

Учёт потерь в стали в системах управления синхронными реактивными электроприводами

ГОРОЖАНКИН А.Н., ДУДКИН М.М., БУХАНОВ С.С, ГРЫЗЛОВ А.А.

Синхронные реактивные электроприводы развиваются благодаря своим преимуществам: бесконтактности, высоким перегрузочным и удельным моментам, отсутствию потерь в роторе, большому диапазону регулирования, а также прогрессу в области информационной и силовой электроники. Показано, что потери в стали существенно влияют на алгоритмы управления синхронной реактивной машиной. Рассмотрена четырёхконтурная система векторного управления синхронной реактивной машиной. Внутренними контурами являются контуры регулирования тока и электромагнитного момента электрической машины, внешними – контуры потокосцепления статора и угловой скорости. Показаны особенности синтеза наблюдателя для векторной системы управления с учётом потерь в стали и насыщения магнитной системы. Экспериментально показана адекватность полученного наблюдателя. Выполнен синтез алгоритмов оптимального управления синхронной реактивной машиной с учётом потерь в стали. Первый алгоритм предполагает наличие таблицы оптимальных значений управляющих воздействий, второй – предусматривает синтез адаптивного регулятора момента, который будет автоматически настраиваться на оптимальное управляющее воздействие. Полученные алгоритмы управления являются универсальными и могут быть применены в других системах управления синхронными реактивными машинами, например, в системах прямого управления моментом.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина, потери в стали, система управления, оптимальное управление, адаптивный регулятор.

Synchronous reluctance electric drives develop due to their advantages: contactlessness, high overload and specific moments, no loss in the rotor, a large control range, as well as progress in the field of information and power electronics. It is shown that the iron loss significantly affect the control algorithms for the synchronous reluctance machine. The four-loop vector control system of the synchronous reluctance machine is considered. The main ducts are the current and electromagnetic torque control circuits of the electric machine and the secondary ducts are the stator flux linkage and angular velocity contours. The features of observer synthesis for vector control system taking into account iron losses and magnetic saturation of the system are given. By experimental studies, the adequacy of the received observer is shown. The synthesis of algorithms for optimal control of the synchronous reluctance machine, taking into account iron

loss, is given. The first algorithm assumes the existence of the optimal values table of control actions, the second provides for the synthesis of an adaptive torque controller, which will be automatically tuned to the optimal control action. The obtained control algorithms are universal and can be applied in other control systems of synchronous reluctance machines, for example, in direct torque control systems.

Key words: synchronous reluctance machine, iron loss, control system, optimal control, adaptive controller.

Электротехника, 2019, №5, стр.9-15

Частотные методы синтеза высокоскоростных регулируемых электроприводов компрессоров

ГРЫЗЛОВ А.А., ГРИГОРЬЕВ М.А.

Предложена методика анализа и синтеза контуров регулирования тока и электромагнитного момента в электроприводах переменного тока. Показано, что при решении задач анализа и синтеза контуров регулирования тока и момента неизменяемую часть электропривода можно аппроксимировать линейной системой с амплитудной модуляцией сигнала. Установлено, что переходные и установившиеся процессы переменных в фазных обмотках двигателя можно рассматривать независимо друг от друга. Применение методов частотной идентификации объектов регулирования позволяет учесть наличие перекрестных магнитных связей между трехфазными обмотками электрической машины, при этом математическое описание системы может быть представлено упрощенным набором уравнений, что удобно на этапах настройки и наладки систем инженерно-техническим персоналом. Экспериментальными методами частотных характеристик показано, что полоса равномерного пропускания частот в контуре регулирования тока может достигать 4000 рад/с, что облегчает условия настройки контура регулирования момента при работе электропривода при скорости 6000 об/мин. Дальнейшее увеличение скорости электропривода при сохранении удельных массогабаритных показателей может быть достигнуто только при введении корректирующих сигналов. Показано, что в многофазных электроприводах (при количестве фаз более трех) фазная зона обмотки уменьшается и при этом снижается индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки, что позволяет значительно расширить полосу пропускания частот в контурах регулирования тока, момента и скорости.

Ключевые слова: электроприводы компрессоров, частотные методы синтеза, система управления.

In the article, the methods of analysis and synthesis of the electromagnetic torque control loop in AC electric drives are proposed by frequency response methods. It is shown that when solving problems of analysis and synthesis of the control loop of the torque, the unchanged part of the system can be approximated by a linear system with amplitude modulated signal. It has been established that transient and steady-state processes of variables can be considered independently in current and torque control loops. The use frequency response methods for identification of objects of regulation will allow to take into account the presence of cross-magnetic links between the three-phase windings of an electric machine, and the mathematical description of the system can be represented by a simplified set of equations, which is convenient during the setup and commissioning of systems by engineering and technical personnel. Experimental methods of bode plots have shown that the steady frequency passband in the current control loop can reach 4000 rad/s, which facilitates the conditions for adjusting the torque control loop when the drive is running at 6000 rpm. Maintaining the specific mass and dimensional parameters a further increase in the speed of the electric drive can be achieved only with the introduction of correction signals. It is shown that in multiphase electric drives (with more than three phases), the phase winding zone decreases and the inductive dissipation resistance of the phase winding decreases, which allows to significantly expand the frequency passband in the current, torque and speed control circuits.

Key words: compressors' electric drives; frequency response methods; control system.

Электротехника, 2019, №5, стр.15-20

Электропривод поворота трубы стана холодной прокатки труб ПАО «Челябинский трубопрокатный завод»

БЕЛЫХ И.А., ГРИГОРЬЕВ М.А.

В статье предложены методика выбора силового электрооборудования и алгоритма синтеза системы управления ответственных механизмов металлургического производства на примере электропривода поворота трубы стана холодной прокатки труб Челябинского трубопрокатного завода. Оптимальные параметры силовых элементов электропривода выбирались по критерию максимального быстродействия, что позволило повысить общую

производительность производства трубы со сверхтонкой стенкой. Показано, что амплитуда автоколебаний, обусловленная конечной жесткостью передачи между двигателем и рабочим органом, может быть ограничена соответствующим выбором передаточного числа редуктора. Упрощение механической передачи системы позволило снизить механические потери, облегчить условия настройки электропривода с нагрузкой, которая описывалась двухмассовой системой, но потребовало завышения установленной мощности электрической машины примерно в два раза. Классическими методами частотного анализа и синтеза определены параметры корректирующих устройств контуров регулирования электромагнитного момента, скорости и положения. Анализ кривых переходных процессов показал, что быстродействие электропривода поворота было увеличено примерно на 80%, а общая производительность стана улучшена на 15-20%. Ожидаемый годовой экономический эффект принятых технических решений – около 250 млн рублей.

Ключевые слова: позиционный электропривод, стан холодной прокатки труб, электропривод поворота трубы.

The article proposes a method of selection of power electrical equipment and an algorithm for the synthesis of electric drive control system responsible mechanisms of metallurgical production on the example of pipe rotation electric drive of the cold rolling mill pipe of Chelyabinsk pipe rolling plant. The choice of the optimal parameters of the electric drive power elements was carried out according to the criterion of maximum speed, which allowed to increase the overall productivity of the pipe production with an ultra-thin wall. It is shown that the amplitude of self-oscillations due to the final stiffness of the transmission between the motor and the working member can be limited by the appropriate choice of the gear ratio.

Simplification of the system's mechanical transmission allowed to reduce mechanical losses, simplify the conditions for adjusting the electric drive with a load that was described by a two-mass system, but required an overestimation of the installed power of the electric machine by about two times. The parameters of correcting devices of electromagnetic torque, speed and position control circuits are determined by classical methods of frequency response analysis and synthesis. The analysis of transient curves showed that the speed of the electric drive was increased by about 80%, and the overall performance of the mill was improved by (15-20)%.

The expected annual economic effect of the technical solutions is about 200 million rubles.

Key words: positional electric drive, cold rolling mill of pipes, pipe rotation electric drive.

Высокоэффективные многоуровневые преобразователи частоты объектов металлургического производства

ЧУПИН Е.С., ГРИГОРЬЕВ М.А.

Выполнен сопоставительный анализ традиционных и многоуровневых низковольтных преобразователей частоты, предложены расчетные методики, позволяющие оценить технико-экономические показатели многоуровневых полупроводниковых устройств. Отмечены привлекательные качества низковольтных многоуровневых преобразователей частоты по сравнению с высоковольтными (номинальным напряжением более 1 кВ) многоуровневыми полупроводниковыми устройствами. В низковольтных многоуровневых преобразователях удается снизить потери в полупроводниковых вентилях примерно в 1,5 раза, уменьшить влияние перенапряжения на нагрузку, увеличить быстродействие активного выпрямителя. Предложена методика оценки потерь в полупроводниковых преобразователях с двухуровневыми автономными инверторами, основанная на математических моделях и экспериментальных исследованиях, позволивших уточнить параметры аналитических уравнений. Установлено, что применение в активных выпрямителях трехуровневых мостовых инверторов (выпрямителей) позволяет сократить длительность переходных процессов системы в режиме рекуперации, что обусловлено сниженным уровнем коммутационных перенапряжений. Разработана методика выбора оптимального количества фаз полупроводниковых многоуровневых низковольтных преобразователей частоты для объектов металлургического производства по критерию максимума вероятности безотказной работы.

Ключевые слова: металлургическое производство, многоуровневый низковольтный преобразователь частоты, потери.

The article presents a comparative analysis of traditional and multi-level low-voltage frequency converters, as well as proposed calculation methods that allow to assess the technical and economic performance of multi-level semiconductor devices. Attention is drawn to the attractive qualities of low-voltage multi-level frequency converters in comparison with high-voltage (with a nominal voltage of more than 1 kV) multi-level semiconductor devices. Thus, in low-voltage multi-level converters it is possible to reduce losses in semiconductor switching equipment by about 1,5 times, significantly reduce the effect of overvoltage on the load, increase the speed of

the active rectifier. The method of estimation of losses in semiconductor converters with two-level autonomous inverters, based on mathematical models and experimental studies, which allowed to clarify the parameters of analytical equations, is proposed. It is established that the use of three-level bridge inverters (rectifiers) in active rectifiers allows to increase the speed of transients of the system variables in the regeneration mode and this is due to the reduced level of switching overvoltages. The method of choosing the optimal number of phases of semiconductor multi-level low-voltage frequency converters for metallurgical production facilities according to the criterion of maximum probability of failure-free operation is developed.

Key words: metallurgical production, multi-level low-voltage frequency converter, losses.

Электротехника, 2019, №5, стр.27-33

Тяговый электропривод электромобиля «Газель-Next»

НАУМОВИЧ Н.И., ГРИГОРЬЕВ М.А.

На основании графика нагрузки тягового электропривода электромобиля «Газель-Next», а также с учетом вероятностной кривой плотности распределения тягового усилия выполнен расчет номинальных параметров скорости и момента двигателя по критерию минимальных потерь. Показано, что такой подход позволяет повысить КПД системы примерно на 10%. Разработана математическая модель системы, в которой контур косвенного регулирования тягового момента аппроксимировался двумя апериодическими звеньями первого порядка, одним из которых учитывались некомпенсированные электромагнитные инерционности фазных цепей, а вторым приближенно учитывали ограниченное быстродействие микропроцессорной системы управления. Предложена методика синтеза системы управления тяговым электроприводом, позволившая снизить режим автоколебаний при работе объекта в зоне перегрузок по моменту и скорости. Установлено, что для тяговых механизмов, работающих в сложных условиях эксплуатации, наилучшие показатели регулирования достигаются в структуре с внутренним корректирующим контуром по координате активной мощности. Это объясняется возможностью прямого измерения координат фазных тока и напряжения, что обеспечивало безынерционность канала обратной связи. Качество наладки системы оценивалось по каналу «Тяговое усилие – выходная скорость», при этом моделировался наиболее сложный режим работы тягового электропривода – гололедица, когда тяговое усилие изменялось от максимального значения до нуля практически по ступенчатому

закону. В этом случае перерегулирование координаты скорости не превышало 8%.

Ключевые слова: тяговый электромобиль, система управления, переходные процессы.

Based on the load graph of the traction electric drive, as well as considering the probability curve of the density distribution of the traction force, the calculation of the nominal parameters of the speed and torque of the motor according to the criterion of minimum losses was performed. It is shown that this approach can improve the efficiency of the system by about 10%. A mathematical model of the system is developed in which the circuit of indirect control of the traction torque is approximated by two aperiodic links of the first order, one of which takes into account the uncompensated electromagnetic inertia of the phase circuits, and the second approximately takes into account the limited speed of the microprocessor control system. The method of synthesis of the traction electric drive control system, which allowed to reduce the mode of self-oscillations during the operation of the object in the zone of overload in terms of torque and speed was proposed. It is established that for traction mechanisms operating in difficult operating conditions, the best control parameters are achieved in the structure with an internal corrective circuit along the coordinate of the active power. This was explained by the possibility of direct measurement of the coordinates of the phase current and voltage, which ensures the inertness of the feedback channel. The quality of adjustment of the system was evaluated by the channel "Traction force – output speed", while modeling the most complex mode of operation of the traction electric drive – ice, when the traction force varied from maximum to zero practical step by step law. In this case, the re-adjustment of the speed coordinate did not exceed 8%, which was quite permissible according to the technical conditions of the object being developed.

Key word: traction electric vehicle, control system, transients.

Электротехника, 2019, №5, стр.34-38

Компенсированная тяговая подстанция постоянного тока

ХОХЛОВ Ю.И., ШАБИЕВ С.Г., ФЕДОРОВА М.Ю.

Рассмотрена задача создания компенсированного двенадцатифазного выпрямительного агрегата для тяговых подстанций постоянного тока. Актуальность задачи диктуется обусловлена возрастающим объемом грузовых перевозок, повышением их скорости, а также появлением новых видов грузового движения по железным дорогам постоянного

тока. Это требует повышения энергоэффективности тягового электроснабжения. С этой целью предлагается включить в двенадцатифазные некомпенсированные выпрямительные агрегаты тяговых подстанций компенсирующие устройства в виде двух трехфазных реакторов и конденсаторной батареи, работающей на частотах пятой и седьмой гармоник. При решении задачи используются аналитический метод исследования электромагнитных процессов с расчетом всех необходимых характеристик, метод моделирования в среде MATLAB, а также дизайнерские решения по созданию оборудования компенсирующего устройства и плану его размещения на тяговых подстанциях постоянного тока ОАО РЖД. Наиболее важными результатами решаемой задачи являются возможность полной компенсации потребляемой подстанциями реактивной мощности; обеспечение высокой эффективности использования конденсаторной батареи компенсирующего устройства; поддержание и стабилизация на необходимом уровне выпрямленного напряжения в контактной сети в условиях развития грузовых перевозок. Реализация решаемой задачи предусмотрена проектом инновационного развития ОАО РЖД России.

Ключевые слова: тяговая подстанция постоянного тока, двенадцатифазный компенсированный выпрямительный агрегат, компенсирующее устройство, реактор, конденсаторная батарея, компенсация реактивной мощности, инженерное проектирование, дизайн.

The task of creating a twelve-phase compensated rectifier unit for direct current traction substations of the railway transport is considered. The urgency of the problem to be solved is dictated by a great growing scope of goods transportation increasing their speed as well as appearing new types of goods movement by the direct current railway. This requires intensification and power efficiency of the traction power supply. Toward this end it is put forward including compensating devices as two three-phase reactors and working at frequency of the fifth and seventh harmonics of a condenser battery in the twelve-phase non-compensated rectifier units of the railway. While solving the problem it is used an analytical research method of electromagnetic processes calculating all the necessary characteristics on the computer, a modelling method in MATLAB, as well as design decisions of creating compensating unit and planning its layout at the direct current traction substations of the railway. The most important results of the problem to be solved are: possibility of complete compensation of reactive power used by substations; providing high efficiency of applying a condenser battery of the compensating unit; keeping up and stabilizing rectified voltage in a contact network at necessary level under conditions of the above mentioned development of goods transportations. The

realization of the problem to be solved is provided by the modern development design of Russia railway.

Key words: DC traction substation, twelve-phase compensated rectifier unit, compensating device, reactor, condenser battery, reactive power compensation, engineering projection, design.

Электротехника, 2019, №5, стр.39-44

Оптимизация высокотемпературного стартер-генератора обращенной конструкции для летательных аппаратов

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ВАВИЛОВ В.Е.

Рассмотрен высокотемпературный стартер-генератор с внешним ротором и возможностью его установки на валу высокого давления авиационного двигателя. Выбраны и обоснованы материалы для изготовления данного стартер-генератора, произведены его численные расчеты, а также рассмотрены различные мировые аналоги. По полученным данным проведена многокритериальная оптимизация конструктивной схемы с помощью генетического алгоритма и метода Парето. В результате оптимизации были выбраны оптимальные в смысле Парето активная длина и толщина постоянных магнитов СГ. Использование полученных размеров позволило снизить массу проектируемого СГ на 10 кг относительно базового варианта (зарубежного высокотемпературного стартер-генератора фирмы Thales) при неизменных тепловых нагрузках. На основе оптимальных геометрических размеров проведено multidисциплинарное компьютерное моделирование (взаимозависимые тепловые, электромагнитные и механические расчеты), в результате которого доказана работоспособность спроектированной конструкции.

Ключевые слова: высокотемпературный стартер-генератор, электрифицированный авиационный двигатель, компрессор вала высокого давления.

We consider a high-temperature starter generator with an external rotor and the possibility of mounting an aircraft engine on the high-pressure shaft. As a result of the research, materials for the manufacture of this starter generator were selected and substantiated, its numerical calculations were performed, and various world analogs were considered. On the received sizes the multicriteria optimization of the developed constructive scheme by means of genetic algorithm and Pareto method is made. As a result of the optimization, the active length and thickness of the permanent SG magnets were chosen in the Pareto sense. The use of the obtained sizes allowed to reduce the mass of the designed SG by 10 kg relative to the basic version (the

foreign high-temperature starter-generator of Thales company) with constant thermal loads. On the basis of optimal geometric dimensions, multidisciplinary computer modeling (interdependent thermal calculations, electromagnetic and mechanical) was performed, as a result of which the working capacity of the designed structure was proved.

Key words: high-temperature starter-generator; electrified aircraft engine; high pressure shaft compressor.

Электротехника, 2019, №5, стр.45-49

Анализ теплового состояния нагревательного элемента трансформаторного типа
ЗАР НИ НБЕЙН, СЕРИКОВ А.В., СЕРИКОВ В.А.

Статья посвящена решению задачи моделирования и анализа трехмерного температурного поля в нагревательном элементе трансформаторного типа. Приведена конструкция трехфазного нагревательного элемента с пространственной магнитной системой. Описаны особенности построения модели с помощью программного комплекса ANSYS. Показаны и проанализированы результаты моделирования температурного поля в нагревательном элементе мощностью 25 кВт. Выявлено, что температурное поле в области первичной обмотки распределено неравномерно и имеются зоны локального перегрева. Теплоотвод от этих зон осуществляется по двум основным путям. Интенсивность теплоотвода и распределение тепловых потоков зависят от плотности тока в перемычке, которая замыкает элементы вторичной обмотки. С учетом этой особенности даны рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок в активных частях нагревательного элемента и совершенствованию конструкции электрооборудования. Для обоснования режимов работы нагревательного элемента в составе нагревательного блока автономной системы теплообеспечения выявлена взаимосвязь между расходом теплоносителя и мощностью нагревательного элемента, что позволяет ограничить максимальную температуру в зонах локального перегрева и продлить срок эксплуатации электрооборудования.

Ключевые слова: нагревательный элемент трансформаторного типа, трехмерное температурное поле, локальный перегрев, электромагнитные нагрузки.

The article is devoted to the problem of modeling and analyzing three-dimensional temperature field in the transformer type heating element. The design of the investigated three-phase heating element with a spatial magnetic system is presented. The features of the model which was

created with the help of ANSYS software are described. The results of the temperature field modeling in heating element with the power of 25 kW are shown and analyzed. It is revealed that the temperature field in the primary winding region is uneven. In addition there are zones of local overheating. Heat removal from these zones is carried out along two main routes. The heat sink intensity and heat fluxes allocation depend on the current density in the electrical jumper, which closes the components of the secondary winding. Taking into account this feature, recommendations of choosing electromagnetic loads in the active parts of the heating element and improving the construction of the described electrical equipment are given. Besides, an interconnection between the heat transfer agent consumption and the power of the heating element for the substantiation of its operating modes as the compound part of the heating block of autonomous heat supply system has been revealed. It allows to restrict maximal temperature in the zones of local overheating and to prolong electrical equipment lifetime.

Key words: transformer type heating element, three-dimensional temperature field, local overheating, electromagnetic loads.

Электротехника, 2019, №5, стр.50-55

Проектирование электромеханических преобразователей с левитационным экраном МАМЕДОВА Г.В., КЕРИМЗАДЕ Г.С.

Рассматриваются электромеханические преобразователи с левитационными элементами различного назначения. Магнитные, электрические, тепловые и механические параметры преобразователей подразделены на постоянные и переменные. В общем виде представлено взаимное преобразование параметров. При разработке методики расчета преобразователей определены принцип соразмерности габаритных размеров, вытеснение магнитного поля между обмоткой возбуждения и левитационным элементом и методы учета воздействия ударных сил. Для выбора материала левитационного элемента использованы законы Фурье и Видеман-Франца.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, левитационный экран, режимы тока и усилий, принцип соразмерности, ударная сила.

Presented article is devoted questions of designing of electromechanical converters with levitation elements of different function. Magnetic, electric, thermal and mechanical parametres of converters are subdivided into constants and variables and in a general view mutual

transformation of parameters is presented. By working out of a design procedure of converters the principle of harmony of overall dimensions, magnet field replacement between the field winding and levitation an element and methods of the account of influence of shock forces are defined. For a material choice levitation an element laws Furrye and Videman-Frantsa are used.
Key words: electromechanical converter, levitation screen, modes that and efforts, principle of harmony, striking power.

Электротехника, 2019, №5, стр.56-60

Разработка видеоизмерительного устройства для мониторинга гололёдных отложений на ЛЭП

ШИЛИН А.Н., ДЕМЕНТЬЕВ С.С.

Диагностирование оледенения ЛЭП оптическим методом подразумевает контроль линейного клиренса по данным видеонаблюдения. В процессе эксплуатации провод подвергается механической и температурной деформациям. В статье показана необходимость контроля нагрева провода и предложен алгоритм для расчёта методической погрешности, вызванной прогибами современных гибких опор. Сделан вывод о важности мониторинга прогибов опор от ветровых нагрузок и рассмотрен механизм коррекции возникающей погрешности.

Ключевые слова: мониторинг ЛЭП, интеллектуальные сети, видеоизмерения, диагностика оледенения.

Diagnosis the line icing by the optical method means controlling the line sag according to the video surveillance data. The wire is undergone by mechanical and temperature deformation during operation. The article proves the necessity of controlling the heating of the wire, and also proposes an algorithm for calculating the methodical error caused by deflections of modern flexible towers. A conclusion on the importance to monitor deflections of the towers under the influence of wind loads is done, and a mechanism for correcting the resulting error is considered.

Key words: OHL monitoring, smart grids, video measurements, icing diagnostics.

Электротехника, 2019, №5, стр.61-65

О совмещении информационного и силового каналов в кабельном кольце аэродромной светосигнальной системы

КОМЛЕВ И.В.

Рассмотрены преимущества усовершенствованных систем управления и контроля за наземным движением воздушных судов (A-SMGS). Показана необходимость модернизации существующих систем аэродромного светосигнального оборудования для реализации на их базе A-SMGS при помощи технологии пропускания информационного канала совместно с силовым. Предложена структура модернизированного решения и описаны функции добавленных в структуру блоков. Поставлен ряд задач, решение которых необходимо для достижения заданной цели. Обоснована необходимость исследования частотных свойств силовой линии, в которой будет проходить совмещённый информационный канал. Сделаны выводы и сформулированы рекомендации для дальнейшей разработки подобной системы.

Ключевые слова: аэродромная светосигнальная система, передача информации по силовой линии, сигнал в неоднородной длинной линии.

The advantages of improved control systems and ground traffic control of aircraft (A-SMGS) are considered. The necessity of modernization of the existing systems of airfield lighting equipment for implementation on their basis of A-SMGS by means of technology of transmission of the information channel together with power is shown. The structure of the modernized solution is proposed and the functions of the blocks added to the structure are described. A number of tasks are set, the solution of which is necessary to achieve a given goal. The necessity of studying the frequency properties of the power line in which the combined information channel will pass is substantiated. Conclusions and recommendations for further development of such a system are made.

Key words: airfield lighting system, airfield lighting, signal in inhomogeneous long line.

Электротехника, 2019, №5, стр.66-66

К статье Алиева И.И. «О природе электрического резонанса»

СТРЕБКОВ Д.С., ШОГЕНОВ А.Х.

Электротехника, 2019, №5, стр.66-67

Ответ автора

АЛИЕВ А.А.