

Содержание

Электротехника, 2026, №7, стр. 2-10

Моделирование и анализ распределительных сетей с несимметричными нагрузками при двухконтурном поперечном регулировании режимов их работы АСТАШЕВ М.Г., ДЕМИДОВ С.Н., МИКРЮКОВ В.В., ЧАСОВ А.В., ЭЛЬХОЛИ АХМЕД М.

Представлен подход к моделированию режимов работы распределительных сетей с несимметричными нагрузками в среде MATLAB Simulink при применении устройств с двухконтурным управлением. В программной среде Simulink выполнен расчет установившихся процессов на основе моделей распределительной сети, нагрузки и устройств управления, определены токи и напряжения во всех элементах схем. В программной среде MATLAB заданы профили нагрузки, на основе рассчитанных значений токов и напряжений, а также заданных регулировочных характеристик устройств, с помощью дополнительных блоков расчета активных и реактивных мощностей в фазах сети, выполняется вычисление и задание воздействий на устройства управления. Дополнительные блоки по измерению и вычислению активных и реактивных мощностей в различных узлах распределительной сети, реализованные в MATLAB, позволяют оценивать эффективность работы отдельных блоков и системы в целом. Предлагаемый подход позволяет автоматически рассчитывать установившиеся режимы распределительной сети при различных профилях нагрузки и различных типах устройств управления. В качестве примера приведены результаты расчета и анализа режимов работы распределительной сети при пяти различных профилях нагрузки при раздельном и совместном применении двух устройств управления: регулятора активной мощности и компенсатора реактивной мощности. Показаны возможности подхода при оценках эффективности применения различных технологий и устройств управления режимами работы распределительных сетей, а также выявления ограничений при их применении в зависимости от профилей нагрузки.

Ключевые слова: распределительные сети, двухконтурное поперечное регулирование, несимметричные нагрузки, поперечный регулятор, симметрирующее устройство,

статический компенсатор реактивной мощности, электромагнитные процессы, моделирование, MATLAB Simulink.

An approach to modeling the operating modes of distribution networks with asymmetric loads in the MATLAB Simulink environment when using dual-circuit control devices is presented. In the Simulink software environment, steady-state processes are calculated based on models of the distribution network, load and control devices, currents and voltages in all circuit elements are determined. Load profiles are set in the MATLAB software environment, based on the calculated values of currents and voltages, as well as the set adjustment characteristics of the devices, with the help of additional calculation blocks for active and reactive capacities in the phases of the network, the effects on control devices are calculated and set. Additional units for measuring and calculating active and reactive capacities in various nodes of the distribution network, implemented in MATLAB, allow you to evaluate the efficiency of individual units and the system as a whole. The proposed approach makes it possible to automatically calculate the steady-state modes of the distribution network for different load profiles and different types of control devices. As an example, the results of calculating and analyzing the operating modes of a distribution network with five different load profiles are presented with the separate and combined use of two control devices: an active power regulator and a reactive power compensator. The possibilities of the approach are shown in evaluating the effectiveness of various technologies and devices for controlling the operating modes of distribution networks, as well as identifying limitations in their application depending on load profiles.

Key words: distribution networks, double-circuit transverse regulation, asymmetric loads, transverse regulator, symmetrical device, static reactive power compensator, electromagnetic processes, modeling, MATLAB Simulink.

Электротехника, 2026, №7, стр. 11-19

Реализация устройств поперечного регулирования при симметрировании режимов работы четырехпроводных сетей с несимметричными нагрузками

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

Одним из эффективных методов борьбы с несимметрией нагрузки являются

технологии поперечного регулирования режимов работы электросети, которые позволяют управлять токами и мощностями (активной и реактивной) в разных фазах. Выбор конкретного метода поперечного регулирования зависит от типа и распределения нагрузки по фазам сети, а также от требований к качеству электроэнергии. Рассмотрена задача симметрирования режимов работы четырехпроводных трехфазных сетей с несимметричными нагрузками с помощью регулятора мощности, построенного на основе однофазного трансформатора и реактивного элемента. Регулируемый обмен активными и реактивными мощностями между фазами сети осуществляется регулятором мощности путем дискретного управления коэффициентом трансформации трансформатора и сопротивлением реактивного элемента. Приведены аналитические выражения, описывающие электромагнитные процессы в фазах регулятора мощности и сети. Разработаны методики расчета параметров элементов схемы регулятора для симметрирования активных мощностей в фазах сети при различных соотношениях активных мощностей в фазах нагрузки. Представлены результаты расчетов параметров регулятора мощности и моделирования режимов работы сети при различном профиле нагрузки.

Ключевые слова: четырехпроводная распределительная сеть с несимметричной нагрузкой, регулятор мощности, симметрирующее устройство, компенсация реактивной мощности.

One of the effective methods of combating load asymmetry is the technology of transverse regulation of the operating modes of the power grid, which allow you to control currents and capacities (active and reactive) in different phases. The choice of a specific method of transverse regulation depends on the type and phase distribution of the load in the network, as well as on the requirements for the quality of electricity. The problem of balancing the operating modes of four-wire three-phase networks with unbalanced loads using a power regulator based on a single-phase transformer and a reactive element is considered. The regulated exchange of active and reactive capacities between the phases of the network is carried out by a power regulator by discrete control of the transformer transformation coefficient and the resistance of the reactive element. Analytical expressions describing electromagnetic processes in the phases of the power regulator and the network are given. Methods have been developed for calculating the parameters of the controller circuit elements for balancing active capacities in network phases with different ratios of active capacities in

load phases. The results of calculations of the parameters of the power regulator and modeling of network operation modes with different load profiles are presented.

Key words: four-wire distribution network with an unbalanced load, power regulator, balancing device, reactive power compensation.

Электротехника, 2026, №7, стр. 20-28

Полупроводниковое высоковольтное коммутационное устройство регулирования напряжения для масляных трансформаторов класса 6–10/0,4 кВ

РАШИТОВ П.А., АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И., КУЗЕНЁВ Д.С.,

КРАСНОПЕРОВ Р.Н., ДЕМИДОВ С.Н.

Предложены схемотехнические решения и алгоритмы функционирования малогабаритного полупроводникового высоковольтного коммутационного устройства (ВКУ) регулирования напряжения под нагрузкой, предназначенного для масляных герметичных трансформаторов класса 6–10/0,4 кВ. Устройство рассчитано на размещение в составе типовых трансформаторных подстанций и обеспечивает возможность пофазного изменения уровней напряжения на стороне потребителя. Схема каждой фазы устройства выполнена на базе двунаправленных тиристорных ключей и управляемых реле и обеспечивает пять дискретных ступеней регулирования в диапазоне $\pm 5\%$ с шагом $2,5\%$ от номинального значения. Разработан способ переключения ступеней регулирования на основе конечного автомата с семью состояниями, в котором тиристорные ключи задействованы только в процессе коммутации. Предложены три алгоритма безаварийной смены ступеней при произвольном характере нагрузки без прерывания напряжения у потребителей; полное время переключения составляет не более 0,5 с. Приведены результаты имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink, подтвердившие корректность алгоритмов переключения и стабилизацию выходного напряжения на уровне $220\text{ В} \pm 5\%$ при активной, активно-индуктивной и активно-ёмкостной нагрузке. Представлены результаты экспериментальных исследований макетного образца одной фазы ВКУ, подтвердивших работоспособность предложенных решений.

Ключевые слова: масляный герметичный трансформатор, регулирование напряжения под нагрузкой, полупроводниковое высоковольтное коммутационное устройство,

тиристорный ключ, шунтирующее реле, имитационное моделирование, макетный образец.

Circuit design solutions and algorithms for the operation of a small-sized semiconductor high-voltage switching device (HVSD) for regulating voltage under load, designed for oil-sealed transformers of class 6-10/0_4 kV, are proposed. The device is designed to be placed as part of typical transformer substations and provides the possibility of phase-by-phase change of voltage levels on the consumer side. The circuit of each phase of the device is based on bidirectional thyristor switches and controlled relays and provides five discrete control steps in the range of $\pm 5\%$ in increments of $2,5\%$ of the nominal value. A method has been developed for switching control stages based on a finite state machine with seven states, in which thyristor switches are involved only in the switching process. Three algorithms are proposed for trouble-free stage change under arbitrary load conditions without interrupting consumer voltage; the total switching time is no more than 0,5 s. The results of simulation modeling in the MATLAB Simulink environment are presented, confirming the correctness of switching algorithms and stabilization of the output voltage at $220\text{ V} \pm 5\%$ under active, active-inductive and active-capacitive loads. The results of experimental studies of a mock-up sample of one phase of the HVSD, which confirmed the operability of the proposed solutions, are presented.

Key words: oil sealed transformer, voltage regulation under load, semiconductor high-voltage switching device, thyristor switch, shunt relay, simulation, mock-up.

Электротехника, 2026, №7, стр. 29-36

Применение нейросетевых алгоритмов в системах управления дискретными симметри-компенсирующими устройствами

МОСТОВОЙ Д.В., АСТАШЕВ М.Г., РАШИТОВ П.А., СТОЙНОВА А.М.

Рассматривается применение нейросетевого алгоритма в системе управления дискретными симметри-компенсирующими устройствами (СКУ), предназначенными для уменьшения несимметрии режимов трёхфазной распределительной сети и компенсации реактивной мощности. Предложено использовать нейросетевой алгоритм в дискретном регуляторе системы управления для выбора оптимальных управляющих параметров СКУ, обеспечивающих максимальный коэффициент эффективности работы

распределительной сети. Такой подход позволяет учитывать нелинейный характер взаимосвязей между параметрами режима сети и дискретными состояниями силовой части устройства. Представлены структуры нейросетевых моделей дискретного регулятора, описаны состав входных данных (признаков), выходные управляющие параметры и процедура обучения моделей для двух топологий СКУ. Рассмотрен порядок формирования обучающей выборки на основе эталонного расчёта, при котором для каждого режима сети определяется оптимальное дискретное состояние устройства. Показано, что применение уточняющего перебора наиболее вероятных состояний, сформированных нейросетевой моделью, позволяет получить высокую точность выбора управляющего воздействия при сохранении приемлемой вычислительной сложности. Результаты моделирования в MATLAB Simulink подтверждают работоспособность предложенного подхода, эффективность нейросетевого регулятора при выборе дискретных уставок и его перспективность для построения интеллектуальных систем управления дискретными устройствами силовой электроники.

Ключевые слова: нейронная сеть, симметрокомпенсирующее устройство, система управления, дискретный регулятор, коэффициент эффективности, компенсация реактивной мощности, симметрирование активной мощности.

The application of a neural network algorithm in a control system for discrete symmetry-compensating devices (DCS) designed to reduce the asymmetry of three-phase distribution network modes and reactive power compensation is considered. It is proposed to use a neural network algorithm in a discrete controller of the control system to select the optimal control parameters of the control system, ensuring the maximum efficiency of the distribution network. This approach allows us to take into account the nonlinear nature of the relationships between the parameters of the network mode and the discrete states of the power part of the device. The structures of neural network models of a discrete controller are presented, the composition of input data (features), output control parameters and the training procedure for models for two topologies of the control system are described. The procedure for forming a training sample based on a reference calculation is considered, in which the optimal discrete state of the device is determined for each network mode. It is shown that the use of a clarifying enumeration of the most probable states formed by the neural network model allows for high accuracy in selecting the control action while maintaining acceptable computational complexity. The simulation results in MATLAB Simulink confirm the

operability of the proposed approach, the effectiveness of the neural network controller in selecting discrete settings, and its prospects for building intelligent control systems for discrete power electronics devices.

Key words: neural network, symmetric compensating device, control system, discrete regulator, efficiency coefficient, reactive power compensation, active power symmetry.

Электротехника, 2026, №7, стр. 37-44

Энергоэффективные топологии многоуровневых преобразователей электрической энергии

ВОРОНИН И.П., ВОРОНИН П.А., КУЗИН С.Ю.

Рассмотрены особенности главных базовых топологий, таких как инвертор с фиксированной нейтральной точкой, инвертор с «плавающим» конденсатором и каскадно-мостовая инверторная ячейка с изолированным источником постоянного тока. Отмечено, что каждая из рассмотренных топологий имеет важные достоинства и занимает определенную нишу в промышленном применении. Также обсуждается относительно новая топология трехуровневого инвертора на базе Т-образного моста. Подробно рассмотрен энергоэффективный режим работы Т-образного моста с параллельным резонансным контуром. Рассмотрено применение в качестве универсальной модульной ячейки Т-образного моста с интегрированным резонансным контуром для построения энергоэффективных базовых топологий многоуровневых инверторов напряжения.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор, фиксированная нейтраль, плавающий конденсатор, каскадный мост, Т-образный мост.

The features of the main basic topologies, such as an inverter with a fixed neutral point, an inverter with a «floating» capacitor, and a cascade-bridge inverter cell with an isolated DC source, are considered. It is noted that each of the considered topologies has important advantages and occupies a specific niche in industrial applications. A relatively new topology of a three-level inverter based on a T-shaped bridge is also being discussed. The energy-efficient operation mode of a T-shaped bridge with a parallel resonant circuit is considered in detail. The use of a T-shaped bridge with an integrated resonant circuit as a universal modular cell for building energy-efficient basic topologies of multilevel voltage inverters is

considered.

Key words: multilevel inverter, fixed neutral, floating capacitor, cascade bridge, T-shaped bridge.

Электротехника, 2026, №7, стр. 45-50

Энергооптимальное управление электроприводами животноводческих комплексов для систем кормления и доения

ЗИГАНШИН Б.Г., ХАЛИУЛЛИН Д.Т., ЗАГИДУЛЛИН Л.Р., КАШАПОВ И.И.

Рассмотрена методика повышения энергетической эффективности электроприводов животноводческих комплексов для систем кормления и доения путем согласования технологического расписания, частотного регулирования и ограничения пиковых нагрузок. Объектами анализа являются шнековый питатель, вакуумный и молочный насосы, работающие в повторяющихся циклах с различной загрузкой. Предложен расчётный критерий удельного энергопотребления, учитывающий производительность, длительность цикла, потери двигателя и требования к стабильности вакуума.

Представлена инженерная схема объекта, расчётные зависимости для оценки энергии цикла и сравнение базового и оптимизированного режимов. Показано, что наибольший резерв экономии связан не с отключением оборудования, а с переносом части операций в интервалы непиковой загрузки и снижением частоты вращения насосных агрегатов при сохранении технологических ограничений.

Ключевые слова: животноводческие комплексы, системы кормления и доения, электропривод, энергопотребление, технологический цикл.

The method of increasing the energy efficiency of electric drives of livestock complexes for feeding and milking systems by coordinating the technological schedule, frequency control and limitation of peak loads is considered. The objects of the analysis are screw feeders, vacuum and milk pumps operating in repeated cycles with different loads. A calculation criterion for specific energy consumption is proposed, taking into account productivity, cycle duration, engine losses and vacuum stability requirements. An engineering scheme of the facility, calculated dependencies for estimating cycle energy, and a comparison of basic and optimized modes are presented. It is shown that the greatest savings reserve is associated not with equipment shutdown, but with the transfer of some operations to off-peak loading intervals and a decrease in the rotational speed of pumping units while maintaining

technological limitations.

Key words: livestock complexes, feeding and milking systems, electric drive, energy consumption, technological cycle.

Электротехника, 2026, №7, стр. 51-56

**Интеллектуальная диагностика асинхронных электродвигателей
животноводческих комплексов по токовым и вибрационным признакам
НУРИЕВ И.Г., САФИУЛЛИН Л.Н., САБИРОВ Р.Ф.**

Представлена методика диагностики асинхронных электродвигателей животноводческих комплексов по совокупности токовых, вибрационных и тепловых признаков. Рассмотрены особенности работы двигателей в приводах насосов, вентиляторов, транспортеров и роботизированных механизмов, где отказ электродвигателя приводит не только к простою оборудования, но и к нарушению технологического режима содержания животных. Предложено формирование диагностического вектора, включающего спектральные составляющие тока, виброскорость, температуру корпуса, коэффициент мощности и остаточный признак энергетической эффективности. Приведены расчётные соотношения для частот боковых полос, интегрального индекса состояния и правила классификации. Выполнено сопоставление базового порогового контроля и интеллектуальной обработки признаков.

Ключевые слова: животноводческие комплексы, асинхронный двигатель, диагностика, спектральный анализ тока, вибрация, техническое состояние.

A diagnostic technique for asynchronous electric motors of livestock complexes based on a combination of current, vibration and thermal characteristics is presented. The features of the operation of motors in the drives of pumps, fans, conveyors and robotic mechanisms are considered, where the failure of the electric motor leads not only to equipment downtime, but also to a violation of the technological regime of animal husbandry. The formation of a diagnostic vector is proposed, including the spectral components of the current, vibration velocity, body temperature, power factor and a residual sign of energy efficiency. The calculated ratios for the sideband frequencies, the integral state index, and the classification rules are given. A comparison of basic threshold control and intelligent feature processing has been performed.

Key words: livestock complexes, asynchronous motor, diagnostics, spectral analysis of current, vibration, technical condition

Электротехника, 2026, №7, стр. 57-62

**Повышение энергетической эффективности систем микроклимата
животноводческих помещений средствами силовой электроники**

СТУПИНА А.А., ПАНФИЛОВ И.А., ТЫНЧЕНКО Я.А., КУКАРЦЕВ В.А.,
ПАНФИЛОВА Т.А., ТЫНЧЕНКО В.В., СПРИНДЖУК М.В., ДОРОФЕЕВ Е.М.

Рассматривается расчётно-инженерная методика повышения энергетической эффективности систем микроклимата животноводческих помещений. Сформулирован тепловой баланс помещения, приведены зависимости мощности вентиляции от расхода воздуха и предложен критерий оценки удельных затрат электроэнергии на поддержание микроклимата. Выполнено сравнение релейного и плавного регулирования, показана роль частотно-регулируемых приводов в снижении энергии вентиляции и стабилизации температурной траектории.

Ключевые слова: животноводческие помещения, микроклимат, энергоэффективность, тепловой баланс, средства силовой электроники.

A computational and engineering technique for increasing the energy efficiency of microclimate systems in livestock facilities is considered. The thermal balance of the room is formulated, the dependences of ventilation power on air consumption are given, and a criterion for estimating the specific cost of electricity for maintaining the microclimate is proposed. A comparison of relay and smooth control is performed, the role of frequency-controlled drives in reducing ventilation energy and stabilizing the temperature trajectory is shown.

Key words: livestock facilities, microclimate, energy efficiency, thermal balance, power electronics.

Электротехника, 2026, №7, стр. 63-67

**Модульная электромеханическая система автоматизированной фермы с общей
DC-шиной и буферным накопителем энергии**

ЕВСЮКОВ Д.Ю., ПАНФИЛОВА Т.А., СТУПИНА А.А., КУКАРЦЕВ В.А.,

ТЫНЧЕНКО Я.А., СПРИНДЖУК М.В., ТЫНЧЕНКО В.В., КОЗЕНКОВА Г.Л.

Предложена структура модульной электромеханической системы автоматизированной фермы на основе общей DC-шины. Рассматриваются приводы кормораздатчика, роботизированного манипулятора, вентиляции и насосов, работающие с различными графиками нагрузки. Показано, что объединение приводов через DC-шину позволяет использовать рекуперированную энергию торможения, уменьшить провалы напряжения и улучшить управляемость внутренних энергетических потоков. Приведены расчётные выражения для выбора ёмкости шины, оценки энергии рекуперации и коэффициента использования мощности модулей.

Ключевые слова: автоматизированная ферма, модульная электромеханическая система, DC-шина, накопитель энергии, рекуперация энергии.

The structure of a modular electromechanical system of an automated farm based on a common DC bus is proposed. The drives of a feed dispenser, a robotic arm, ventilation and pumps operating with different load schedules are considered. It is shown that combining drives via a DC bus makes it possible to use the recovered braking energy, reduce voltage dips and improve the controllability of internal energy flows. Calculated expressions are given for selecting the bus capacity, estimating the energy recovery and the power utilization factor of the modules.

Key words: automated farm, modular electromechanical system, DC bus, energy storage, energy recovery.

Электротехника, 2026, №7, стр. 68-71

Анализ режимов работы электродвигателей в роботизированных фермах с учётом повторно-кратковременной нагрузки

ВАЛИЕВ А.Р., ДМИТРИЕВ А.В., НЕЖМЕТДИНОВА Ф.Т.

Рассмотрена методика анализа режимов работы электродвигателей роботизированных ферм. Особенность таких приводов заключается в повторении коротких участков разгона, позиционирования, удержания, торможения и холостого хода. Предложено использовать циклограмму механизма, эквивалентный момент, коэффициент продолжительности включения и тепловую модель первого порядка. Приведены расчётные формулы, а также оценка влияния перегрузочных участков на температурный запас двигателя. Результаты ориентированы на выбор двигателя и

параметров привода для роботизированных систем кормления, сортировки и доения.

Ключевые слова: роботизированная ферма, электродвигатель, повторно-кратковременный режим, эквивалентный момент, тепловая модель, циклограмма.

The method of analyzing the operating modes of electric motors of robotic farms is considered. The peculiarity of such drives is the repetition of short sections of acceleration, positioning, holding, braking and idling. It is proposed to use a cyclogram of the mechanism, an equivalent moment, a switch-on duration coefficient, and a first-order thermal model. Calculation formulas are given, as well as an assessment of the effect of overload areas on the temperature reserve of the engine. The results are focused on the choice of motor and drive parameters for robotic feeding, sorting and milking systems.

Key words: robotic farm, electric motor, repeated-short-term mode, equivalent moment, thermal model, cyclogram.

Электротехника, 2026, №7, стр. 72-76

Применение частотно-регулируемых приводов в системах животноводства с оценкой энергосбережения и качества электроэнергии

КАЛИМУЛЛИН М.Н., НУРИЕВ И.Г., ГАЛИЕВ И.Г.

Рассмотрено применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) в системах вентиляции, водоснабжения и транспортирования кормов на животноводческих комплексах. Показано, что энергетический эффект ЧРП должен оцениваться совместно с влиянием на качество электроэнергии, поскольку преобразователи частоты являются источниками гармонических составляющих тока. Предложены расчётные зависимости для оценки мощности при регулировании расхода, удельной экономии энергии и коэффициента гармонических искажений. Рассмотрены варианты применения сетевых дросселей и ЕМС-фильтров.

Ключевые слова: животноводческие предприятия, системы вентиляции, водоснабжения и транспортирования кормов, частотно-регулируемый привод, энергосбережение, качество электроэнергии.

The application of frequency-controlled drives (VFDs) in ventilation, water supply and feed transportation systems at livestock complexes is considered. It is shown that the energy effect of the CHP should be evaluated together with the effect on the quality of electricity, since

frequency converters are sources of harmonic current components. Calculated dependences are proposed for estimating power during flow control, specific energy savings, and harmonic distortion coefficients. Application options for network chokes and EMC filters are considered.

Key words: livestock enterprises, ventilation, water supply and feed transportation systems, frequency-controlled drive, energy saving, electricity quality.

Электротехника, 2026, №7, стр. 77-81

Электромагнитная совместимость силового и измерительного оборудования автоматизированных ферм

ЗАГИДУЛЛИН Л.Р., КАЛИМУЛЛИН М.Н., ХАЛИУЛЛИН Д.Т.

Рассмотрена проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования автоматизированных ферм. Объектами анализа являются частотно-регулируемые электроприводы, оборудование силовых шкафов, датчики, контроллеры и промышленные сети передачи данных. Показано, что рост числа силовых преобразователей увеличивает вероятность проводимых и излучаемых помех, влияющих на измерительные каналы. Предложена методика расчёта и инженерной оценки помеховых связей, включающая карту источников и приёмников, измерение уровня проводимых помех, расчёт ослабления фильтра и оценку погрешности датчиков до и после мероприятий, направленных на совершенствование ЭМС.

Ключевые слова: автоматизированная ферма, силовое и измерительное оборудование, частотно-регулируемый электропривод, электромагнитная совместимость, помехи, фильтр, измерительные каналы.

The problem of electromagnetic compatibility (EMC) of automated farm equipment is considered. The objects of analysis are frequency-controlled electric drives, power cabinet equipment, sensors, controllers, and industrial data transmission networks. It is shown that an increase in the number of power converters increases the likelihood of interference conducted and emitted, affecting the measuring channels. A method for calculating and engineering evaluation of interference communications is proposed, including a map of sources and receivers, measurement of the level of interference, calculation of filter attenuation, and estimation of sensor error before and after measures aimed at improving EMC.

Key words: automated farm, power and measuring equipment, frequency-controlled electric drive, electromagnetic compatibility, interference, filter, measuring channels.

Электротехника, 2026, №7, стр. 82-91

Использование устройств FACTS для повышения устойчивости энергосистемы

БАЛАМЕТОВ А.Б., МУСАХАНОВА Г.С., ИСАЕВА Т.М., ЯГУБЛЫ Т.Г.

Рассмотрены методы анализа устойчивости энергосистем с учетом области их применимости для расчета режимов с ЛЭП СВН. Показано, что для построения алгоритма автоматизированного поиска решения необходима формализация отдельных этапов – диагностики причин расхожимости или отсутствия решения на основе анализа данных, схемы и режима до и в процессе решения уравнений установившегося режима. Рациональное размещение устройств СТАТКОМ и объединенного регулятора потоков мощности позволяет улучшить технико-экономические показатели ЭЭС. Показано, что наиболее эффективным устройством для обеспечения устойчивости является объединенный регулятор потоков мощности; если в схеме отсутствует кольцевые неоднородные сети, то по критерию экономичности установки эффективным может оказаться СТАТКОМ, обеспечивающий статическую и динамическую устойчивость. Применение компенсаторов реактивной мощности может оказаться эффективным в стационарных режимах при дискретном управлении. Общий алгоритм расчета режима должен быть построен адаптирующимся к условиям решаемой задачи, а также обеспечивать надежную сходимость к физически реализуемому решению. Для получения физически реализуемого решения уравнений установившегося режима электрической сети с ЛЭП СВН предложена методика, основанная на вводе расчетных опорных PU узлов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, устойчивость, нелинейные уравнения установившегося режима, стабильность напряжения, устройства FACTS, STATCOM, объединенный регулятор потоков мощности.

Methods for analyzing the stability of power systems are considered, taking into account the scope of their applicability for calculating the modes of c of the SVN transmission line. It is shown that in order to build an algorithm for automated solution search, it is necessary to formalize individual stages – diagnostics of the causes of divergence or absence of a solution

based on data analysis, scheme and mode before and during the solution of steady-state equations. The rational placement of the STATCOM devices and the combined power flow controller makes it possible to improve the technical and economic performance of the EES. It is shown that the most effective device for ensuring stability is a combined power flow controller; if there are no ring heterogeneous networks in the circuit, then according to the criterion of cost-effectiveness of the installation, a static current providing static and dynamic stability may be effective. The use of reactive power compensators can be effective in stationary modes with discrete control. The general algorithm for calculating the mode should be built adaptable to the conditions of the problem being solved, as well as ensure reliable convergence to a physically feasible solution. To obtain a physically realizable solution to the steady-state equations of an electric grid with an overhead transmission line, a technique based on the input of calculated reference PU nodes is proposed.

Key words: electric power system, stability, nonlinear steady-state equations, voltage stability, FACTS devices, STATCOM, integrated power flow regulator.

Электротехника, 2026, №7, стр. 92-95

Электрофизические свойства диэлектрического слоя гибких переменных ёмкостей на основе углеродсодержащей резины

СМИРНОВ А.В., ТЕРЕНТЬЕВ А.А., ЕГОРОВ Е.Н., КОЛЬЦОВ Н.И.

Исследованы электрофизические свойства резины на основе бутадиен-нитрильного каучука, содержащего диэлектрические добавки диоксида титана, оксида цинка и титаната бария, в качестве чувствительного элемента (диэлектрического слоя) гибкой переменной ёмкости в датчике систем дистанционного контроля давления в автомобильных шинах. На образцах резины толщиной от 0,3 до 1,5 мм с наклеенными с обеих сторон медными электродами измерялись удельное поверхностное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость и электрическая ёмкость конденсатора датчика контроля давления. Показано, что с увеличением содержания диоксида титана диэлектрическая проницаемость и удельное поверхностное электрическое сопротивление резины увеличиваются, при введении титаната бария – уменьшаются. Совместное введение диоксида титана с оксидом цинка приводит к резкому росту диэлектрической проницаемости и удельного поверхностного сопротивления; с увеличением содержания диоксида титана и титаната бария ёмкость конденсатора датчика контроля давления увеличивается. При

увеличении избыточного давления электрическая емкость конденсатора со слоем из резины, содержащим все использованные диэлектрические добавки, увеличивается. При увеличении, а затем уменьшении избыточного давления наблюдается незначительный гистерезис электрической ёмкости конденсатора, что ограничивает использование углеродсодержащей резины в качестве диэлектрического слоя датчика давления.

Ключевые слова: автомобильные шины, дистанционный контроль давления, датчик контроля давления, углеродсодержащая резина, диэлектрический слой, удельное поверхностное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, электрическая ёмкость.

The electrophysical properties of rubber based on nitrile butadiene rubber containing dielectric additives of titanium dioxide, zinc oxide, and barium titanate as a sensing element (dielectric layer) of flexible variable capacitance in a sensor for remote tire pressure monitoring systems have been studied. The specific surface electrical resistance, permittivity, and electrical capacitance of the pressure monitoring sensor capacitor were measured on rubber samples with a thickness of 0.3 to 1.5 mm with copper electrodes glued on both sides. It is shown that with an increase in the content of titanium dioxide, the dielectric constant and specific surface electrical resistance of rubber increase, and decrease with the introduction of barium titanate. The combined introduction of titanium dioxide with zinc oxide leads to a sharp increase in the dielectric constant and specific surface resistance; with an increase in the content of titanium dioxide and barium titanate, the capacitor capacity of the pressure monitoring sensor increases. As the overpressure increases, the electrical capacity of a capacitor with a rubber layer containing all the used dielectric additives increases. When the excess pressure increases and then decreases, there is a slight hysteresis of the capacitor's electrical capacity, which limits the use of carbon-containing rubber as a dielectric layer of the pressure sensor.

Key words: automobile tires, remote pressure monitoring, pressure monitoring sensor, carbon-containing rubber, dielectric layer, specific surface resistance, dielectric constant, electrical capacity.

Электротехника, 2026, №7, стр. 96-98

Авторы номера