

Отечественные системы железнодорожной автоматики и телемеханики и задачи обеспечения их конкурентоспособности

РОЗЕНБЕРГ Е.Н., АСТРАХАН В.И., МАЛИНОВ В.М.

Анализ отечественных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) показывает, что они не уступают иностранным аналогам по таким базовым критериям, как безопасность, надежность, функциональные возможности, срок службы, стоимость при закупке и в ходе эксплуатации. Это подтверждено приведенными в статье характеристиками современных систем российских железнодорожной автоматики и примерами их экспорта на железные дороги других стран. Для того чтобы сохранить достигнутые позиции и обеспечить дальнейший прогресс требуется учитывать новые мировые тенденции в области создания средств железнодорожной автоматики, основными направлениями которых являются:

- создание комплексных многоуровневых систем управления;
- более широкое использование современных средств цифровой радиосвязи в информационно-управляющих системах;
- обеспечение надежной киберзащищенности разрабатываемых систем ЖАТ;
- разработка систем с модульным построением и гибкой архитектурой;
- унификация требований к разрабатываемой аппаратуре и гармонизация их с общемировыми требованиями и стандартами;
- создание многоуровневых комплексных систем глубокой внутренней и внешней диагностики;
- переход при обслуживании систем ЖАТ к контрактам жизненного цикла, обеспечивающим снижение стоимости обслуживания и повышение его качества.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики, микропроцессорная техника, безопасность, надежность, срок службы, функциональные возможности, конкурентоспособность.

The analysis of domestic railway microprocessor automation and telemechanics systems shows that they are not inferior to foreign counterparts according to such basic criteria as: safety, reliability, functionality, service life, cost during procurement and during operation. This is confirmed by the characteristics of modern railway automation systems given in the article as well as examples of the export of Russian systems to foreign railways. In order to consolidate these positions, it is necessary to continuously take into account new global trends in the field of

creating railway automation equipment, the main areas of which are:

- creation of integrated multi-level control systems;
- wider use of modern digital radio communications in information management systems;
- ensuring reliable cyber security of the developed systems;
- development of systems with a modular construction and flexible architecture;
- unification of requirements for the developed equipment and their harmonization with global requirements and standards;
- creation of multi-level complex systems of deep internal and external diagnostics;
- transition in the maintenance of systems to life cycle contracts, ensuring a reduction in the cost of maintenance and improving its quality.

Key words: railway automation systems, microprocessor equipment, safety, reliability, term of service, functional capabilities, competitiveness

Электротехника, 2019, №6, стр. 6-12

Система тягового электроснабжения переменного тока с опорами контактной сети, не соединенными с рельсовым путем

КОСАРЕВ А.Б., КОСАРЕВ Б.А.

Предложена система тягового электроснабжения переменного тока. Показано, что наиболее перспективным направлением обеспечения надежной работы существующих типов дистанционных защит является использование для заземления опор троса группового заземления. Определены вероятностные характеристики напряжений на опорах контактной сети при учёте случайного характера параметров, определяющих уровни напряжений на опорах при коротких замыканиях в тяговой сети. Рассчитано математическое ожидание числа опасных ситуаций на участке длиной 100 км при использовании для заземления опор рельсового пути и при применении предлагаемой системы заземления опор контактной сети. Показано, что число опасных ситуаций при отказе от заземления опор контактной сети не превышает аналогичного на электрифицированных участках, где для заземления опор используется рельсовый путь. Установлено, что при сопротивлении системы трос группового заземления – опоры менее 7,5 Ом работа тягового электроснабжения в грозовой период не ухудшается по сравнению с тяговой сетью, когда для заземления опор используется рельсовый путь.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, опора контактной сети, заземлитель, короткое замыкание.

The article suggests the system of traction power supply of alternating current. It is shown that the most promising direction of ensuring reliable operation of existing types of distance protection is the use of grounded multi-grounding rods for grounding. The probabilistic characteristics of the stresses on the supports of the contact network are determined, taking into account the random character of the parameters determining the stress levels on the supports in case of short circuits in the traction network. The mathematical expectation of the number of dangerous situations in a section of 100 km length is calculated with the use of a rail track for grounding and using the proposed system of grounding of the contact network supports. It has been obtained that the number of dangerous situations in the case of a failure of the grounding of the supports of the contact network does not exceed a similar value in electrified sections where a rail track is used to ground the supports. It has been established that when the system is resistant to a group grounding cable – the support is less than 7,5 Ohm, the work of the traction power supply during the thunderstorm period does not deteriorate compared to the traction network when a rail track is used to ground the supports.

Key words: traction power supply system, earthing switch, support of a contact network, short circuit.

Электротехника, 2019, №6, стр. 13-19

Математическое моделирование несимметричных режимов работы силовых автотрансформаторов

ГОЛУБЕВ А.Н., МАРТЫНОВ В.А., ШУИИ В.А.

При эксплуатации силовых автотрансформаторов, получивших широкое распространение в сетях 110 кВ и выше, нередко приходится иметь дело с неполнофазными режимами, вызванными отключениями одной или двух фаз при коротких замыканиях либо при пофазных ремонтах. Это приводит к несимметрии напряжений автотрансформаторов, что сказывается на качестве электроснабжения потребителей; для самого автотрансформатора неполнофазная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток. Наличие электрической связи между высоким и средним напряжениями обуславливает специфику в анализе их режимов работы. И если теоретический анализ и общий подход к расчету несимметричных режимов двухобмоточных трансформаторов в настоящее время рассмотрены достаточно подробно, то задача анализа несимметричных режимов работы трехобмоточных автотрансформаторов сохраняет свою актуальность. На основе метода симметричных составляющих разработан подход к расчету автотрансформаторных и комбинированных несимметричных режимов работы силовых автотрансформаторов.

Предложены новые математические модели основных неполнофазных режимов.

Предложенная модель и полученные аналитические выражения позволяют определять токи и напряжения фазных обмоток автотрансформатора в самых различных несимметричных режимах работы на основе единого подхода.

Ключевые слова: автотрансформаторы, метод симметричных составляющих, расчетная схема замещения, несимметричный режим, неполнофазный режим.

When operating power autotransformers that have become widely used in 110 kV and higher networks, it is often necessary to deal with incomplete-phase modes caused by disconnections of one or two phases in case of short circuits or in case of phase-by-phase repairs. This leads to asymmetry of the voltage of autotransformers, which affects the quality of power supply to consumers. For the autotransformer an incomplete-phase operation can be dangerous with respect to overloading of individual windings. The presence of an electrical connection between high and medium voltage causes the specifics in the analysis of their operating modes. And if the theoretical analysis and the general approach to the calculation of asymmetric modes of two-winding transformers are currently considered in sufficient detail, the task of analyzing the asymmetric operating modes of three-winding autotransformers remains relevant. An approach to the calculation of autotransformer and combined asymmetric operating modes of power autotransformers has been developed on the basis of the method of symmetrical components. The proposed model and obtained analytical expressions allow to determine the currents and voltages of the phase windings of the autotransformer in a variety of non-symmetric modes of operation on the basis of a unified approach.

Key words: autotransformers, the method of symmetrical components, the calculated equivalent circuit, asymmetrical conditions, open-phase operating conditions.

Электротехника, 2019, №6, стр. 20-28

Модель динамических режимов асинхронного привода с учетом насыщения стали двигателя и параметров источника питания

ЕРШОВ М.С., КОНКИН Р.Н.

Разработана и в программной среде MATLAB-Simulink реализована модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Предлагаемая модель учитывает насыщение магнитопровода при больших токах в обмотках электродвигателя, а также вытеснение тока в проводниках ротора и внутреннее сопротивление источника питания. Структура модели позволяет имитировать насыщение стали в соответствии с зависимостями

реальной машины. Для блока моделирования зависимости взаимной индуктивности между статором и ротором от потокосцепления взаимоиндукции машины предложено уравнение, коэффициенты которого получены аппроксимацией экспериментальных данных. Модель апробирована в среде MATLAB Simulink и на лабораторном стенде путём проверки расчётных данных экспериментом. Разработанная модель может быть использована для исследования динамических режимов асинхронного двигателя. Выполнено компьютерное моделирование и анализ различных пусковых режимов привода, при этом наряду с электрическими и механическими параметрами модель позволяет вывести энергетические показатели. В практических целях модель применялась для установления возможности использования пусковых значений токов и напряжений двигателя для экспериментального определения параметров источника питания.

Ключевые слова: асинхронный двигатель; математическая модель; электромагнитные переходные процессы.

This paper proposes a model of squirrel-cage induction motor developed and realized in the computer software environment of MATLAB-Simulink. The offered model allows considering iron saturation at large currents in electric motor windings and also the deep-slot effect and internal resistance of power supply. Structure of model allows simulating iron saturation according to dependencies of the real machines. The equation for the modeling subsystem of dependence of mutual inductance between the stator and the rotor from machine mutual induction flux linkage is offered. The equation coefficients are received by approximation of experimental data. The model is tested and approved both in the environment of MATLAB-Simulink, and at the experimental assembly, by verification of settlement and experimental data. The developed model can be used for researching of the induction motor dynamic modes. Computer modeling and the analysis of various drive starting modes has been executed, at the same time along with the electric and mechanical parameters the model allows exhibiting the energy characteristics. In the practical purposes the model was applied to establishment of usability currents and voltages starting values of the motor for experimental determination of the parameters of power supply.

Key words: induction motor; mathematical model; electromagnetic transient.

Электротехника, 2019, №6, стр. 29-34

Магнитное поле машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора
ГЕЛЬВЕР Ф.А., САМОСЕЙКО В.Ф.

Приведена схема замещения магнитной цепи реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. На основе предложенной схемы замещения записаны дифференциальные уравнения, решения которых порождают функций поперечного магнитного потока в зависимости от угловой координаты машины, анизотропная магнитная проводимость двухполюсного ротора которой достигается путем продольной его шихтовки. Найдено распределение магнитного напряжения между статором и ротором вдоль воздушного зазора.

Ключевые слова: анизотропная магнитная проводимость, продольная шихтовка полюса ротора, функция распределения магнитного напряжения между статором и ротором.

A scheme for replacing the magnetic circuit of a reactive electric machine with an anisotropic magnetic conductivity of a rotor is given. Based on the proposed replacement scheme, differential equations are written whose solutions generate transverse magnetic flux functions as a function of the angular coordinate of the machine, the anisotropic magnetic conductivity of the bipolar rotor is achieved by longitudinal batching. The distribution of the magnetic stress between the stator and the rotor along the air gap is found.

Key words: anisotropic magnetic conductivity, longitudinal charging of the rotor pole, the distribution function of the magnetic stress between the stator and the rotor.

Электротехника, 2019, №6, стр. 35-39

Вентильно-индукторные генераторы. Способы управления и проектирование БАЛЬ В.Б., АУНГ МИНТ ТУН

Вентильно-индукторные генераторы известны уже около 25 лет. За это время они зарекомендовали себя, как перспективный тип генераторов благодаря простоте конструкции и большому диапазону рабочих частот. Однако используемые способы коммутации таких генераторов не позволяют достигать максимальной мощности. Предложен способ коммутации вентильно-индукторного генератора со стабилизацией магнитного потока, позволяющий повысить его мощность без увеличения габаритов. Выполнено сравнение различных способов коммутации генератора по критерию вырабатываемой энергии генератора за цикл коммутации, показано преимущество предлагаемого способа. Показано также, что предложенный способ обеспечивает увеличение мощности генератора при одновременном увеличении токовой нагрузки его обмотки. Степень увеличения мощности тем выше, чем больше модуляция магнитной проводимости рабочего зазора генератора. Приведены рекомендации по выбору

электромагнитных нагрузок генератора при различных способах коммутации.

Ключевые слова: вентильно-индукторный генератор, коммутатор, возбуждение, стабилизация тока, потокосцепление, магнитная энергия.

Switched reluctance generators have been known for about 25 years. During this time, they have established themselves as a promising type of generators, due to the simplicity of design and a large range of operating frequencies. However, the currently used generator commutation methods do not allow got the maximum power. Proposed method of switching with stabilization of the magnetic flux, allow increased its power without increasing the dimensions. Different methods of generator commutation, based on the calculation of the generator energy for the switching cycle, are compared. Proposed method advantages are shows. It is shown that the proposed method application leads to an increase in the power of the generator, while increasing the current load of its winding. Increase power is the higher, then higher the magnetic generator working gap reluctance modulation. Recommendations on the choice of electromagnetic loads of the generator for different switching methods are given.

Key words: switched reluctance generator, switch, excitation, current stabilization, flux coupling, magnetic energy.

Электротехника, 2019, №6, стр. 40-46

Синхронный реактивный двигатель без магнитов класса энергоэффективности IE5
ПРАХТ В.А., ДМИТРИЕВСКИЙ В.А., КАЗАКБАЕВ В.М.

Применение современных синхронных реактивных двигателей позволяет повысить энергоэффективность многих промышленных механизмов. Новые стандарты определяют пять классов энергоэффективности для электродвигателей от уровня IE1 до IE5. В статье рассматриваются вопросы математического моделирования и экспериментального исследования синхронного реактивного двигателя без магнитов самого высокого класса энергоэффективности IE5. Предложенная математическая модель позволяет рассчитать КПД, коэффициент мощности, пульсации момента, потери в обмотке, в сердечниках статора и ротора электродвигателя и другие рабочие характеристики синхронного реактивного двигателя в различных режимах работы. Экспериментальные исследования двигателя проведены на испытательном стенде с прямым измерением момента. Для измерения температуры обмоток использованы термопары и проведены замеры в установившемся температурном режиме. Опытный образец синхронного реактивного

двигателя выполнен в корпусе того же габарита и высоты оси вращения, что и серийно производимый асинхронный двигатель класса энергоэффективности IE3 той же мощности. Представлены результаты экспериментального сравнения опытного образца двигателя без магнитов класса энергоэффективности IE5 и серийно производимого двигателя IE4.

Ключевые слова: синхронный реактивный двигатель, класс энергоэффективности, коэффициент полезного действия, потери, математическая модель.

Applying the synchronous reluctance motors allows increasing the energy efficiency of many industrial applications. The new standards define 5 classes of energy efficiency from the IE1 level to the IE5 level for electric motors. The article deals with the mathematical modelling issues and experimental study of magnet-free synchronous reluctance motor of ultra premium energy efficiency class IE5. The proposed mathematical model allows calculating the efficiency, the power factor, the torque ripple, the winding losses and other operating characteristics of the synchronous reluctance motor in various modes. The experimental studies by using specially developed test bench with the direct torque measurement were carried out. The thermocouples were used for measuring the winding temperature and its measurement was made in the steady state of temperature mode. The developed prototype of the synchronous reluctance motor is made in the frame of the same size and rotation axis height, as the serially produced induction motor of the same power was. The results of experimental comparison of the developed prototype of the magnet-free synchronous reluctance motor with energy efficiency class IE5 and serially produced synchronous reluctance motor with energy efficiency class IE4 are presented.

Key words: synchronous reluctance motor, energy efficiency class, efficiency factor, losses, mathematical model.

Электротехника, 2019, №6, стр. 46-49

Выбор внешнего диаметра электродвигателя для привода направленной антенны

БЕЛОКУРОВА Н.А., ЗАХАРЕНКО А.Б., КРАСОВА Н.А.

Главные размеры электродвигателя определяются электромагнитным моментом и выбираются, как правило, на основе постоянной Арнольда. Конструкция направленной антенны с приводом накладывает ограничение на конфигурацию и диаметр встраиваемого приводного электродвигателя. Поскольку диаметр электродвигателя, являющегося основанием азимутального электропривода, определяется диаметром кольцевой фермы, его значение выбирается исходя из максимизации низшей резонансной механической

частоты конструкции. Предложена методика выбора оптимального диаметра электродвигателя для прямого электропривода антенно-фидерной системы с учетом ее механических характеристик.

Ключевые слова: направленная антенна, прямой электропривод, синхронный электродвигатель.

The main dimensions of the electric motor are determined by the electromagnetic torque and are selected, as a rule, on the basis of the formula for the Arnold constant. The construction of a directional antenna with a drive imposes a restriction on the configuration and diameter of the embedded drive motor. Since the diameter of the electric motor, which is the base of the azimuth electric drive, is determined by the diameter of the ring truss, its value is selected based on maximizing the value of the lowest resonant mechanical frequency of the structure. A technique is proposed for selecting the optimum diameter of an electric motor for a direct electric drive of an antenna-feeder system with regard to its mechanical characteristics.

Key words: directional antenna, direct electric drive, synchronous electric motor

Электротехника, 2019, №6, стр. 50-54

Сопротивление обмотки возбуждения импульсного электромагнита

ПЕВЧЕВ В.П., КОЧЕТКОВ М.В.

При анализе мощных импульсных электромагнитов, используемых в сейсмоисточниках необходимо учитывать вытеснение тока в проводниках обмотки. В статье проанализированы возможности теоретического определения зависимости сопротивления обмотки от времени с помощью коэффициента Фильда, программы Maxwell и формул электродинамики для расчёта постоянной времени проникновения поля в проводник в случае скачка тока. Малая длительность переднего фронта тока в обмотке электромагнита позволяет использовать эти формулы.

Ключевые слова: мощный короткоходовой импульсный электромагнит, сопротивление обмотки, вытеснение тока.

In the analysis of powerful pulsed electromagnets, used in the sources of seismic waves, need to take into account the displacement current in the conductors of the windings. The article analyzes the possibilities of theoretical determine the dependence of the resistance of the winding from time to time, using the Field factor, the program Maxwell and the formula of electrodynamics to calculate the time constant of the penetration of the field into the conductor in

the case of the jump current. A small value of the duration of the leading edge of the current in the winding of the electromagnet allows the use of this formulas.

Key words: powerful short-stroke pulsed electromagnet, winding resistance, ousting current

Электротехника, 2019, №6, стр. 55-60

Схемотехническое моделирование структур с распределёнными параметрами КОННИКОВ И.А.

Рассмотрена возможность использования эквивалентных схем известной морфологии для моделирования структур с распределёнными параметрами в частотной и временной областях. Особое внимание уделено П-образной схеме и классу схем для сверхширокополосного моделирования, параметры которых были получены на основе измерений частотных характеристик структур с последующей аппроксимацией результатов измерений. Отмечено, что все известные эквивалентные схемы, кроме П-образной, ориентированы на моделирование в частотной области. Исследована погрешность моделирования с помощью П-образного звена и показано, что использовать его для сверхширокополосного моделирования нецелесообразно. Однако во временной области П-образное звено обеспечивает точное (по Элмору) воспроизведение времени задержки и малую ошибку воспроизведения фронта; в частности, при моделировании проводника (микрополосковой линии), нагруженного на характеристическое сопротивление, П-образная схема и задержку, и длительность фронта воспроизводит точно (по Элмору), то есть относительная погрешность моделирования длительности фронта равна нулю как для безындуктивных линий (резисторы), так и в случае линий без активных потерь.

Ключевые слова: структуры с распределёнными параметрами, эквивалентная схема, моделирование.

The possibility of employing equivalent circuits of the well-known morphology for simulation of distributed parameters structures in the frequency and time domains is considered. Specific attention is paid to the П-shape circuit and to the kind of circuits intended for superwideband simulation, the parameters of the circuits being obtained upon the basis of measuring the frequency behavior of the structures and a further approximation of the results of measuring. It is stressed that all the known equivalent circuits (with the exception of the П-shape circuit) are intended for simulation in the frequency domain. The error of simulation by means of the П-shape link was explored and it was inferred that it's employment for superwideband simulation was not advisable. However, in the time domain, the П-shape link provides the exact (by

Elmore) simulation of the delay time and a small error of simulation of the rise time; in particular, if simulating a conductor (a microstrip line) loaded with its natural impedance, the Π -shape link simulates exactly (by Elmore) both the delay time and the rise time, i.e., both the delay and the rise time are in relative error by zero for both noninductive lines (resistors) and for lines without resistance loss.

Key words: distributed parameters structures, equivalent circuit, simulation.

Электротехника, 2019, №6, стр. 60-66

Устройство волновой релейной защиты линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения с выбором поврежденных фаз для автоматического повторного включения

ЛАЧУГИН В.Ф., КУЛИКОВ А.Л., ПЛАТОНОВ П.С., ВУКОЛОВ В.Ю.

К быстродействующим волновым релейным защитам ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения предъявляются повышенные требования по обеспечению высокой надежности взаимодействия алгоритмов защиты и избирателей поврежденных фаз устройств автоматического повторного включения (АПВ) с целью обеспечения условий, необходимых для максимального использования преимуществ этих защит.

Рассматриваются принципы функционирования устройств волновой релейной защиты совместно с избирателем поврежденных фаз, в котором осуществляется сравнение между собой средних по модулю значений фазных аварийных токов (напряжений) ЛЭП.

Разработаны критерии выбора времени срабатывания и возврата органов направления мощности волновой защиты и избирательных органов поврежденных фаз, позволяющие повысить эффективность работы защиты в цикле однофазного АПВ. Показано, что времена срабатывания избирателя поврежденных фаз и органов направления мощности быстродействующих защит должны быть соизмеримы, а сами устройства должны обладать способностью контролировать не только само возникновение повреждения, но и переход его в более сложные виды в цикле однофазного АПВ. В неполнофазном режиме работы ЛЭП время возврата защиты в исходное состояние может быть существенно сокращено по сравнению с ранее выбранными значениями за счет того, что постоянные времена затухания свободных периодических составляющих при отключении фазы имеют значения порядка 30-50 мс и снижаются с увеличением частоты и ростом переходного сопротивления в месте повреждения.

Ключевые слова: линии электропередачи, волновая защита, органы направления мощности, избиратели поврежденных фаз, автоматическое повторное включение.

The increased requirements to high-speed wave protections of high and extra high voltage transmission lines are imposed for ensuring high reliability of protection and single-phase automatic reclosing fault-phase selection detector algorithm interaction for the purpose of ensuring the necessary conditions for the maximum use of advantages of these protections. The discussion covers wave protection device operation principles, together with the fault-phase selection detector, in which the comparison between the average of the absolute values of the emergency phase currents (voltages) transmission lines take place. The criteria for selecting the response and return time of the wave protection directional element and the fault-phase selection detector are developed. The criteria allow to improve the protection in the single-phase automatic reclosing cycle. It is shown that the response times of the fault-phase selection detector and the directional element should be commensurate and the devices themselves should have the ability to detect not only the short-circuit occurrence, but also the short-circuit transition to more complex modes in the single-phase automatic reclosing cycle. In the incomplete transmission line, the protection return time can be significantly reduced to the previously selected values due to the fact that the free periodic component decay time is 30-50 ms and decrease with the component frequency and transient resistance increase at the point of short-circuit.

Key words: power lines, wave protection, power-direction relay, phase selector, automatic reclosing.