

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ
МЕТОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ
В ЛИНИЯХ ДЕФОРМАЦИИ**

А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, Д.В. Колпаков

В статье рассматривается проблема управления двухсекционным методическим нагревателем в режимах пуска с различным температурным распределением загрузки по длине нагревателя. Особенностью функционирования нагревателя является существенное изменение физических свойств нагреваемого металла, обусловленное их зависимостью от температуры. Для разработки и анализа алгоритмов изменения мощности в процессе выхода на установившийся режим используется математическая модель объекта, которая учитывает нелинейную зависимость физических свойств металла от температуры. С учетом приведенных в работе уточнений выполнен расчет электромагнитных источников тепла и температурного распределения в загрузке в процессе выхода на установившийся режим работы. Показано, что в процессе пуска нагревателя происходит значительное изменение температурного распределения по длине загрузки. Отклонение температурного распределения от стационарного режима приводит к появлению некондиционных заготовок на выходе. Получены алгоритмы изменения мощности, обеспечивающие быстрый выход на установившийся режим с заданным температурным распределением при минимальных потерях энергии на нагрев некондиционных заготовок. Расчет параметров управления выполнен с учетом предельных возможностей автономных источников питания. Рассмотрены варианты алгоритмов управления режимами пуска с учетом различных начальных распределений температуры по длине загрузки. Анализ показывает, что полученные алгоритмы управления нестационарными режимами обеспечивают одновременно минимум энергозатрат при выходе на установившийся режим и максимальное быстроедействие.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, источники тепла, температурное распределение, управление, эффективность

**INVESTIGATION OF NON-STATIONARY MODES
OF THE METHODOLOGICAL INDUCTION HEATER IN STRAIN LINES**

A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin, D.V. Kolpakov

The article deals with the problem of control over a two-section methodical heater in start-up modes with various temperature distributions of the load along the length of the heater. A key feature of the heater performance is a significant change in the physical properties of the heated metal, due to their dependence on the temperature parameters. A mathematical model of an object, which takes into account a nonlinear dependence of the physical properties of metals on the temperature parameters is used to develop and analyze the algorithms for tracking the changes of power during the steady-state operation. Taking into account the clarifications given in the work, calculation of electromagnetic heat sources and temperature distribution in the load is performed in the process of steady-state operation mode. It is shown that during the heater start-up, a significant change in the temperature distribution along the length of the load is observed. Deviation of temperature distribution from the stationary mode leads to appearance of substandard workpieces at the outlet. The obtained algorithms for changing the power can provide a quick exit to a steady-state mode with a specified temperature distribution at minimal energy losses needed for heating substandard workpieces. Calculation of control parameters is made with account to the limiting capabilities of autonomous power sources. Variants of control algorithms for the start-up modes are considered with regard to various initial temperature distributions along the length of the load. The analysis shows that the obtained control algorithms for non-stationary modes simultaneously provide minimum energy consumption when reaching a steady-state mode and maximum performance efficiency.

Keywords: induction heating, mathematical model, heat sources, temperature distribution, control, efficiency

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТА

С.В. Тригорлый, А.А. Чудров

В статье представлены результаты математического моделирования при нагреве мерзлого слоя грунта с помощью СВЧ-антенн. В качестве излучающих систем использовались рупорные и волноводно-щелевые системы, работающих на частоте 2,45 ГГц. Исследование проводилось с помощью численного моделирования процесса СВЧ-нагрева с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе COMSOL Multiphysics. В результате моделирования определены оптимальная скорость движения излучающей системы и мощность СВЧ-излучения, при которых обеспечивается заданная равномерность нагрева грунта.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, излучающая система, численное моделирование, скорость движения, мощность, равномерность нагрева

MODELING OF MICROWAVE SOIL DEFROSTING

S.V. Trigorly, A.A. Chudrov

The article presents the results of mathematical modeling for heating the frozen soil layer using microwave antennas. Horn and waveguide-slot systems operating at the frequency of 2.45 GHz were used as radiation systems. The research was conducted by numerical simulation of the microwave heating process using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software package. As a result of the simulation, the optimal speed of the radiating system and the microwave radiation power were determined, which ensures a given uniformity of ground heating.

Keywords: microwave heating, radiating system, numerical simulation, motion speed, power, uniformity of heating

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

С.В. Тригорлый, В.Е. Желнов

Камеры лучевого типа являются малоизученными в технологии СВЧ-обработки диэлектриков. В данной статье рассмотрено моделирование СВЧ-установок с волноводно-щелевыми излучающими системами, работающими в периодическом и методическом режимах. Для периодического режима термообработки исследовано влияние положения диэлектрика в СВЧ-камере, формы и количества щелей в волноводе на равномерность и скорость нагрева объекта.

Для методического режима исследовано влияние скорости движения излучающей системы и СВЧ-мощности на равномерность термообработки мерзлого грунта. Компьютерное моделирование электродинамических и тепловых процессов выполнено в среде COMSOL Multiphysics. Представлены результаты моделирования нагрева диэлектриков при частоте СВЧ-излучения 2,45 ГГц.

Ключевые слова: СВЧ-установка, термообработка диэлектриков, компьютерное моделирование, волноводно-щелевая система, периодический и методический нагрев

COMPUTER SIMULATION OF MICROWAVE ELECTRICAL INSTALLATIONS WITH SLOTTED WAVEGUIDE RADIATION SYSTEMS

S.V. Trigorly, V.E. Zhelnov

Beam-type chambers are understudied in terms of technology for microwave processing of dielectrics. The article considers simulation of microwave installations with slotted waveguide radiation systems operating in periodic and methodical action regimes. Regarding the periodic heat treatment regime, the authors investigated effects of the position of dielectrics in the microwave chamber, the shape and number of slots in the waveguide on the uniformity and rate of heating an object.

Regarding the methodical action mode, the influence of the radiation system rate and microwave capacity on the uniformity of thermal treatment of frozen soil was investigated. Computer simulation of electrodynamic and thermal processes was performed in the COMSOL Multiphysics software. The simulation results of heating the dielectrics under the microwave radiation frequency of 2.45 GHz are presented.

Keywords: microwave installation, heat treatment of dielectrics, computer simulation, slotted waveguide system, periodic and methodical action heating

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ

А.М. Абакумов, А.А. Горячкин, Д.Г. Рандин

В статье рассматривается система стабилизации поперечной устойчивости автомобиля с подвеской, в которой в качестве активного элемента выступает линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ). Для принятой расчетной модели получены аналитические зависимости для определения дополнительных усилий на подвеске, вызванного центробежной силой, и управляющего воздействия, создаваемого ЛДПТ. Сформирована структура замкнутой по углу крена автомобиля системы автоматического управления, и рассмотрены динамические характеристики ее элементов. Приведена методика синтеза регулятора системы управления, базирующаяся на использовании эталонных передаточных функций. Показано, что высокие показатели качества регулирования могут быть достигнуты за счет использования в системе ПИД-регулятора. Разработана компьютерная модель системы, и для типичных параметров объекта управления проведено исследование ее динамических характеристик при отработке возмущения в виде изменения центробежной силы. Установлено, что использование разработанной САУ обеспечивает высокую точность стабилизации угла крена автомобиля.

Ключевые слова: *поперечная устойчивость автомобиля, активная подвеска автомобиля, система стабилизации, линейный двигатель постоянного тока*

INVESTIGATION OF THE TRANSVERSE STABILITY SYSTEM OF A VEHICLE WITH ELECTROMECHANICAL ACTIVE SUSPENSION

A.M. Abakumov, A.A. Goryachkin, D.G. Randin

The article considers a system of vehicle roll stability with the suspension where the linear DC motor (LDCM) acts as an active component. For the accepted computational model, analytical dependences required to determine additional forces on vehicle suspensions induced by the centrifugal force and the LDCM control effects have been obtained. The design principle of the closed roll- control system for the vehicle self-driving system has been formed and dynamic characteristics of its components considered. A methodology for synthesizing a control system regulator based on the use of the reference transfer functions is presented. It is shown that high quality control level can be achieved by providing the system with a proportional-integral-differential regulator. A computer model of the system has been developed and typical parameters of the control object in terms of its dynamic characteristics under the perturbation formed by the changes in the centrifugal force have been studied. It is established that the use of the developed ACS ensures high accuracy of the vehicle roll stability.

Keywords: *vehicle roll stability, active suspension of a vehicle, stability system, linear DC motor*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА НА КПД СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

В.М. Завьялов, С.В. Гайдук, С.А. Абейдулин, М.Б. Углова

Рассматривается система беспроводной передачи энергии (БПЭ) с последовательной топологией, как наиболее устойчивая к возмущениям и обеспечивающая высокий коэффициент передачи мощности. Описана её математическая модель во временной области. Получены зависимости КПД и коэффициента передачи мощности от параметров резонансного контура при фиксации резонансной частоты и при ограничениях габаритов передающих катушек. Для экспериментальной установки системы БПЭ с последовательной топологией, разработанной для электротележки ЕТ-20132, оборудованной беспроводной зарядной станцией, при учете реальных параметров построены графические зависимости, отражающие связь КПД с параметрами системы. Приведён анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: *беспроводная передача энергии, коэффициент полезного действия, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), робастность, последовательная топология, эффективность передачи*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RESONANT CIRCUIT PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF A WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEM

V.M. Zavyalov, S.V. Gaiduk, S.A. Abeidulin, M.B. Uglova

A wireless power transmission (WPT) system with a serial topology is considered as the most resistant to disturbances and providing a high power transfer coefficient. Its mathematical model in the time domain is described. The dependences of efficiency and power transfer coefficient on the parameters of the resonant circuit are obtained at fixing the resonant frequency and with restrictions on the dimensions of the transmitting coils. For experimental installation of the WPT system with a serial topology developed for the electric cart ET-20132, and equipped with a wireless charging station with account for the actual parameters, graphical dependencies were constructed that reflect the relationship between efficiency and system parameters. The limiting values of the parameters are found at which a strong coupling becomes weak and a sharp decrease in efficiency is observed. The analysis of the obtained dependences is given.

Keywords: wireless power transmission, efficiency, frequency response, robustness, serial topology, transmission efficiency

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРОВОДАХ ВЛ-10(6) КВ

С.П. Максимов, П.А. Кузнецов

Проведен обзор текущего состояния и аварийности на воздушных линиях электропередачи 10(6) кВ. Выявлены основные причины аварийности – гололедная и ветровая нагрузка на провода ВЛ, а также основные факторы, усложняющие проведение плавки гололеда. Приведен сравнительный анализ применяемых методов плавки гололеда. На основе результатов анализа сформулированы технические требования для создания нового, более эффективного метода плавки гололеда на ВЛ-10(6) кВ.

Ключевые слова: *воздушная линия электропередачи, гололедно-изморозевые отложения, плавка гололеда, распределительная сеть электроснабжения 10(6) кВ*

EXISTING METHODS FOR MELTING ICE AND SNOW ACCRETION ON 10(6) KV POWER LINES

S.P. Maksimov, P.A. Kuznetsov

The paper presents a review of the current state and accident rate on 10(6) kV overhead power lines. The authors consider the main reasons for accidents associated with ice and wind loads on overhead power lines, as well as the key disruptive effects which complicate the ice melting events. A comparative analysis of the employed ice melting techniques is provided. The results of the study are used to formulate the technical requirements for a novel ice-melting technique for the 10(6) kV overhead power lines.

Keywords: overhead power line, ice and snow accretion, ice-melting, 10(6) kV power distribution network

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОРАЖАЕМОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

A.C. Подгорний, П.А. Николаев, В.Н. Козловский

В статье представлены результаты разработки и реализации инструментов оценки электромагнитной поражаемости легковых автомобилей.

Ключевые слова: автомобиль, бортовой электротехнический комплекс, качество, надежность

**DEVELOPMENT OF TOOLS TO ASSESS
ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE
IN ELECTRICAL SYSTEMS OF MOTOR VEHICLES**

A.S. Podgorny, P.A. Nikolaev, V.N. Kozlovsky

The article presents the results of development and implementation of assessment tools relating susceptibility of motor vehicles to electromagnetic interference.

Keywords: car, on-board electrical complex, quality, reliability

**РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО
ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ
ЕГО ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

A.C. Саксонов, В.Н. Козловский

В статье представлены результаты реализации вероятностного расчетно-статистического инструментария оценки влияния вариабельности технологического процесса производства автомобильных генераторов на стабильность его основных электротехнических характеристик.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автосборочное производство, электрокомпоненты, генератор

PROBABILISTIC AND STATISTICAL METHODS FOR ESTIMATING VARIABILITY EFFECTS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE ALTERNATORS ON STABILITY OF ITS BASIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

A.S. Saxonov, V.N. Kozlovsky

The article presents the results of implementing probabilistic and statistical methods for estimating the impact of variability of technological processes applied in automotive alternators production on stability of its basic electrical characteristics.

Keywords: competitiveness, quality, car assembly production, electrical components, generator

УМЕНЬШЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИЗМЕНЯЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

И.Ю. Рожнов, Ш.А. Гайнуллин, И.И. Артюхов

Рассмотрена проблема качества электроэнергии на статоре генератора при подключении к нему преобразователя частоты. Предложен вариант уменьшения негативного влияния преобразователя частоты на генератор при изменении скорости вращения ротора, за счёт установки активного выпрямителя и регулирования его работы с помощью векторного управления. Представлены результаты анализа гармонических составляющих высокой частоты в напряжении статора генератора.

Ключевые слова: газотурбинная установка, скорость вращения ротора, синхронный генератор на постоянных магнитах, активный выпрямитель, система автоматического регулирования

MITIGATION OF THE NEGATIVE IMPACT OF THE FREQUENCY

CONVERTER ON THE VARIABLE SPEED SYNCHRONOUS GENERATOR

I.Yu. Rozhnov, Sh.A. Gainullin, I.I. Artyukhov

The problem of power quality on the generator stator due to the use of the frequency converter is considered. The invention proposes a version of mitigation negative impact of the frequency converter on the generator at changes in the rotor rotation speed, due to installation of an active rectifier and regulation of its operation using vector control. The results of analysis of THD in the generator stator voltage are presented.

Keywords: *gas turbine compressor, rotor rpm, permanent magnets synchronous generator, active rectifier, automatic control system*

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ «МЕРТВОГО» ВРЕМЕНИ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.В. Стариков, О.С. Беляева, Д.А. Пудовкина

Частотные преобразователи с синусоидальной модуляцией пришли на смену инверторам с π -коммутацией транзисторов для улучшения гармонического состава выходного напряжения. Однако, традиционная синусоидальная модуляция требует введения так называемого «мертвого» времени каждый период широтно-импульсной модуляции при переключении транзисторов полумостов. Приведены диаграммы управляющих сигналов, подаваемых на силовые транзисторы частотного преобразователя, при традиционной синусоидальной ШИМ с учетом «мертвого» времени и аналитическое выражение для расчета амплитуд первой и высших гармоник выходного фазного напряжения при работе на активную симметричную трехфазную нагрузку. Произведена вариация величины «мертвого» времени и найдены амплитуды гармоник с первой по тридцать девятую. Построены графики зависимостей относительных значений ряда высших гармоник в функции «мертвого» времени. Найдены также величины суммарного коэффициента гармонических составляющих при различных значениях «мертвого» времени. Сделан вывод, что введение «мертвого» времени приводит к резкому увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих.

Ключевые слова: *частотный преобразователь, фазное напряжение, широтно-импульсная модуляция, высшие гармоники*

INFLUENCE OF THE «DEAD» TIME ON HARMONIC COMPOSITION OF THE OUTPUT VOLTAGE OF THE FREQUENCY CONVERTER

A.V. Starikov, O.S. Belyaeva, D.A. Pudovkina

Frequency converters with sinusoidal modulation have replaced inverters with π -switched transistors to improve harmonic composition of the output voltage. However, traditional sinusoidal modulation requires introduction of the so-called "dead" time every period of pulse-width modulation when switching half-bridge transistors. The diagrams of the control signals applied to the power transistors of the frequency converter, with traditional sinusoidal PWM, taking into account the "dead" time, and analytical expression for calculating the amplitudes of the first and higher harmonics of the output phase voltage when operating on an active symmetrical three-phase load are given. A variation of the value of the "dead" time was performed and the amplitudes of the harmonics from the first to the thirty-ninth were found. The graphs of dependences of the relative values of a number of higher harmonics as a function of "dead" time are constructed. The values of the total coefficient of harmonic components are also found for various values of the "dead" time. It is concluded that introduction of "dead" time leads to a sharp increase in the total coefficient of harmonic components.

Keywords: frequency converter, phase voltage, pulse-width modulation, higher harmonics