

*Электротехника, 2015, №1, стр. 2-4*

**Кафедра автоматизированного электропривода ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» вчера и сегодня**  
АНУЧИН А.С., СЕРГИЕВСКИЙ Ю.Н.

*Электротехника, 2015, №1, стр.5-8*

**Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта**

АЛЯМКИН Д.И., АНУЧИН А.С., КОЗАЧЕНКО В.Ф., ЛАШКЕВИЧ М.М., ОСТРИРОВ В.Н.

Рассмотрено текущее состояние дел в области отечественного гибридного транспорта. Показаны возможные пути улучшения показателей гибридных трансмиссий за счет оптимизации тягового электропривода, числа колес, тягового генератора и объема суперконденсаторных накопителей, создания новых типов аккумуляторных батарей и полностью электрического транспорта с зарядкой на остановках и резервным источником питания в виде двигателя внутреннего сгорания ограниченной мощности. Рассмотрены особенности оптимизации по типовым циклам и показана необходимость рассмотрения реальных циклов работы трансмиссии для задач оптимизации.

*Ключевые слова:* гибридный и электрический транспорт, оптимизация структуры электротрансмиссии, накопитель энергии, гибридная трансмиссия.

This paper considers the current state in the field of Russian hybrid vehicle development and production. The possible ways of the hybrid powertrain optimization are shown including: traction drive and the number of driving wheels optimization, generator type optimization, variation of the super-capacitor size and use of the novel types of batteries. The advantages of fully electrical buses with charging on the bus stops with the auxiliary internal combustion engine as an emergency energy source are shown. The features of the optimization on typical driving cycles are considered and the advantages of the real driving cycle for optimization are given.

*Key words:* hybrid and electric vehicles, powertrain structure optimization, energy storage, hybrid powertrain.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 9-12*

**Разработки прецизионной мехатроники в ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»**

БАЛКОВОЙ А.П., РАССУДОВ Л.Н., СЛИВИНСКАЯ Г.А., ТОЛСТЫХ О.А., ТЯПКИН М.Г., ТЯПКИН Г.М., ЦАЦЕНКИН В.К.

Рассмотрены основные разработки кафедры автоматизированного электропривода НИУ МЭИ в области прецизионной мехатроники. Кратко описывается история работ, идеология построения точных мехатронных устройств и некоторые перспективные задачи их исследования.

*Ключевые слова:* прецизионная мехатроника, вентильный двигатель, измерительные системы, калиброванное управление.

The paper presents the main researchers in the field of precision mechatronics at the Electric Drive Department of National Research University Moscow Power Engineering Institute. Brief description of the history of development, the ideology of design of precision mechatronic devices and some long-term objectives of their research are represented.

*Key words:* precision mechatronics, brushless motor, measuring system, calibrated control.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 13-16*

### **Проблемы внедрения и наладки современных электроприводов**

ОСИПОВ О.И.

С учетом опыта внедрения в эксплуатацию автоматизированных электроприводов (АЭП) переменного и постоянного токов рассмотрены основные проблемы обоснования их мощности, согласования с питающей сетью, наладки, диагностирования и обеспечения электромагнитной совместимости. Непрерывное совершенствование элементной базы АЭП и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в направлении снижения мощности управления при резком увеличении динамических свойств элементов, увеличения мощности и числа дискретных полупроводниковых преобразователей привело к росту соотношения между мощностью силовой части АЭП и мощностью управления его элементами до 1020. В этих условиях заметно обострилась проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) элементов АЭП и АСУ ТП, когда электромагнитные помехи оказываются соизмеримыми с полезными сигналами управления и являются причиной неисправности как отдельных элементов, так и всей системы управления. Представлен ряд мер по обеспечению ЭМС элементов АЭП и экспериментальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в районе их расположения.

*Ключевые слова:* автоматизированный электропривод, электрические преобразователи, наладка, электромагнитная совместимость, диагностирование.

Based on the experience of implementation of AC and DC automated electric drives (AED), the actual problems of their power justifying, matching with the mains, adjustment, diagnostics and electromagnetic compatibility are considered. Continuous improvement of the element base for AED and APCS (automated process control system) towards reducing the power of the control system with essential increasing of the dynamic properties of the elements, growth of the number and power of discrete power converters has led to the increase in the ratio between the output power of AED and the power of its control system to 1020. In these conditions the problem of electromagnetic compatibility (EMC) of the elements of AEP and APCS significantly worsened: electromagnetic interference signals became commensurable with the valuable control signals and cause malfunction of either individual elements or the entire control system. The article presents a number of measures to ensure EMC of AED elements and shows the experimental values of the intensities of electric and magnetic fields in the area of the elements location.

*Key words:* automated electric drive, electrical converters, adjustment, electromagnetic compatibility, diagnostics.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 17-22*

### **Влияние девиации скорости шпинделя на точность станков некруглого точения с быстродействующими электроприводами подачи**

НИКОЛЬСКИЙ А.А.

Такие массовые изделий машиностроения, как поршни ДВС, имеющие сложную овально-бочкообразную форму, обрабатываются на станках некруглого точения с быстродействующими электроприводами подачи. Показано, что к главным приводам станков некруглого точения должны предъявляться повышенные требования по точности поддержания заданной частоты вращения шпинделя. Получены оценки погрешностей формы изделий некруглого точения, вызванных девиацией скорости шпинделя, которые при типовых требованиях по точности поддержания скорости главного привода могут значительно превышать допуски на изделия. Для компенсации этих погрешностей предложен метод фазовой коррекции задающего воздействия на

привод поперечной подачи. Фазовая коррекция выполняется с помощью звена опережения-запаздывания на время, пропорциональное наблюдаемой девиации скорости шпинделя относительно ее заданного значения. Использование разработанного метода на порядок снижает «скоростные» ошибки формы и позволяет применять для систем некруглого точения базовые токарные станки с типовыми требованиями к точности поддержания скорости шпинделя.

*Ключевые слова:* станки некруглого точения, электроприводы подачи, обработка поршней ДВС, девиация скорости шпинделя, точность формы поршней.

Mass engineering products, as pistons engine with a complex oval barrel shaped, machined at noncircular turning with fast electric drives of filing. It is shown that the for drives of spindle the non-circular-turning lathe cont be offered higher accuracy requirements maintain the desired spindle speed. Given a error estimates of non-circular turning forms of products caused by deviation of the spindle speed. To compensation for these errors proposed the method to be used in systems of non-circular turning-machines with standard requirements for spindle speed.

*Key words:* machining piston of engine, drives for noncircular turning lathes, deviation of spindle speed, precision forms of pistons.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 22-25*

### **Развитие теории предельного по быстродействию регулирования в электроприводе с вентильными преобразователями**

ЛАДЫГИН А.Н., БОГАЧЕНКО Д.Д., ХОЛИН В.В.

Статья посвящена вопросам построения быстродействующих систем управления электроприводами с преобразователями на силовых электронных ключах. Раскрыты исторические аспекты развития этих вопросов теории на кафедре электрорегулируемого электропривода МЭИ и их сегодняшняя актуальность. Рассматриваемые преобразователи являются объектами управления дискретного типа, что необходимо учитывать при синтезе системы управления. Показано, что предельное быстродействие регулирования в таких системах при отсутствии ограничений составляет конечное число интервалов дискретности равное порядку системы. Рассмотрены два актуальных принципа построения систем, обеспечивающих предельное быстродействие: с использованием прогнозирующей модели, работающей в реальном времени и в ускоренном масштабе времени. Поскольку качество работы таких систем определяется адекватностью прогнозирующей модели объекта регулирования, рассмотрены подходы к созданию алгоритмов самонастройки, позволяющие корректировать модель в процессе работы.

*Ключевые слова:* электропривод, силовой преобразователь, предельное быстродействие, управление с прогнозированием по модели.

Artide is devoted to the problems of construction of high-speed control systems of electric drives with the switch-mode power converters. Historical aspects of development of these questions at Electric Drive department of MPEI and their current urgency are shown. The described converters are control objects of discrete type that should be considered in the synthesis of the control systems. It is shown that dead-beat control in such systems in the unconstrained case makes final number of sampling intervals equal to the system order. Two actual principles of construction of the systems providing dead-beat control are considered: using a predictive model that works in real time, and the model of working in an accelerated time scale. As the quality of such systems operation is defined by the adequacy of predicting model of controlled object, approaches to creation of the self-adjustment algorithms,

allowing to correct the model during operation, are considered.

*Key words:* electric drive, power converter, dead-beat control, model prediction control.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 26-28*

#### **Развитие систем управления электроприводами с упругими связями**

БЛАГОДАРОВ Д.А., КОСТИН А.А., РЕЗНИКОВСКИЙ А.М., САФОНОВ Ю.М., ЧЕРНИКОВ С.Ю.

Дано определение динамической жесткости механической характеристики электропривода. Описано развитие систем управления электроприводами с упругими связями, приведена структура электропривода, выполненного на базе нечеткого регулятора с применением наблюдателя состояния. Сделан вывод, что для наилучшего демпфирования упругих колебаний в системах с распределенными параметрами механической части подходит система управления с использованием нейронных сетей.

*Ключевые слова:* электропривод с упругими связями, система управления, демпфирование колебаний, нечеткое управление, нейронная сеть.

The definition of the dynamic stiffness of the torque-speed curve of the electric drive is presented. Considered the evolution of the control system for electric drive with elastic mechanics and the structure for the drive with fuzzy-logic control and state observer is given. It was shown that the better damping can be achieved with the neural network control system.

*Key words:* electric drive with elastic mechanics, control system, damping, fuzzy-logic control, neural network.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 29-37*

#### **Регулировочные возможности базовых конфигураций вентильно-индукторных двигателей для тяговых электроприводов**

БЫЧКОВ М.Г., КУЗНЕЦОВА В.Н., ВАСЮКОВ С.А., КРАСОВСКИЙ А.Б.

Специфика тяговых электроприводов наряду с высокими удельными показателями мощности и момента требует достаточно большого диапазона регулирования скорости с постоянством выходной мощности. Для традиционных электродвигателей это обычно достигается применением двухзонных систем регулирования с ослаблением магнитного потока. Вентильно-индукторный электродвигатель с самовозбуждением (ВИД), имеющий предельно простую, технологичную и надежную конструкцию, обладает лучшими удельными показателями в области средних и высоких мощностей по сравнению с традиционными электродвигателями, но его регулировочные свойства и предельные характеристики в зоне выше номинальной скорости ещё недостаточно исследованы. Для ВИД задаваемые отношением числа зубцов статора к числу зубцов ротора, существенно влияют на его электромеханические характеристики. В статье для базовых конфигураций ВИД 6/4 и 8/6 определены максимальные значения скоростей при одинаковых номинальной скорости, выходной мощности и главных размерах магнитной системы. На имитационной модели ВИД в среде MATLAB – Simulink показано, что поддержание постоянства выходной мощности при увеличении скорости ВИД достигается смещением углов включения и отключения фаз в сторону опережения. Для выбранных условий сравнения получено, что при заданных параметрах, обеспечивающих равенство моментов на низких скоростях, при номинальной скорости выходная мощность ВИД 8/6 на 20% больше, чем у ВИД 6/4. При этом достижимый диапазон изменения скорости с постоянством выходной мощности у ВИД 6/4 равен

4,5:1, у ВВД 8/6 – на 10% больше. Если же на номинальной скорости уравнивать мощности за счёт уменьшения интервала работы фаз ВВД 8/6, то его диапазон увеличивается до 7,9:1, что является существенным преимуществом для некоторых транспортных применений.

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный двигатель, регулирование момента и скорости, постоянство выходной мощности, тяговый электропривод.

The specificity of traction electric drives demands high power-to-weight ratio and rather large range of speed regulation with constant output power. For traditional electric motors this is achieved by using two-region regulation systems with magnetic flux weakening. Switched Reluctance Motor (SRM) having extremely simple, technological and reliable design, the best power-to-weight ratio for average and high power ratings in comparison with traditional electric motors. But its adjusting properties and limit characteristics in the zone above rated speed are still insufficiently studied. For SRM numbers of stator and rotor teeth varied within a wide range significantly modify its electromechanical characteristics. In the article the maximum values of speed are defined for basic SRM 6/4 and 8/6 that constant output power mode is reached by shifting phases turn-on and turn-off angles towards advancing. The analysis results show that at the set parameters, providing equality of the torques at low speeds, near rated speed the output power of SRM 8/6 is 20% more, than SRM 6/4. At these parameters the achievable speed change range with constant output power for the SRM 6/4 is equal to 4.5:1, and for the SRM 8/6 it is 10% more. If at a rated speed equalize the output power of both SRMs by reduction of turn-on interval of SRM 8/6 phases, its range increases to 7.9:1 that is essential advantage for some transport applications.

*Key words:* switched reluctance motor, speed and torque control, constant output power, traction electric drives.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 38-41*

#### **Безредукторные электроприводы с низкочастотными асинхронными двигателями**

МАСАНДИЛОВ Л.Б., КУРАЕВ Н.М., КУЗИКОВ С.В., ФУММ Г.Я.

Рассматриваются низкочастотные асинхронные двигатели. Приводятся их математическое описание, методика расчетов их статических и динамических характеристик с использованием обобщенных параметров. Указаны отличительные особенности выполнения и параметров таких двигателей. Для общего случая и на конкретном примере выявлены преимущества использования низкочастотных асинхронных двигателей в безредукторных электроприводах. Рассмотрены вопросы практического применения электроприводов с низкочастотными двигателями для лифтовых установок.

*Ключевые слова:* низкочастотный асинхронный двигатель, безредукторный электропривод, математическое описание, обобщенные параметры, лифтовые установки.

This paper considers low frequency induction machines. Their mathematical description is given and the method of their torque and current curves calculation using generalized parameters for statics and dynamics is presented. The main principles of their construction and parameters range are shown. The advantages of low frequency induction motors for direct drives are considered. The practical aspects of low frequency induction motor installation for lifts are shown.

*Key words:* low frequency induction motor, direct drive, mathematical description, generalized parameters, elevator installations.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 42-47*

**Испытательная лаборатория электротехнических изделий кафедры «Автоматизированный электропривод» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».** Научные исследования, испытания и разработки  
БЫЧКОВА Е.В., ЛАДЫГИН А.Н., ОДНОРОГ Д.А., ПРУДНИКОВА Ю.И., РОМАНОВ А.М., СЕРГИЕВСКИЙ Ю.Н., СОКОЛОВ А.С.

При исследовании, разработке и продвижении на рынок электроприводов и их основных узлов – двигателя, силового преобразователя, трансмиссии и системы управления необходимым этапом является эксперимент. Его задачи – проверка, сопоставление и отработка технических решений, всесторонние испытания опытно-промышленных и серийных образцов продукции. Системный характер электропривода возлагает основную ответственность на звено задания и измерения момента и скорости экспериментальной установки. На кафедре автоматизированного электропривода МЭИ разработаны и используются методы и средства комплексных электрических, электромеханических и энергетических испытаний, позволяющие обеспечить точность задания момента и скорости от 0,1 до 10% в зависимости от задач исследования. Аккредитованная испытательная лаборатория электротехнических изделий МЭИ оснащена также комплексом оборудования для измерения температуры, шума и вибрации, степени защиты IP, а также испытаний на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Проводимая кафедрой разработка национальных и межгосударственных стандартов, гармонизированных со стандартами МЭК и ИСО, позволяет учитывать и использовать самые современные требования к качеству.

*Ключевые слова:* электропривод, исследования и испытания, задание и измерение момента на валу, механические и климатические испытания, гармонизация международных стандартов

Experiment is a necessary stage in power drive system studying, developing and marketing. The main task of the experiment whether it be checking, comparison and development of technical solutions – comprehensive tests of pilot and production samples. The system nature of the drive as signs primary responsibility on the load torque and speed control and measuring unit of the experimental equipment. Methods and tools of complex electrical, electromechanical and power tests were developed at the MPEI electric drive department. These methods allow ensuring the accuracy of the torque and the speed references from 0.1 to 10% depending on the objectives of the study. Accredited for technical competence and independence, the MPEI electrical equipment testing laboratory includes also a set of temperature, noise and vibration measuring equipment, degree of protection IP, as well as for tests for resistance to mechanical and climatic influences. All the seards allow making comprehensive assessment of the products quality. In addition the Department pursues the development of national and interstate standards harmonized with the standards of IEC and ISO.

*Key words:* power drive system, researches, tests, shaft torque measurement, torque assignment, mechanical and climatic tests, international standards unification.

*Электротехника, 2015, №1, стр.48-52*

**Модернизация курса «Системы управления электроприводами» на кафедре автоматизированного электропривода ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»**  
АНУЧИН А.С., САВКИН Д.И.

В статье изложен опыт кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ» по проводимой модернизации курса «Системы управления электроприводов». Рассмотрены требования к данному курсу и проблемы сложившейся методики преподавания. Рассмотрена модифицированная структура курса с систематизированной подачей изучаемого материала.

Приведено описание лабораторной базы и ее возможностей с использованием преобразователей напряжения и преобразователей частоты со свободно конфигурируемой системой управления. Предложено в рамках курсового проекта использовать программную модель электропривода, для которой студентам необходимо создать систему управления. Проект с моделями электроприводов постоянного тока, асинхронного электропривода и электропривода с синхронной машиной с постоянными магнитами для среды Code Composer Studio выложен в открытом доступе.

*Ключевые слова:* системы управления электроприводов, лабораторная база, курсовое проектирование, программная модель электропривода.

This paper deals with experience of “Control systems of electric drives” course modernization at the Electric Drive Department of Moscow Power Engineering Institute. The demands for new course and the problems of the existing methodology are described. The structure of the new lecture course is presented. The description of the laboratory equipment is given and the advantages of the converters for direct and alternating current with freely configurable control structure are shown. It is proposed to use software electric drive model for the course project fulfillment. The project with software models for direct current, induction and synchronous permanent magnet motor drives for Code Composer Studio is in the open access.

*Key words:* control systems of electric drive, laboratory equipment, course project, software electric drive model.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 53-58*

#### **Характеристики вентильного двигателя переменного тока**

БАЛКОВОЙ А.П.

Дается определение вентильного двигателя переменного тока (ВДПТ), рассматриваются структура системы управления, математическое описание. Определяются параметры ВДПТ. Приводится уравнение механической характеристики ВДПТ с учетом ограничений по току, напряжению, размагничиванию. Рассматривается токовое управление ВДПТ по статической модели в зонах постоянства момента и ослабления потока.

*Ключевые слова:* вентильный двигатель переменного тока (ВДПТ), механическая характеристика, токовое управление ВДПТ с ослаблением потока.

There is a definition of the brushless AC motor (BLACM). There are represented: the control system structure and the mathematical description. The parameters of BLACM are represented. The equation of mechanical characteristics including current, voltage and demagnetization constraints is represented. The current control of BLACM based on a static model in the areas of constant torque and flux weakening area is represented.

*Key words:* brushless AC motor (BLACM), mechanical characteristic, current control of BLACM with flux weakening.

*Электротехника, 2015, №1, стр. 59-64*

#### **Реализация и испытания новой перспективной системы генерации электроэнергии переменного тока для воздушных судов**

АНУЧИН А.С., БЕЛЯКОВ Ю.О., ГАБИДОВ А.А., КОЗАЧЕНКО В.Ф., КУЛЬМАНОВ В.И., ОСТРИРОВ В.Н.

Рассмотрены вопросы проектирования и испытаний системы управления преобразователя

частоты для системы электроснабжения переменного тока воздушных судов. Показаны топологии возможных силовых схем и обоснован выбор схемы с тремя изолированными мостовыми преобразователями. Для выбранной схемы представлена функциональная схема системы управления и компенсации искажений, вносимых в выходное напряжение инвертором, нагрузкой и синусным фильтром. Рассмотрены практические аспекты программной реализации системы управления и низкоуровневой оптимизации кода для обеспечения требуемого времени выполнения алгоритма регулирования. Приведены результаты испытаний без компенсации гармоник и с выборочной компенсацией заданных гармоник. Для режимов номинальной нагрузки и нелинейной нагрузки приведены форма и спектральный состав выходного напряжения.

*Ключевые слова:* система электроснабжения воздушного судна, преобразователь, синусный фильтр, компенсация гармонических искажений, система управления.

This paper deals with the design and tests of the aircraft AC power supply converter control system. The possible topologies of power converters are shown and the appropriate topology with three independent half-bridge inverters is justified. The control scheme with inverter non-idealities and non-linear load compensation for selected topology is presented. The practical aspects of the control system software design are shown and low level code optimization to decrease computation time of the control algorithm is presented. The test results without and with selected harmonic compensation are shown. The form of the voltage and its spectrum are given for full load and non-linear load.

*Key words:* aircraft power supply system, power converter, sine-filter, harmonic distortion compensation, control system.