

Энергоэффективная автономная электроэнергетическая установка на основе двигателя с внешним подводом тепла

КОЗЯРУК А.Е., ХИТРОВ А.А., ХИТРОВ А.И.

Использование совместного производства тепловой и электроэнергии в когенерационных установках позволяет эффективно использовать топливно-энергетические ресурсы в автономных системах энергоснабжения. В числе направлений совершенствования таких установок – использование двигателей с внешним подводом теплоты, обладающих рядом преимуществ в сравнении с другими типами тепловых машин. Когенерационная установка на базе двигателя с внешним подводом теплоты представляет собой совокупность взаимосвязанных подсистем. Основным предметом данной публикации является обоснование возможной структуры электрической части энергетической установки. Приведены общая функциональная схема когенерационной системы и схема ее электрической части, учитывающая особенности роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты. Для обеспечения режимов работы установки используются синхронная машина с постоянными магнитами и DC/DC преобразователь.

Ключевые слова: энергоэффективная автономная электроэнергетическая установка, двигатель с внешним подводом тепла, вентильный двигатель с постоянными магнитами, стартер-генератор, DC/DC преобразователь.

Simultaneous production of electrical and thermal energy on cogeneration plants allows to use fuel energy resources in autonomous power supply sources effectively. Application of the external combustion engines having several advantages over the other types of heat engines is one of the possible ways to improve cogeneration plants. Cogeneration plant based on the external combustion engine is the complex of the interrelated subsystems. The main subject of this publication is to result the possible structure of the electric subsystem. The functional diagram of the whole cogeneration system and of its electric part taking into account the features of the rotary-vane external combustion motor is considered. Permanent magnet synchronous motor and DC/DC converter are used to provide the energy system operating modes.

Key words: energy-effective autonomous energy supply system, external combustion engine, brushless DC motor, permanent magnet synchronous motor, starter-generator, DC/DC converter.

К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 2.

Сташинов Ю.П.

Приведены результаты компьютерного моделирования в MatLab-Symulink наиболее распространённых вариантов электроприводов постоянного тока с оптимальными настройками параметров с учётом естественных и искусственных ограничений на диапазон изменения переменных. Особое внимание уделено способам ограничения тока якорной цепи, влиянию ограничений на свойства электропривода, сравнительному анализу переходных процессов при пуске электроприводов. Показано, что с учётом искусственного ограничения тока якорной цепи и естественного ограничения выходного напряжения преобразователя лучшие показатели по перерегулированию и быстродействию имеет система управления с ПИ-регулятором скорости и П-регулятором тока, настроенная на модульный оптимум. Сравнимые показатели качества переходного процесса имеет одноконтурная система управления с ПИ-регулятором скорости, настроенная на модульный оптимум.

Ключевые слова: система управления, регулятор, электропривод постоянного тока, настройка, модульный оптимум.

The results of simulation in MatLab-Symulink of the most widespread variants of DC electric drives, adjusted to the modules optimum, with taking into account the natural and artificial limitations of variables, are presented. The particular attention are given to the ways of armature current limitations, the influence of limitations on electric drive characteristics and the comparative analyses of transient responses at drive starting. It is shown, that with taking into account the artificial limitation of the armature circuit current and the natural limitation of the converter output voltage, the best indexes of overshooting and speed of response has the system with a PI speed controller and a P current controller, adjusted to the modulus optimum. The similar indexes of overshooting and speed of response may be achieved in the system with a PI speed controller, also adjusted to the modulus optimum.

Key words: control system, controller, DC electric drive, adjustment, modulus optimum.

Учёт влияния электромагнитных нагрузок на главные размеры индукторных генераторов с явно выраженным зубчатым строением статора и ротора при их проектировании

РУСАКОВ А.М., СУГРОБОВ А.М., ОКУНЕЕВА Н.А., СОЛОМИН А.Н.

В статье приведены результаты расчётно- теоретических исследований по выявлению влияния электромагнитных нагрузок на коэффициент использования магнитного потока индукторных генераторов с явно выраженной зубчатой структурой статора и ротора. Получено аналитическое выражение для определения значений этого коэффициента в зависимости от электромагнитных нагрузок и геометрии зубцовой зоны генераторов при работе их на индуктивную нагрузку и произведена оценка погрешности использования этого выражения при определении главных размеров генераторов, проектируемых для работы на активную нагрузку. Показано, что коэффициент использования магнитного потока с ростом линейной нагрузки уменьшается от максимального своего значения, которое он имеет при холостом ходе, до минимального значения при коротком замыкании генератора. Определены предельные по условию реализации в проектируемых генераторах значения линейной нагрузки и магнитной индукции в зубцах статора, а также предельные значения соотношения между ними при принятой геометрии зубцовой зоны. С учётом приведённых в статье соотношений между электромагнитными параметрами индукторных генераторов произведена коррекция формулы Арнольда путём введения в неё дополняющего её сомножителя, учитывающего влияние электромагнитных нагрузок на глубину модуляции в них магнитного потока.

Ключевые слова: индукторный генератор, электромагнитные нагрузки, предельные значения электромагнитных нагрузок, коэффициент использования магнитного потока, главные размеры генераторов, МДС возбуждения, зубцовая зона, формула Арнольда.

The article presents the results of settlement – theoretical research of identification of electromagnetic loads effects on the utilization rate of the magnetic flux for inductor generators with a strong toothed structure of the stator and the rotor. An analytical formula was obtained for determining the values of this utilization rate as a function of electromagnetic loads and geometry of the generator tooth zone for operating on the inductive load. The estimation of the error of the using of this analytical formula was made for determination the main dimensions of the generators, designed for operating on resistive load. It is shown that the utilization rate of the magnetic flux with increasing linear load decreases from the

maximum of its value that it has at idle, to the minimum value that it has at short-circuit generator. It was determined: the limit values of the linear load and magnetic induction in the stator teeth, as well as the limit values of the ratio between them in the adopted geometry of the tooth zone. Taking into account the relationships described in the article between the electromagnetic parameters of inductor generators it was made the correction of Arnold's formula by introducing into it supplementing it factor, which takes into account the influence of electromagnetic loads on the depth of modulation of the magnetic flux in generators.

Key words: inductor generator, electromagnetic load, limit values of electromagnetic loads, utilization rate of the magnetic flux, main dimensions of generators, magnetomotive force, tooth zone, Arnold's formula.

Математическая модель синхронной индукторной бесподшипниковой машины как объекта управления

ДОМРАЧЕВА Ю.В., ЛОГИНОВ С.Ю.

В статье рассматривается один из видов бесподшипниковых электрических машин – синхронная индукторная бесподшипниковая машина (СИБМ). Получено упрощённое аналитическое описание статических характеристик модуля СИБМ и предложен закон управления фазой токов подвеса. Адекватность полученных выражений проверялась с помощью численного расчёта методом конечных элементов. Радиальные электромагнитные силы модуля описываются линейными зависимостями от амплитуды токов подвеса и смещения ротора в соответствующем радиальном направлении. Зависимость сил от смещения в другом (перпендикулярном) направлении упрощена. В рабочем диапазоне токов и перемещений аналитическая модель показала высокую точность расчёта. Основная составляющая вращающего момента СИБМ является квадратичной зависимостью от амплитуды тока привода. Погрешность расчёта момента по аналитической модели при центральном положении ротора и отсутствии тока в обмотке подвеса составила 1,8% во всём диапазоне тока и при любых углах нагрузки. В статье приводятся графики, демонстрирующие влияние тока подвеса и смещения ротора на вращающий момент. Предложенный закон управления фазой тока подвеса представляет собой линейную зависимость от угла поворота ротора, направления радиального смещения и угла нагрузки привода синхронной машины. Коэффициент пропорциональности между углом нагрузки и фазой тока подвеса получен приближённо. Погрешность расчёта при различных смещениях ротора оценена и представлена графически.

Ключевые слова: синхронная индукторная бесподшипниковая машина, математическая модель объекта управления, направление и амплитуда радиальной силы.

The article considers one of the types of bearingless electric machines – synchronous reluctance bearingless machine (SRBM). The simplified analytical description of the static characteristics of the SRBM module is found. Control principle of suspension current phase is suggested. Validity of the expressions is verified by finite element method design. The radial electromagnetic forces are described by linear expressions. They are depends on the suspension currents magnitude and the radial rotor displacement of corresponding direction. Forces dependence from another direction displacement was simplified. In the operating range of the currents and the displacements the analytical model has high accuracy. The main component of the SRBM torque is a square-law function of the drive current magnitude. Precision of torque estimation by the analytical model is 1,8%. The estimations were made without the rotor displacement and the current in the suspension windings. The article

presents the graphs showing influence of the suspension current and the rotor displacement on the torque. The proposed control law of the suspension current phase is a linear function of the rotor rotation angle, the radial displacement direction and the torque angle of synchronous machine. Ratio between the torque angle and the suspension current phase is obtained approximately. The calculation error at the various rotor displacements is estimated and presented graphically.

Key words: synchronous reluctance bearingless machine, mathematical model of controlled object, direction and magnitude of radial force.

Полифункциональные электромеханические преобразователи энергии технологического назначения

ЗАБЛОДСКИЙ Н.Н., ПЛЮГИН В.Е., ГРИЦЮК В.Ю., ГРИНЬ Г.М.

Рассмотрены полифункциональные электромеханические преобразователи энергии с ферромагнитным ротором, предусматривающие полное использование диссипативной энергии, структурную, функциональную и тепловую интеграцию. Особенностью таких устройств является совмещение в одной машине нескольких технологических функций. При этом ротор охлаждается сырьем, которое перерабатывается. Дополнительным охлаждающим агентом может выступать воздух и легкоплавкие материалы с высокой теплоемкостью и скрытой теплотой плавления. Показано, что практически все условные «потери» активной мощности формируют одну из составляющих полезной мощности – тепловую мощность и полезно используются в технологическом процессе. Представлена реализация принципа саморегуляции при разделении электромагнитной мощности на две составляющие полезной мощности: поток механической мощности и поток тепловой мощности. Приведены положения по безредукторному обеспечению малой частоты вращения и кратного усиления вращающего момента преобразователя, основанные на использовании взаимодействия прямых и обратных полей ведущих и ведомых модулей, изменении направления вращения поля ведомого модуля и продолжительности его действия. Обратный момент является положительным и приводит к увеличению пологости механической характеристики, как следствие, к усилению неустойчивости работы преобразователя при нагрузке. Длительности задержки включения тормозного модуля необходимо выбирать из условия достижения необходимого результирующего вращающего момента преобразователя.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, ферромагнитный ротор, интеграция, диссипативная энергия, безредукторное управление.

Considered polyfunctional electromechanical energy converters with a ferromagnetic rotor, providing for full utilization of energy dissipation, structural, functional and thermal integration. A feature of such devices is to combine in one machine more processing functions. The rotor is cooled raw material that is processed. An additional cooling agent can act air and low-melting materials with high thermal capacity and latent heat of fusion. It is shown that almost all conventional «loss» of active power form one of the components of the net power – power and useful heat used in the process. Presented implementation of the principle of self-regulation in the separation of electromagnetic power at the two components of the net power: mechanical power flow and the flow of heat output. Given the position of gearless ensure low speeds and enhance multiple torque converter based on the use of the interaction of direct and inverse field input and output modules, changing the direction of rotation of the field slave module and its duration. Reverse moment is positive and leads to increased mechanical characteristics of flatness, consequently, to increased instability of the converter load. The long delay of the

braking module must be chosen from the condition of achieving the necessary result of torque converter.

Key words: electromechanical transformer, ferromagnetic rotor, integration, dissipative energy, gearless control.

Электромагнитные процессы в силовых трансформаторах с векторным управлением ХОХЛОВ Ю.И., САФОНОВ В.И., ЛОНЗИНГЕР П.В.

Рассмотрена одна из возможных схем силового трансформатора с векторным управлением. Приведены исходные положения анализа электромагнитных процессов в таких трансформаторах, описан алгоритм получения временных зависимостей токов и напряжения и характеристик. Показаны зависимости характеристик силового трансформатора с векторным управлением от управляющих параметров на примере трансформатора с номинальной мощностью 16 МВА и напряжением питающей сети 110 кВ, сделан вывод о наличии минимума потерь активной мощности при определенном сочетании управляющих параметров. Показаны временные диаграммы токов и напряжений силовых ключей, входящих в состав трансформатора активных преобразователей, полученные методом математического моделирования в среде MATLAB Simulink, и сделан вывод об адекватности предлагаемой математической модели.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, силовой трансформатор, векторное управление, преобразователь напряжения, широтно-импульсная модуляция, MATLAB, Simulink.

A possible circuit diagram of a Power transformer with vectorial control was considered. Initial statements of an electromagnetic analysis of the transformers were shown. An algorithm of a determination of voltage and current time dependences and key transformer's performances was proposed. Plots of performances as functions of control parameters of a transformer with nominal power 16 MVA and nominal network voltage 110 kV were produced. There is the combination of control parameters with minimal power losses in whole system. Time dependences of power keys' voltages and currents of internal voltage sourced converters modeled in MATLAB Simulink were displayed and mathematic model's validity was confirmed.

Key words: electromagnetic processes, power transformer, vectorial control, voltage sourced converter, pulse-width modulation, MATLAB, Simulink

Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения

ХВАТОВ О.С., ДАРЬЕНКОВ А.Б.

На различных транспортных объектах в последнее время все чаще применяются системы электродвижения. При этом тяговые электродвигатели могут получать питание вместе с другими потребителями от единой электростанции автономного объекта (ЕЭС). Применение ЕЭС повышает надежность и упрощает обслуживание энергосистемы автономного объекта за счет уменьшения числа составляющих ее компонентов. Как правило, ЕЭС строится на базе дизель-генераторных установок (ДГУ) постоянной частоты вращения. Повышение экономичности электростанции возможно за счет применения ДГУ переменной частоты вращения. В этом случае экономия топлива достигается за счет формирования для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива. Перечень

отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных данной тематике достаточно мал, особенно это относится к исследованиям динамических режимов работы, разработке математической модели объекта, синтезу системы регулирования ЕЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения. В статье авторы обращаются к исследованию вышеуказанных вопросов. Представлены разработанная математическая и имитационная модели ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения, а также результаты моделирования.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, синхронная машина, преобразователь частоты.

At various transport objects the electric propulsion system has been used more often recently. At the same time traction electric motors can receive the supply together with other consumers of a uniform power station of the self-supporting object (UPS). The application of UPS increases the reliability and simplifies the maintenance of every system of a self-supporting object at the cost of the reduction in a number of its constitutive components. As a rule, UPS's building is based on diesel-generator sets (DGS) with constant rotation frequency. Increasing a power station's efficiency is possible at the expense of DGS with constant rotation frequency. In this case the economy of fuel is achieved owing to forming of the optimal shaft rotation frequency of the internal combustion engine, corresponding to the lowest brake specific fuel consumption, for each value of load power. The list of domestic and foreign published works devoted to this topic is rather short especially concerning the research of the dynamic mode of work, the development of a mathematical model of an object and the synthesis of UPS's control system based on alternating rotation frequency. In the article the authors address research of the above-mentioned problems. There are represented elaborated mathematical and imitating UPS's models of a self supporting object based on DGS of alternating rotation frequency and the results of modeling.

Key words: power station, diesel-generator, synchronous generator, converter.

Особенности обработки мелкодисперсного порошка диоксида кремния в струе низкотемпературной плазмы

Новиков И.Н.

В работе описываются особенности процесса обработки мелкодисперсного порошка диоксида кремния в струе высокочастотного индукционного (ВЧИ) плазматрона. Исследования проведены на опытно-промышленном ВЧИ плазматроне мощностью 1000 кВт, частотой 440 кГц. Показаны общие принципы построения установки с использованием ВЧИ плазматрона. Обоснован выбор обрабатываемого материала, приведены области его применения. Обозначены параметры разрядной камеры. Большое внимание уделено регулировочным характеристикам процесса обработки материала, связанным с вводом порошка в рабочую зону. В результате исследований были установлены значения регулировочных характеристик для осуществления оптимального технологического процесса.

Ключевые слова: ВЧИ плазматрон, регулировочные характеристики, диоксид кремния.

Specifics of processing fine silica in a high-frequency induction plasmatron jet are described in this article. The investigations were made by experimental-industrial HF induction plasmatron power of 1000 kW, a frequency of 440 kHz. The general principles of construction of the plant using HF induction plasmatron have been shown. The choice of the processed material is proved. The parameters of the discharge chamber have been given. Great attention is paid to

the adjustment characteristics of the process material associated with the input of powder into the working area. The investigations results show values of the adjustment characteristics for optimum technological process.

Key words: HF induction plasmatron, adjustment characteristics, silica.

Нелинейные свойства коэффициентов передачи по напряжению и току дуговых сталеплавильных печей

КРУЧИНИН А.М.

Изложен метод расчета градиента напряжения дуги дуговой сталеплавильной печи (ДСП), как базисной характеристики в исследованиях и моделировании автоматической системы регулятора мощности ДСП. Характеристика градиента напряжения дуги ДСП является сильно нелинейной многофакторной функцией, зависящей от электрических параметров системы электропитания, теплового режима и процессов теплообмена дуги в плавильной ванне ДСП. Учет взаимосвязи электрического и теплового режимов ДСП в методике расчета функции градиента напряжения дуги позволяет описать ее физически обоснованные нелинейные свойства и, в частности, получить уточненные выражения коэффициентов передачи ДСП, как объекта управления, по каналам тока и напряжения дуги как нелинейных многофакторных функций. Многофакторность проявляется в их зависимости от параметров схемы замещения электрического контура печи и условий теплообмена дуги в плавильном пространстве, меняющихся в процессе плавки стали. Метод позволяет также решить проблему неопределенности длины дуги в моделировании системы регулятора мощности ДСП. Установленная зависимость тока и напряжения дуг от перемещения электрода и длины дуг позволила выявить и объяснить причину неустойчивости работы печи в режиме с высоким значением импеданса, определить минимально допустимое значение тока дуги в процессе управления мощностью ДСП при значениях ниже которого автоматическая система регулятора мощности теряет устойчивость, что приводит к погасанию дуги.

Ключевые слова: электрическая дуга, дуговые сталеплавильные печи, теория нагрева электрической дугой.

The article describes the calculation method of the arc voltage gradient as a basic characteristic used in the study and simulation of the arc steel-melting furnace capacity controller automatic system. The arc voltage gradient characteristic of an arc steel-melting furnace represents a highly nonlinear multifactorial function depending on the electrical parameters of the electric power supply system as well as on the thermal conditions and heat-exchanging processes inside the molten bath of an arc steel-melting furnace. The allowance for the interrelation between the electrical and thermal conditions in the arc steel-melting furnace in the presented method of calculation of the arc voltage gradient function permits to describe its physically relevant nonlinear properties and more specifically to obtain improved expressions of the transfer ratios of an arc steel-melting furnace as a controlled object using the arc current and voltage channels as nonlinear multifactorial functions. The multifactoriality of the functions manifests in their dependence on the parameters of the substitutional connection of the furnace electrical circuit varying in the steel melting process; on the arc heat-exchanging conditions in the furnace melting chamber. The method outlined in the article also allows solving the issue of the arc length indeterminacy in the simulation of the arc steel-melting furnace capacity controller system. The defined dependence of the arc current and voltage on the electrode movement and the arc length allowed to find and to clarify the cause of the furnace unstable operation in the high impedance operating mode. To define the minimum

permissible value of the arc current in the process of the arc steel-melting furnace capacity control at the values below which the capacity controller automatic system loses its stability causing the arc extinction.

Key words: electrical arc, electric arc furnaces, a theory of electrical arc heating.

Определение параметров экранированного шинпровода с прямоугольной монолитной шиной в установившемся режиме при синусоидальном токе

НОСОВ Г.В., ТРОФИМОВИЧ К.А.

Предложена методика определения параметров экранированного шинпровода с прямоугольной монолитной шиной в установившемся режиме при синусоидальном токе. При этом рассчитываются сопротивления, индуктивности, индукции магнитного поля, индуцированный ток в экране, напряжение шины, которые находятся с учетом частоты синусоидального тока, материалов шины и экрана. Разработанная методика получена на основе уравнений электромагнитного поля, которые могут быть запрограммированы, например, в среде Mathcad для инженерного расчета параметров шинпроводов при их автоматизированном проектировании. Достоверность методики подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчета сопротивления и индуктивности с результатами, полученными при помощи программы компьютерного моделирования Elcut.

Ключевые слова: параметры, экран, шина, сопротивление, индуктивность.

Proposed a method for determining the parameters of a shielded track with a rectangular monolithic bus in the steady state at sinusoidal current. Thus calculated impedances, inductances, magnetic inductions, induced by the current in the screen, the bus voltage, which are subject to the impact frequency sinusoidal current, materials of tire and screen. The developed method was obtained on the basis of equations of the electromagnetic field, which can be programmed, for example, in Mathcad for engineering calculations of the parameters of busbars for their computer-aided design. The accuracy of the method is confirmed by a satisfactory agreement between the calculation of resistance and inductance with the results, obtained by means of computer simulation program Elcut.

Key words: parameters, screen, bus, resistance, inductance.

Расчет переходных процессов в электрических цепях на основе использования полиномов Чебышева

ТИХОВОД С. М.

Переходные электромагнитные процессы в электротехнических системах представляют значительную опасность для оборудования, а также влияют на надежность релейной защиты, поэтому исследование этих процессов актуально. Моделирование переходных процессов в трансформаторах в настоящее время выполняют путем составления и решения уравнений состояния для магнитоэлектрических схем замещения, которые объединяют электрические и магнитные цепи этих устройств, с учетом их взаимодействия друг с другом. Моделирование этих процессов может быть весьма продолжительным при использовании современных программных средств. Цель данной статьи – разработка метода ускоренного расчета переходных электромагнитных процессов, использующего полиномиальную аппроксимацию решения, а также разработка схемной модели метода, создающей для инженеров удобство при моделировании. На основе разложения решения уравнений состояния в ряд по ортогональным полиномам Чебышева разработан

метод расчета переходных процессов в электрических цепях. Предложена схемная интерпретация разработанного метода. Показано, что в специальной схеме замещения справедливы законы Кирхгофа для изображений токов и магнитных потоков в виде векторов, содержащих значения коэффициентов разложения этих величин по полиномам Чебышева. Данный метод позволяет заменить операции с мгновенными значениями токов операциями с постоянными токами в предложенной схеме замещения, в результате чего интегро-дифференциальные уравнения состояния заменяются алгебраическим уравнениям. При расчете предложенным методом переходного процесса в однофазном трансформаторе процессорное время сокращается более чем в два раза по сравнению с расчетами известными методами. Предложенный метод особенно удобен для расчета переходных процессов в магнитоэлектрических цепях, так как позволяет использовать источники напряжения, управляемые производной тока, а также позволяет легко вычислять интегралы решений.

Ключевые слова: полиномы Чебышева, переходные процессы, схемная интерпретация, магнитоэлектрические схемы замещения.

Transient electromagnetic processes in electrical systems is a significant risk to the equipment and have influence on the reliability of relay protection, therefore the investigation of these processes is actual task. Transient modeling in transformers is presently executed by forming and solution of the state equations for the magneto-electrical equivalent schemes that unite electric and magnetic circuits of these devices, taking into account the interaction with each other. Modeling of these processes can be quite long when using modern software. An aim of the given work is development of more fast-acting method of calculation of electromagnetic transients, using a polynomial approximation of the solution, and also development of scheme model of method that creates convenience for engineers in modeling. Based on the expansion of the solution of state equations in series of orthogonal Tchebyshev's polynomials the method calculation of transients in electric circuits is developed. Scheme interpretation of the developed method is offered. It is shown that in the special equivalent scheme the Kirchhoff's laws are just for the images of currents and magnetic fluxes as vectors, containing the values of coefficients of decomposition of these values by the Tchebyshev's polynomials. The given method allows replacing operations with the instantaneous values of currents by operations with direct currents in offered equivalent scheme. At a calculation by an offered method of transient in a single-phase transformer processor time grows short more than in two times as compared to calculations by well-known methods. The given method is especially comfortable for the transient's calculation in magneto-electrical circuits, since allows as using voltage sources controlled by the current derivative as easily calculating the integrals of solutions.

Key words: Chebyshev's polynomials, transients, circuit interpretation, magneto-electric equivalent circuits.