, что достоверная оценка имеет место при использовании критерия, статистике которого по экспериментальным данным соответствует наименьшее значение ошибки первого рода.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, оборудование, надежность, достоверная оценка, критерии

The problem of making trustworthy assessment of indicators characterizing individual reliability of electric power system equipment and devices is among the most important ones because the availability of such assessment makes it possible to achieve essentially smaller operating costs by making a shift from qualitative reliability accounting methods to quantitative values in comparing different alternatives. Trustworthy assessment implies that discrepancy between the averaged values of reliability indicators and the estimates of individual reliability indicators calculated by classifying statistical data from the specified kinds of signs is nonrandom in nature. The main difficulty lies exactly in estimating the trustworthiness of their discrepancy. The nature of discrepancy can be established by applying nonparametric criteria of checking the initial assumption. The criteria are based on the statistical parameters of random quantities characterizing the vertical discrepancy between the statistical function describing the distribution of the initial set (totality) of data and the statistical function describing the distribution of sampled data from this set. The nonparametric criteria for eliminating the dependence of comparison results on the distribution function of the initial totality of data create certain difficulties in comparing their efficiency. It is shown that trustworthy assessment is obtained in using a criterion the statistical characteristic of which corresponds to the smallest first-kind error by experimental data.

**Key words:** electric power system, equipment, reliability, trustworthy assessment, criteria

**Повышение эффективности ветроэнергетического агрегата регулированием угла установки лопастей ветроколеса**

ЦГОЕВ Р. С., ПОГОСЯН А. В., ЯКОВЕНКО Г. А.

Проанализирован опыт эксплуатации ветроустановок в Калмыкии. Предложен метод повышения эффективности ветроэнергетической установки и увеличения выработки электроэнергии. Достигается это применением дополнительного регулирования угла установки каждой лопасти в отдельности за каждый оборот ветроколеса в функции положения лопасти.

**Ключевые слова:** ветроустановки, методы управления, повышение эффективности

The experience gained from operation of wind power installations in Kalmykia is analyzed. A method for achieving more efficient operation of a wind power installation and for increasing its power output is proposed. These improvements are achieved by additionally adjusting the pitch angles of each individual blade per each revolution of the windwheel as a function of blade position.

**Key words:** wind power installations, control methods, achieving more efficient operation

## **Построение размерного ряда ветрогенераторов для децентрализованной энергетики**

АНТИПОВ В.Н.

Исследованы закономерности размерного ряда синхронных машин с постоянными магнитами, применяемых в качестве ветрогенераторов в децентрализованной энергетике. Рассмотрены различные соотношения между электромагнитными нагрузками, геометрическими размерами, параметрами статорной обмотки и постоянных магнитов; выполнено сравнение с реальными проектами. Установленные в статье закономерности построения размерного ряда ветрогенераторов позволяют для одного размера диаметра статора получить девять значений мощности при трех значениях частоты вращения.

**Ключевые слова:** ветрогенераторы, синхронные машины, постоянные магниты, размерный ряд, оптимизация

Regularities pertinent to the size series of permanent-magnet synchronous machines used as wind generators in decentralized power engineering applications are investigated. Various correlations between the electromagnetic loads, geometrical sizes, and the parameters of stator winding and permanent magnets between the electromagnetic loads, geometrical sizes, and the parameters of stator winding and permanent magnets are considered, and a comparison with real designs is carried out. By using the regularities pertinent to setting up the size series of wind generators determined in the article it is possible to obtain nine values of power output for one size of stator diameter at three values of rotation frequency.

**Key words:** wind generators, synchronous machines, permanent magnets, size series, optimization

## **Сверхскоростные и ультраскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (обзор зарубежных публикаций)**

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Рассмотрены тенденции развития, достижения и проблемы в области сверхскоростных и ультраскоростных синхронных электрических машин с постоянными магнитами мощностью от 1 кВт до нескольких мегаватт с частотой вращения от 10103 до 500103 мин<sup>-1</sup>. Представлены некоторые данные синхронных машин с постоянными магнитами на основе обзора зарубежных публикаций.

**Ключевые слова:** обзор, синхронные машины, постоянные магниты, высокая и ультравысокая скорости, потери в роторе, углеволоконный бандаж, расчет нагрева, намагничивание по Халбаху, беспазовый статор, газовый турбогенератор, микротурбина, турбокомпрессор, электромеханический накопитель энергии

The development trends, achievements, and problems in the field of superhigh- and ultrahigh-speed permanent-magnet synchronous electrical machines with capacities from 1 kW to a few MW and rotation frequencies from 10103 to 500103 min<sup>-1</sup> are considered. Some data of permanent-magnet synchronous machines are presented based on a review of foreign publications.

**Key words:** review, synchronous machines, permanent magnets, high and ultrahigh speeds, rotor losses, carbon-fiber band, calculation of heating, Halbach magnetization, slotless stator, gas turbine generator, microturbine, turbine compressor, electromechanical energy storage

## **Переходные процессы в электромагнитных демпферах с распределенной вторичной системой сложной геометрии**

САТТАРОВ Р.Р., ИСМАГИЛОВ Ф.Р.

Разработана обобщенная математическая модель переходных процессов и предложен метод расчета электромагнитного момента и механических характеристик демпфера с распределенной вторичной системой сложной геометрии. Точность метода может быть повышена за счет учета высших гармоник первичного поля, сравнительно просто может быть учтен нагрев ротора. Реализованные на основе предлагаемого метода компьютерные программы могут входить в состав САПР электромеханических элементов систем управления. Предложенные модели и алгоритмы можно использовать для широкого класса электромеханических преобразователей с тонкостенным проводящим ротором – индукционных муфт, асинхронных двигателей с полым ротором, тахогенераторов.

**Ключевые слова:** электромагнитные демпферы, переходные процессы, математическая модель, электромагнитный момент, механические характеристики, расчет

A generalized mathematical model of transients is developed, and a method is proposed for calculating the electromagnetic torque and mechanical characteristics of a damper with a distributed secondary system having an intricate geometry. The accuracy of the method can be improved by taking into account higher harmonic components of the primary field, and heating of the rotor can be taken into account in a relatively simple manner. The computer programs implemented on the basis of the proposed method can be incorporated in the computer aided systems for designing the electromechanical elements of control systems. The proposed models and algorithms can be used for a wide spectrum of electromechanical converters equipped with a thin walled conducting rotor, such as induction couplers, asynchronous motors with a hollow rotor, and tachogenerators.

**Key words:** electromagnetic dampers, transients, mathematical model, electromagnetic torque, mechanical characteristics, calculation

## **Бесконтактный двигатель постоянного тока с делителем питающего напряжения**

ГРИДИН В.М.

Рассматривается бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ) с двухсекционной якорной обмоткой (ЯО), снабжённый конденсаторным делителем питающего напряжения (ДПН). Благодаря применению ДПН число силовых транзисторов коммутатора уменьшается вдвое по сравнению с БДПТ без ДПН, у которого силовых транзисторов восемь. Установлена функциональная зависимость тока, потребляемого ЯО при четырёх- и восьмитактной коммутации секций ЯО, от отношения длительности межкоммутационного интервала к произведению активного сопротивления секций ЯО и ёмкости конденсаторов ДПН. Получены выражения для требуемого значения ёмкости конденсаторов ДПН; рассмотрены особенности пуска двигателя.

**Ключевые слова:** бесконтактный двигатель постоянного тока, двухсекционная якорная обмотка, конденсаторный делитель питающего напряжения, четырёх- и восьмитактная коммутация, потребляемый ток

A contactless DC motor with a two-section armature winding (AW) and fitted with a capacitive power supply voltage divider (SVD) is considered. Owing to the use of an SVD, the number of power transistors in the switching device is halved as compared with the contactless DC motor without a SVD, which contains eight power transistors. The functional dependence of the current consumed by the AW in case of using four- and eight-cycle switching of the AW sections is established as a function of the ratio of the interval between the switching moments to the product of the resistance of AW sections and the capacitance of SVD capacitors. Expressions for determining the required capacitance of SVD capacitors are obtained that take into account the contactless DC motor nominal characteristics, and the specific features of the motor starting mode are considered. The considered contactless DC motor with a capacitive SVD can be used under the same conditions as other types of contactless DC motors (i.e., under the conditions of vibration, acceleration, shocks, vacuum, chemically corrosive medium, etc.) and can compete with contactless DC motors having a three-section AW and operating with two half-cycle switching as a more simple and reliable device.

**Key words:** contactless DC motor, two-section armature winding, capacitive power supply voltage divider, four- and eight-cycle switching, consumed current

## **Электромагнитное поле пространственного контура с током над плоской поверхностью проводящего тела с сильным скин-эффектом**

ВАСЕЦКИЙ Ю.М.

На основе сформулированной краевой задачи расчета магнитного поля тока контура произвольной конфигурации, расположенного над плоской поверхностью проводящего тела, в котором проявляется сильный скин-эффект, представлено решение в виде суперпозиции полей исходного и зеркально отраженного контуров с током. Показано, что при корректной постановке задачи, когда исходный контур является замкнутым, выполняется необходимое условие непрерывности поверхностной плотности тока. В рамках представлений о вторичных источниках сформулирована краевая задача для скалярного потенциала. Показано, что в общем случае для исходного контура пространственной конфигурации источниками электромагнитного поля, помимо тока контура и поверхностного тока, являются также электрические заряды, поверхностная плотность которых определяется нормальной к границе составляющей векторного потенциала исходного тока контура. Представлен пример расчета вторичных источников для контура пространственной конфигурации.

**Ключевые слова:** пространственный контур с током, электропроводное тело, сильный скин-эффект, источники электромагнитного поля

A boundary-value problem of calculating the magnetic field induced by current in a loop having an arbitrary configuration and placed above the flat surface of a conducting body in which a strong skin effect appears is formulated, and a solution of this problem is presented as the superposition of the fields induced by the initial loop with current and by its mirror image. It is shown that with a correctly formulated problem, in which the initial loop is a closed one, the necessary condition for continuity of the surface current density is satisfied. The boundary-value problem for a scalar potential is formulated within the framework of the concepts about secondary sources. It is shown that in the general case for the initial loop having spatial configuration, electrical charges the surface density of which is determined by the vector potential component of the initial loop current normal to the boundary are also sources of electromagnetic field apart from the loop current and surface current. An example of calculating the secondary sources for a loop with spatial configuration is given.

**Key words:** spatial loop with current, electrically conducting body, strong skin effect, sources of electromagnetic field

## **Диэлектрические потери в микролите при наличии нескольких релаксаторов**

КОСТЮКОВ Н.С., СОКОЛОВА С.М.

Статья содержит математическое описание и расчет частотного спектра диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь микролита, содержащего натрий и калий. Расчеты выполнены на основе теории вынужденных колебаний в области частот от 1 до 10<sup>14</sup> Гц. В качестве данных для расчетов и, соответственно, проверки подхода использовались известные в литературе результаты исследований. Показано, что: при понижении частоты диэлектрическая проницаемость микролита в области частот 10<sup>13</sup>–10<sup>11</sup> с<sup>-1</sup> растет в результате электронной поляризации, в области частот 10<sup>10</sup>–10<sup>8</sup> с<sup>-1</sup> – за счет поляризации ионов натрия и в незначительной степени ионов калия; диэлектрические потери в области до 10<sup>6</sup> с<sup>-1</sup> являются потерями проводимости, которые при более высоких частотах несут незначительный вклад, определяющими являются поляризационные потери за счет релаксации ионов натрия, а начиная с частоты 10<sup>10</sup> с<sup>-1</sup> – за счет электронной поляризации; вклад поляризационных потерь за счет ионов калия незначителен.

**Ключевые слова:** микролит, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, частотный спектр, расчет

A mathematical description and calculation of the frequency spectrum of dielectric permeability and the dielectric loss tangent of microlyte containing sodium and potassium are presented. The calculations are carried out using the theory of forced oscillations in the frequency band from 1 to 10<sup>14</sup> Hz. The investigation results known from the literature were used as initial data for calculations and, accordingly, for verifying the approach. It is shown that: the frequency decreases, the dielectric permeability of microlyte in the frequency band 10<sup>13</sup> – 10<sup>11</sup> s<sup>-1</sup> increases as a result of electron polarization, whereas its growth in the frequency band 10<sup>10</sup> – 10<sup>8</sup> s<sup>-1</sup> is due to polarization of sodium ions and to an insignificant extent due to polarization of potassium ions; the dielectric losses in the band up to 10<sup>6</sup> s<sup>-1</sup> are conductivity losses, which become inessential at higher frequencies; the determining effect is due to polarization losses resulting from relaxation of sodium ions, and starting from the frequency 10<sup>10</sup> s<sup>-1</sup> the determining effect is due to electron polarization, whereas the contribution of potassium ions in polarization losses is insignificant.

**Key words:** microlyte, dielectric permeability, dielectric losses, frequency spectrum, calculation