

Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения

ГУСЕНКОВ А.В., ЛЕБЕДЕВ В.Д., СОКОЛОВ А.М., ШАДРИКОВ Т.Е., СТРАХОВ А.С.

Актуальность создания и применения высоковольтных установок переменного тока с нетрадиционными параметрами токов и напряжений требует всесторонней технико-экономической оценки возможности и целесообразности использования таких устройств на практике. Практической реализации таких устройств должен предшествовать этап математического моделирования и расчета. Рассматривается методика применения частотного анализа для расчета электрических цепей с несинусоидальными переменными токами и напряжениями на примере работы высоковольтных кабельных электропередач повышенной частоты, выполненных на основе полупроводниковых преобразователей напряжения, при нормальных и аварийных режимах. Показано, что совместное использование теории комплексных чисел и разложения в ряд Фурье переменных несинусоидальных напряжений и токов представляет собой удобное и эффективное средство расчёта электрических цепей, источником питания которых является транзисторный преобразователь напряжения. В процессе циклического расчета с помощью специально разработанной программы в среде MathLab проводится построение расчетных осциллограмм напряжений и токов в заданных точках схемы с учетом различных факторов (изменение величины активных сопротивлений из-за скин-эффекта, расчет потерь в магнитопроводе и пр.). Предложен оригинальный способ учета изменения параметров транзисторов (их внутреннего сопротивления), входящих в силовой полупроводниковый преобразователь, в зависимости от частоты гармоники разложения в ряд Фурье. Выполнена экспериментальная проверка результатов вычислений.

Ключевые слова: высоковольтная кабельная электропередача, переменное напряжение, повышенная частота, полупроводниковый преобразователь напряжения, частотный анализ, преобразования Фурье

The actuality of the creation and application of high-voltage AC installations with non-traditional parameters of currents and voltages requires a comprehensive technical and economic evaluation of the possibilities and the feasibility of using these devices in practice. Mathematical modeling and calculation of such power devices is necessary condition. The technique of applying frequency analysis to the calculation of electric circuits with non-sinusoidal alternating currents and voltages of high voltage power cable high frequency, which made on the basis of semiconductor converters of the voltage. during normal and emergency modes of operation is considered. It is shown that the combined use of the theory of complex numbers and the expansion in a Fourier series variables are non-sinusoidal voltages and currents is a convenient and effective means of calculation of electric circuits, with a power transistor voltage Converter. During cyclic calculation with the help of specially designed programs in the environment of Mat Lab builds the calculated waveforms of voltages and currents at predetermined points of the circuit taking into account various factors (the change in resistance due to skin effect, the calculation of losses in the magnetic core, etc.). The original

way of accounting for changes in the parameters of transistors (their internal resistance) included in the semiconductor power Converter, depending on the frequency of the harmonic decomposition of the Fourier series, is suggested. Experimental verification of calculated results is made too.

Key words: high voltage, power cable transmission, AC voltage, increased frequency, semiconductor voltage converter, frequency analysis, fourier transform

Принцип оценивания и нормирования электромагнитной совместимости

КУРЕННЫЙ Э.Г., ДМИТРИЕВА Е.Н., ЛЮТЫЙ А.П., БУЛГАКОВ А.А.

Рассматриваются два способа учета инерционности объектов при оценивании электромагнитной совместимости (ЭМС): путем усреднения на заданном интервале квадрата реакции объекта на помеху (кумулятивный принцип) и квадратичного сглаживания (инерционный принцип). На примере оценивания температуры дополнительного нагрева от помехи ЭМС показываются принципиальные недостатки кумулятивного принципа: отсутствие физического аналога и немонотонность изменения показателя ЭМС при увеличении инерционности объекта. Для обеспечения показателям ЭМС физического смысла и адекватности оценивания негативных воздействий помех ЭМС предлагается от кумулятивного принципа перейти к инерционному принципу. Даются рекомендации по применению предлагаемого принципа в стандартах на показатели ЭМС.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, нормирование, модели, квадратичное сглаживание, квадратичное усреднение

Two methods taking into account object inertia are considered, when EMC estimation is executed. The first method is averaging of object squared reaction to interference on specified interval (cumulative principle). The second method is quadratic smoothing (inertial principle). Fundamental disadvantages of cumulative principle are lack of physical analog and nonmonotonicity of EMC index change when object inertia increases. The are shown by example estimation of additional heating when EMC interference is present. In is proposed to change cumulative principle by inertial principle for ensuring of physical sense for EMC indices and adequate estimation of negative influence of EMC interferences, Recommendations for application of inertial principle in EMC standards are given.

Key words: electromagnetic compability, normalization, models, quadratic smoothing, quadratic averaging

Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах

ЛАРИН В.С.

Рассмотрены вопросы экспериментальной оценки наибольших кратностей резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора при воздействии на обмотку низковольтного переменного напряжения и применения для этой цели измерительных систем для частотного анализа реакции обмоток (ЧАР). Представлены результаты анализа влияния измерительных цепей на отклонения по частоте и амплитуде измеряемых

напряжений, выполненные экспериментально на физической модели катушечной обмотки высокого напряжения. Показано, что для обеспечения высокой точности измерений следует использовать высокочастотные измерительные щупы с малой входной емкостью.

Ключевые слова: трансформаторы обмотки, резонансные перенапряжения, колебания обмоток, частотный анализ, измерение напряжений

In the article the questions of experimental estimation of the highest per unit resonant overvoltages in the transformer windings under low AC voltage excitation and usage for this purpose the measuring systems for frequency response analysis (FRA). The results of the analysis of the influence of measuring circuits on the frequency and amplitude deviation of measured voltages which were performed experimentally on a physical model of high voltage disc-type winding. It is shown that to provide high accuracy of measurements the high-frequency measuring probes with low input capacitance should be used.

Key words: transformers, windings, resonance overvoltages, winding oscillation, frequency analysis, voltage measurement

Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока

САВИЦКИ А., ХАЛЬТОФ М.

Разработаны спектральные и интегральные методы экспериментального определения параметров математических моделей электрической дуги. Предложено при определении параметров осуществлять питание дуги от источников тока синусоидальной/прямоугольной формы. Показано, что на основе измерений электрических величин (спектрального распределения напряжения, средних или действующих значений напряжения и мощности) можно определить параметры и характеристики моделей. Исследовано влияние возмущений длины столба на точность методов определения параметров моделей.

Ключевые слова: электрические цепи, электрическая дуга, математические модели

There have been presented developed spectral and integral experimental methods of parameters determination in chosen mathematical models of electric arc. There has been assumed electric arc source fed by current source with sinus or square wave. There have been shown that based on measurements of chosen electric quantities (voltage spectrum distribution, mean or rms values of voltage and power) it is possible to obtain parameters and characteristics of models. Effect of disturbances in column length on accuracy of determining arc models parameters have been investigated.

Key words: electrical circuits, electrical arc, mathematical model

Использование метода инверсии Келлера—Дихне для определения интегральных параметров мультиэлектродных двухмерных систем

КЛЯМКИН С.С.

Предложен новый метод расчета интегральных параметров двумерных многоэлектродных устройств, имеющих оси или плоскости симметрии (электрической проводимости, емкости и др.). Метод основан на совместном решении алгебраических уравнений для исходной и инверсной по отношению к ней систем (устройств), связанных между собой по принципу поворотной инвариантности двумерных потенциальных и соленоидальных полей. Полученные на основе метода неизвестные ранее формулы для расчета погонной электрической емкости устройств сведены в таблицу, приведенную в приложении. Метод позволил расширить область применения теоремы Томпсона—Лэмпарда (Thomson—Lampard) взаимной частичной емкости на единицу длины в системе четырех цилиндрических проводящих пластин, имеющих плоскость симметрии.

Полученные на основе теоремы Томпсона—Лэмпарда решения можно использовать для более широкого круга задач электротехники. Найденная связь между точными решениями для симметричных многоэлектродных систем и геометрическими параметрами правильных многоугольников позволяет исследовать свойства подобных систем без выполнения расчетов. Предложенный метод можно применить для расчета не только погонной емкости, но и других интегральных параметров двумерных физических систем при различных условиях симметрии и распределения характеристик сред.

Ключевые слова: многоэлектродные устройства, электрическая проводимость, емкость, двумерные физические системы, определение интегральных параметров, теорема Томпсона—Лэмпарда

A new method to calculate integral parameters for two-dimensional multi-electrode structures having symmetry axes or planes (conductivity, capacitance etc.) has been proposed. The method is based on a simultaneous solution of algebraic equations for original and inverted systems (structures) connected between them according to the principle of rotatory invariance of twodimensional potential and solenoidal fields. Then unknown formulas obtained on the basis of this method for calculation of linear capacitance of a series of systems have been compiled in table showed in the Appendix. The method makes it possible to extend the scope of application of Thompson—Lampard theorem on mutual partial capacitance per unit length in a system containing four cylindrical conducting plates with symmetry planes. New solutions found on the basis of Thompson—Lampard theorem may be used to solve a wider range of problems in electric engineering. The connection between exact solutions of symmetric multi-electrode systems and geometric parameters of regular polygons enables us to study the properties of similar systems without performing additional calculations. The method may be used for calculation of not only linear capacitance but other integral parameters of two-dimensional physical systems under different conditions of symmetry and medium features distribution.

Key words: multi-electrode structures, conductivity, capacitance, two-dimensional physical systems, calculate integral parameters, Thompson—Lampard theorem

Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем

САКОВИЧ И.А., ЧЕРЕВКО А.И., ПЛАТОНЕНКОВ С.В.

Приводятся результаты исследования классического и нового ступенчато-хордового импульсно-фазовых способов управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем. Изложен анализ геометрической аналогии круговой обмотки с десятью секциями и геометрическая интерпретация понятия ступеней регулирования, а также объяснен принцип реализации ступенчато-хордового способа управления. Приводятся аналитические выражения для расчета последовательности коммутации силовых ключей для классического и ступенчато-хордового способов управления, позволяющие выполнить их реализацию для различного числа секций круговой обмотки. Применение ступенчато-хордового способа управления позволяет начиная со второй ступени регулирования существенно улучшать качество выпрямленного напряжения по сравнению с классическим импульсно-фазовым способом, удастся расширить диапазон регулирования при заданном качестве выходного напряжения в 1,5–2 раза. Реализация ступенчато-хордового способа управления возможна при использовании как полностью, так и неполностью управляемых силовых ключей. Применение неполностью управляемых силовых ключей накладывает ограничения на реализацию ступенчато-хордового алгоритма управления, что отражается на регулировочной характеристике и зависимости коэффициента пульсаций по напряжению от среднеквадратического значения выпрямленного напряжения. Качество выпрямленного напряжения по сравнению с использованием полностью управляемых силовых ключей оказывается ниже как при четном, так и при нечетном числе секций круговой обмотки или числе пар силовых ключей, диапазон регулирования выпрямленного напряжения сокращается на 10–12% для случая, когда уровень коэффициентов пульсации не превышает 10%.

Ключевые слова: выпрямитель, трансформатор с вращающимся магнитным полем, многофазные преобразователи, качество выпрямленного напряжения, способ управления, ступени регулирования, ступенчато-хордовый способ управления

The article presents the results from studying the classic and a new step-chord pulse-phase methods for control of a rectifier made using a transformer with rotating magnetic field. The geometrical analogy of a circular winding containing ten sections is analyzed; geometrical interpretation of the notion of control stages is given, and the principle of implementing the step-chord control method is explained. Analytic expressions for calculating the switching sequence of power switches are given for the classic and the step-chord control methods, using which these methods can be implemented for different numbers of circular winding sections. Application of the step-chord control method makes it possible, starting from the second control stage, to obtain essentially better quality of the rectified voltage as compared with that obtained using the classic pulse-phase method; in addition, it becomes possible to widen the adjustment range for the preset quality of output voltage by a factor of 1.5–2.0. The step-chord control method can be implemented using both fully and partially controlled power switches. The use of partially controlled power switches imposes certain limitations on

implementing the step-chord control algorithm, which has an effect on the adjustment characteristic and on the dependence of voltage ripple ratio on the RMS value of rectified voltage. The quality of rectified voltage as compared with that in case of using fully controlled switches is poorer with both even and odd number of circular winding sections or the number of power switch pairs, and the rectified voltage adjustment range decreases by 10–12% for the case when the level of ripple coefficients does not exceed 10%.

Key words: rectifier, transformer with rotating magnetic field, multiphase converters, rectified voltage quality, control method, control stages, step-chord control method

Исследование динамических характеристик многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений

АФОНИН С.М.

Статья посвящена анализу перемещения пьезоэлектрических преобразователей. Интерес к использованию пьезоэлектрических преобразователей в электротехнике возрастает по причине их возможного применения во всевозможных датчиках вибраций для детектирования и предотвращения аварийных ситуаций. Особенно это касается электротехнического и энергетического оборудования подстанций, генерирующих станций малой мощности и др. Для диагностики оборудования важно иметь представление о модели распространения волн как в самой среде, так и в датчике. Рассматривается модель пьезоэлектрического преобразователя с точки зрения усилия и формируемой ЭДС. Определены динамические характеристики многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений с параллельным и кодовым управлением. Получены передаточные функции многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений при продольном и поперечном пьезоэффектах с параллельным и кодовым управлением.

Ключевые слова: многослойный пьезоактюатор, нано- и микроперемещений, деформация, динамические характеристики, параллельное и кодовое управление, передаточные функции

The displacements of piezoelectric transducers are analyzed. Interest in using piezoelectric transducers in electrical engineering is growing owing to the possibility of using them in a variety of vibration sensors for detecting and preventing emergency situations. This is especially the case for electrical and power equipment of substations, small-capacity power-generating stations, and the like. For equipment diagnostic purposes it is important to have an idea about the model that describes wave propagation phenomena in the medium itself and in the sensor. A piezoelectric transducer model is considered from the viewpoint of applied forces and the EMF generated in the transducer. The dynamic characteristics of multilayer nano- and microdisplacement piezoactuators with parallel and code control are determined. The transfer functions of multilayer nano- and microdisplacement piezoactuators with parallel and code control are determined for the cases of longitudinal and transverse piezoeffect.

Key words: multilayer piezoactuator, nano- and microdisplacements, deformation, dynamic characteristics, parallel and code control, transfer functions

Энергосберегающие электрические машины для привода электромобилей и гибридных автомобилей (Обзор зарубежных разработок)

ШУМОВ Ю.Н., САФОНОВ А.С.

Приведен обзор зарубежных публикаций по проблемам энергосбережения для тяговых электродвигателей электромобилей и гибридных автомобилей. Показаны характерные особенности, тенденции развития, способы уменьшения потерь для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), асинхронных (АД), вентильно-индукторных реактивных (ВИРД). Рассмотрены методы уменьшения массы постоянных магнитов в СДПМ. Наиболее энергоэффективными являются синхронные машины с постоянными магнитами, в особенности синхронные машины со встроенными ПМ.

Ключевые слова: электрические машины, энергоэффективность, электропривод, электромобили, гибридные автомобили, обзор

The article contains a review of foreign publications on matters concerned with development and manufacture of fundamentally new designs of energyefficient and energysaving traction electrical machines for electric and hybrid vehicles. Large foreign companies producing electric and hybrid vehicles on a mass scale prefer using, as traction machines, permanent!magnet synchronous motors and induction motors with pressure-cast copper rotor winding, the former being obviously most preferred ones. Since the rare-earth permanent magnets applied in permanent magnet synchronous motors account for a predominant part in the cost of materials used for manufacturing such motors, and since the cost of these magnets is expected to grow considerably in the future, the efforts taken by many developers are aimed at elaborating new alloys and types of permanent magnets, as well as at developing motor designs in which the magnets made of alloys containing rare-earth metals are either replaced by, e.g., ferrites or using motor designs with a decreased content of rare-earth metals. The application field of synchronous motors with concentric (tooth) windings and with a fractional number of slots per pole and phase tends to expand. Although converter-fed reluctance inductor motors are considered to be promising ones for traction applications, they nonetheless have not hitherto found mass-scale use for these purposes because their control unit needs significant complication for achieving lower levels of torque pulsations, vibration, and acoustic noise.

Key words: electrical machines, energy conservation, electric drive, electric vehicles, hybrid vehicles, review

Николай Сергеевич Костюков (К 90-летию со дня рождения)

Яков Захарович Месенжник (К 80-летию со дня рождения)