

## **Повышение энергетических показателей и качества напряжения сети средствами силовой электроники**

ГЕЛЬМАН М.В.

Рассмотрены возможности повышения энергетических показателей вентильных преобразователей при фазовом регулировании, импульсной модуляции на высокой и низкой частоте. Применение схемных решений, специальных способов управления и искусственной коммутации обеспечило в ряде случаев существенное снижение потребления реактивной мощности, но не позволило в достаточной степени решить проблему высших гармоник и обеспечить потребление из сети синусоидального тока. Особое внимание уделено применению активного выпрямителя напряжения. Устройства, обеспечивающие электроснабжение каких-либо потребителей и одновременно повышающие энергетические показатели всей системы электроснабжения и качество напряжения в ней названы активными выпрямителями-компенсаторами пассивной мощности. Они управляются так, чтобы суммарный ток, потребляемый из сети всеми потребителями, приближался к оптимальному, т.е. чтобы ток был синусоидальным и имел заданный угол сдвига относительно напряжения (например,  $\varphi = 0$ ). Уменьшить колебания напряжения сети можно, сделав управление группой преобразователей переменного напряжения с импульсной модуляцией на низкой частоте и активной нагрузкой зависимым от изменения тока сети. Показаны преимущества комбинированной системы электроснабжения переменного и постоянного тока.

*Ключевые слова:* активный выпрямитель напряжения, активный выпрямитель-компенсатор, импульсная модуляция, реактивная мощность, мощность искажения, комбинированная система электроснабжения, качество напряжения.

The possibilities of improving energy performance of valve inverters in the phase regulation, pulse modulation at high and low frequency are considered. Application of circuit design, special control methods and artificial commutation in some cases provide a significant reduction of reactive power consumption, but not allow to solve the problem of higher harmonics sufficiently and to ensure consumption of network sinusoidal current. Particular attention is paid to the application of the active voltage rectifier. Devices that provide any electricity consumers and simultaneously increasing overall system power supply and voltage quality in it are called active rectifiers – reactive power compensators. They are controlled so that the total current consumption of all network users is close to the optimum, i.e., that the current should be sinusoidal and have a predetermined shearing angle to the voltage (e.g.,  $\varphi = 0$ ). Reduction of the mains voltage fluctuations can be made with the control of a group of AC voltage converters with pulse modulation at a low frequency and active load depended on changes of the current network. The advantages of the combined AC and DC power supply system power are shown.

*Key words:* voltage rectifier, active rectifier-compensator, pulse modulation, reactive power, distortion power, combined power system, voltage quality.

## **Особенности схем силовых цепей полупроводниковых преобразователей для питания синхронных реактивных машин**

ГРИГОРЬЕВ М.А.

Предложены схемы силовых цепей синхронных реактивных электроприводов независимого возбуждения. Показано, что количество ключей определяется числом фаз и лежит в диапазоне от до . Методами регрессионного анализа установлено, что удельная цена на полупроводниковые преобразователи при малых значениях тока не зависит от тока и определяется стоимостью микропроцессорной системы управления. При токах, больших 100 А, зависимость между ценой и током приближается к линейной, поэтому отказ от трехфазной конфигурации силовых цепей полупроводникового преобразователя и переход к многофазной конфигурации не приводят к увеличению массогабаритных показателей источника питания. Таким образом, усложнение конфигурации схем силовых цепей (увеличение количества фаз) для технологических установок с установленной мощностью более 200 кВт позволяет улучшить массогабаритные показатели электромеханического преобразователя при сохранении габаритов полупроводникового преобразователя.

*Ключевые слова:* полупроводниковые преобразователи частоты, многофазность, удельные массогабаритные показатели.

The article presents the mains scheme of the field regulated reluctance machine. It is shown that the number of switches is defined by the number of phases and lies in the range from 2m to 4m. By regression analysis it is found that the semiconductor converter unit price for small values of the current does not depend on the magnitude of the current and is determined by the price of the micro-processor control system. When the current is greater than 100 A, the relationship between the price and the current is nearly linear, so the rejection of the three-phase power circuit configuration of a semiconductor transducer and the transition to a multiphase configuration do not lead to an increase of power supply weight-size parameters. Thus, the power circuit configurations complication (increasing the number of phases) for process plants with installed capacity of more than 200 kW can improve weight-size parameters of electromechanical converter elements while maintaining the size of the semiconductor inverter.

*Key words:* semiconductor frequency converter, multi-phase, specific weight-size parameters.

## **Научно-учебная лабораторная база кафедры ЭПА ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ)**

ЦЫТОВИЧ Л.И., УСЫНИН Ю.С., БОРИСОВ А.М.

Рассматриваются структура и перечень лабораторного оборудования, разработанного и созданного коллективом кафедры электропривода ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) за последнее десятилетие. Лабораторный комплекс предназначен для подготовки специалистов дневной и заочной форм обучения по направлению 140400, проведения курсов переподготовки специалистов промышленных предприятий, а также научных исследований в области электропривода, информационной и силовой электроники и цифровых систем управления технологическими процессами. Дано развернутое описание следующих лабораторий:

- теории электропривода и компьютерных технологий в управлении электромеханическими и мехатронными системами;
- микроконтроллеров и компьютерных средств автоматизации технологических процессов и установок;
- информационной электроники, силовой преобразовательной техники и микропроцессорных систем управления;

- теории автоматического управления и кафедрального вычислительного центра;
- экспериментальной электроники;
- кафедрального суперкомпьютерного центра;
- интернет-технологий.

Статьи содержат информацию по актуальным вопросам оснащения ВУЗов современным лабораторным оборудованием.

*Ключевые слова:* лабораторный стенд, электропривод, электроника, микропроцессор, энергосбережение, вентильный преобразователь.

The article describes the structure and list of laboratory equipment, designed and developed by the staff of the electric chair of South-Ural State University in the last decade. Laboratory complex is designed for training students of day-time and evening-time education on course 140400, refresher training courses for specialists of industrial plants, and also research in the field of electric drive, information and power electronics and technological process digital control systems.

Detailed description of the following laboratories is given:

- theory of electric drive and computer technologies in the electromechanical and mechatronic systems control;
- microcontrollers and computer-based automation of technological processes and installations;
- information electronics, power converter technology and microprocessor control systems;
- automatic control theory and computer center of the chair;
- experimental electronics;
- cathedral supercomputer center ;
- Internet-technologies.

Materials of the articles contain information on topical issues of the universities' equipment with modern laboratory equipment.

*Key words:* laboratory stand, electric drive, electronics, microprocessor, energy conservation, variable frequency electric drive, converter.

### **Влияние закона широтно-и частотно-широтно-импульсной модуляции на уровень пульсаций выходного сигнала на периодического звена первого порядка**

БРЫЛИНА О.Г.

Приведены результаты сравнительного анализа качества восстановления входного сигнала на выходе систем с широтно- (ШИМ) и частотно-широтно-импульсной модуляцией (ЧШИМ). В качестве критерия выбран уровень пульсаций сигнала выходного сглаживающего фильтра, в частности представленного в виде апериодического звена первого порядка. В системах автоматического управления сигнал пульсаций часто оказывается в роли помехи, ухудшающей показатели качества процесса регулирования технологического процесса. Поэтому актуальность такого анализа очевидна. В работе сравниваются двух- и однотактная модуляция, с одним законом ШИМ и тремя, наиболее распространенными на практике, законами ЧШИМ. Рассмотрены три закона ЧШИМ – ЧШИМ-1 с квадратичным в функции входного сигнала уменьшением частоты выходного сигнала; ЧШИМ-2 и ЧШИМ-3 с линейно возрастающей и уменьшающейся в функции входного сигнала частотой несущих колебаний соответственно. Приведены расчетные соотношения и графические зависимости пульсаций выходного сигнала

демодулирующего фильтра от входного воздействия, с учетом влияния на них постоянной времени выходного сглаживающего фильтра. Даны рекомендации по областям применения рассмотренных законов модуляции.

*Ключевые слова:* однотоктная модуляция, двухтактная, частотно-широко-импульсная модуляция, широко-импульсная модуляция, фильтр, пульсации.

The results of comparative analysis of restoration quality of the input signal on the output system with width-pulse (WPM) and frequency-width-pulse modulation (FWPM) are considered in this article. The ripple level of the output filter signal is selected as the criterion. The output filter is the first order aperiodic link. The ripples signal often is in the role of interference in systems of automatic control, thus deteriorating indicators of process quality of control process. Therefore, the relevance of such an analysis is evident. The bipolar and unipolar modulation, with a WPM and three types of the most common in practice mode of FWPM are comparing. Three modes of FWPM are considered. There are a FWPM-1 with a quadratic decreases output signal frequency in function of the input signal, FWPM-2 and FWPM-3 with linearly increasing and decreasing output signal frequency in function of the input signal correspondingly. Depending on the ripples level of the output filter from the input action are given. The influence of the filter time constant is taken into account. The recommendations on the fields of application the modulation mode are presented.

*Key words:* unipolar modulation, bipolar modulation, frequency-width-pulse modulation, -width-pulse modulation, filter, ripples.

## **Тяговый электропривод трактора ДЭТ 400**

ШИШКОВА Н., СЫЧЕВ Д.А., БЫЧКОВ А.Е., СИДОРЕНКО Н.Ю.

Регулируемый электропривод, имеющий значительную кратность поддерживаемого момента (10:1 и выше) в режиме ограничения мощности, целесообразно применять в дизель-электрических тракторах с тяжелыми условиями работы. Такого рода перегрузки может обеспечить электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения. Остается необходимость провести синтез и настройку системы управления электроприводом. В данной статье рассматриваются характер обратных связей системы регулирования электропривода, проводится выбор структуры, синтез регуляторов, формулируются рекомендации по их настройке при широком диапазоне изменения параметров электропривода, при типовых воздействиях определяются показатели качества процессов для тягового электропривода. Моделирование проводилось при помощи упрощенной модели системы электропривода в программном пакете Matlab.

*Ключевые слова:* дизель-электрический трактор, синхронная реактивная машина независимого возбуждения, математическая модель.

Regulated electric drive which have significant multiple supported moment (10:1 or higher) in power-limited mode is advisable to apply in diesel-electric tractors with heavy working conditions. The electric drive with the field regulated reluctance machine can provide such overloads. There remains to synthesize and tune electric drive control system. This article considers the nature of the feedback of electric drive control, choice of structure, synthesis of regulators, makes recommendations on configuring regulators in a wide range of electric drive parameters, quality scores of processes for

traction electric drive with typical effects are defined. Simulation performed using a simplified model of the electric drive system in the software package Matlab.

*Key words:* diesel-electric tractor, field regulated reluctance machine, mathematical model.

### **Схемы импульсно-векторного управления электроприводом переменного тока**

ВАЛОВ А.В., ФУНК Т.А., ЖУРАВЛЕВ А.М., СИДОРЕНКО Н.Ю.

Приведена классификация способов импульсно-векторного управления электроприводов переменного тока. Рассмотрено ресурсо- и энергосбережение в электроприводах, посредством использования систем импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и синхронным двигателем. Приведены различные примеры схем импульсно-векторного управления. Сформированы принципы управления для каждой схемы, приведены примеры применения. Обоснован выбор элементной базы этих схем, рассмотрены преимущества и недостатки каждой из схем. Выполнено сравнение основных схем импульсно-векторного управления по следующим параметрам: значение максимального электромагнитного момента в долях от номинального момента двигателя и уровень пульсаций момента в долях от номинального момента двигателя. Показано, что применение импульсно-векторного управления повышает энергетические и экономические показатели электропривода, а использование различных схем позволяет бороться с некоторыми его недостатками.

*Ключевые слова:* импульсно-векторное управление, асинхронные двигатели.

The article describes the classification of pulse-vector AC drive control methods. The issue of resource and energy efficiency in electric drives by the use of pulse-vector control systems with wound rotor induction motor and synchronous motor is brought up. Various examples of schemes with pulse-vector control are presented. The control guidelines for each scheme are formed, and the examples of application are given. The choice of the element base of these schemes is proved, the advantages and disadvantages of each of the schemes are explained. Comparison of basic circuits of pulse-vector control is made with the following parameters: the maximum value of the electromagnetic torque as to the nominal motor torque; torque ripples as to the nominal motor torque. It is revealed that the use of pulse-vector control improves energy and economic performance of the electric drive and allows the use of different schemes allows to deal with some disadvantages that inherent it.

*Key words:* pulse-vector control, induction motors.

### **Система прямого управления моментом в синхронном электроприводе**

ГОРОЖАНКИН А.Н., ШИШКОВ А.Н., БЕЛОУСОВ Е.В., СЫЧЕВ Д.А., КИНАС С.И.

Рассмотрен релейно-векторный способ управления синхронными электроприводами. Предложены алгоритмы и структура прямого управления моментом синхронного электропривода, позволяющие формировать его режимы работы путем воздействия на форму треугольника, сторонами которого являются потокосцепления статора, ротора, а также результирующее потокосцепление. Показано, что формирование режимов в синхронных электроприводах с указанным типом управления возможно при наличии датчика положения

ротора, необходимым для определения положения ротора и скорости двигателя. Датчик может быть реализован либо физически, либо математически в составе наблюдателя координат электропривода.

*Ключевые слова:* прямое управление моментом, синхронный электропривод, релейно-векторное управление.

The article deals with the relay-vector control method of synchronous drives. The algorithms and the structure of synchronous electric drive direct torque control are presented. They enable to form its operating modes by influencing the shape of a triangle whose sides are flux linkages of stator, rotor and the resulting flux linkage. It is shown that the formation of modes in synchronous drives with the specified control type is possible with the rotor position sensor (encoder), which is required both to determine the rotor position and speed of the motor. The encoder may be implemented either physically or mathematically in coordinates of the observer in the electric drive.

*Key words:* direct torque control, synchronous electric drive, relay-vector control.

### **Динамика разворачивающихся преобразователей с выборкой мгновенных значений сигнала управления и различными законами модуляции**

ЦЫТОВИЧ Л.И., ДУДКИН М.М.

Рассмотрены принципы построения и временные диаграммы сигналов разворачивающихся преобразователей (РП) с выборкой мгновенных значений сигнала управления и различными законами широтно-импульсной модуляции, применяемые в аналоговых и цифровых системах управления вентильными преобразователями (ВП). Рассматриваются РП с широтно-импульсной модуляцией первого, второго и третьего родов. Приведены их структурные схемы и временные диаграммы сигналов. Дается методика анализа динамических характеристик РП. На основе полученных трансцендентных уравнений и их решений дан анализ динамических характеристик РП различных классов методом пространства динамического состояния объекта при воздействии гармонического сигнала помехи в широком частотном диапазоне. В качестве критерия сопоставительной оценки динамических характеристик РП введено понятие среднестатистического отклонения коэффициента заполнения импульсов и частоты несущих колебаний на пространстве динамического состояния объекта. Показано, что для РП с выборкой мгновенных значений сигнала управления только широтно-импульсная модуляция второго рода обеспечивает наименьший уровень ошибок в области частот замедленной дискретизации, поэтому данный закон модуляции целесообразно применять в системах управления ВП. Широтно-импульсная модуляция второго и третьего родов при работе с динамическим сигналом в «малом» является разновидностью частотно-широтно-импульсной модуляции, так как характеризуется отклонением частоты несущих колебаний от заданного значения.

*Ключевые слова:* разворачивающийся преобразователь, широтно-импульсная модуляция, динамические характеристики, помехоустойчивость, вентильный преобразователь.

Design principles and timing waveform diagrams of scanning converters (SC) with sampling of instantaneous values of command and different pulse-width modulation laws used in analog and digital control systems by valve converters (VC's) are considered. SC with pulse-width modulation of the first, second and third types are considered. Their block diagrams and timing waveforms are reduced. The

method of the dynamic characteristics analysis of SC's is given. All calculations are made in relative units. On the basis of obtained transcendental equations and their solution the dynamic characteristics analysis of different classes SC's by a method of dynamic state object space when affecting the harmonic interfering signal in a wide frequency range are given. As criterion of a comparative estimation of dynamic characteristics SC's the concept of an average statistical dedination of duty cycle and carrier waves frequency on dynamic state object space is entered. Is shown only pulse-width modulation of the second sort ensures the least level of errors in the field of slow digitization frequencies from all classes SC's with sampling of instantaneous values of command. Therefore given law of modulation is expedient for applying in control systems of VC's. By operation with a dynamic signal in «small» the pulse-width modulation of the second and third types is a variety of pulse-frequency-width modulation as it is characterized by dedination of carrier waves frequency from a set value.

*Key words:* scanning converter, pulse-width modulation, dinamic characteristics, noise stability, valve converter.

### **Инновационные решения группы компаний «Приводная техника»**

ЧУПИН С.А., СОКОЛОВ Д.В., ЧУПИН Е.С., НАУМОВИЧ Н.И.

Представлены основные технические решения по электрической трансмиссии трактора. Электропривод трактора выполнен на базе вентильно-индукторного электродвигателя. Рассмотрена структура электромеханической трансмиссии. Моделирование основных режимов работы электропривода и расчет его основных параметров выполнялся в программах MathCad и MATLAB. Для уточнения параметров электропривода с учетом общего и локального насыщения магнитной системы электромеханического преобразователя использовался программный комплекс Ansys. Показано, что реализованный электропривод имеет улучшенные на 30–50% массогабаритные показатели по сравнению с традиционным асинхронным электроприводом. Эти же показатели при сохранении потребительских качеств могут быть достигнуты на базе синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения.

*Ключевые слова:* трактор, электромеханическая трансмиссия, вентильно-индукторный электропривод, синхронный реактивный электропривод с независимым управлением по каналу возбуждения.

The article presents the main technical solutions for electrical transmission. Tractor electric drive is based on the switched reluctance drive. Modeling of the main operating modes of drive and the calculation of its basic parameters were carried out in MathCad and MATLAB programs. To verify the electric drive parameters with taking to account the general and local saturation of electromechanical transducer magnetic system there was used the Ansys software package. Attention is paid to the fact that the implemented electric drive has improved weight-size parameters to 30-50% compared to traditional induction machine drive. The same parameters while maintaining consumer qualities can be achieved on the base of the field regulated reluctance machine drive.

*Key words:* tractor, electromechanical transmission, switched reluctance drive, field regulated reluctance machine drive.

## **Модернизация кранового электропривода**

БОРИСОВ А.М., ДРАЧЕВ Г.И., ЛЯХ Н.Е.

Традиционным средством обеспечения пусковых и тормозных моментов и ограничения токов асинхронных двигателей с фазным ротором является введение в цепь ротора добавочных резисторов, которые по ступеням выводятся в процессе разгона двигателя. Упрощение электропривода имеет место при использовании индуктивных реостатов (дросселей), включаемых в цепь ротора асинхронного двигателя. Рассмотрены конструкция дросселя и механические характеристики дроссельного электропривода. Для фазового регулирования скорости и момента применены тиристорные регуляторы. Приведены функциональные схемы и механические характеристики, которые дают четкое представление о свойствах рассматриваемых приводов, используемых для крановых механизмов передвижения и подъема.

*Ключевые слова:* краны, асинхронный электродвигатель, регулятор скорости, механические характеристики.

Traditional means of providing starting and braking torques and current limiting of wound rotor induction motors is the additional resistances insertion to the rotor circuit. They are removed gradually during engine acceleration. Simplification of the electric drive takes place in usage of inductive rheostat (often called chokes) included in the rotor circuit of an induction motor. The article describes the design of the choke and mechanical characteristics of the choke electric drive.

For phase speed and torque control thyristor controllers are used. The option of replacing the throttle with two-step resistors with maintaining regulation properties of the electric drive is considered. Submitted functional circuits and mechanical characteristics provide a clear picture of the properties of considered drives used for crane mechanisms of movement and lifting.

*Key words:* crane, induction motor, speed controller, mechanical characteristics.

## **Многосвязные системы управления электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения**

УСЫНИН Ю.С.

В электроприводе с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) благодаря особенностям конструкции электрической машины (обмотка с полным шагом, многофазность, свобода в выборе формы фазного тока) четко разделяются функции каналов возбуждения и якоря, что улучшает регулировочные и энергетические характеристики электропривода. Приведена математическая модель электропривода с СРМНВ в виде структурной схемы, уделено внимание взаимодействию полей возбуждения и якоря при формировании предельных энергосиловых характеристик электропривода с учетом насыщения магнитной системы двигателя, показана выгода режима «последовательного возбуждения» с целью снижения суммарных потерь в электроприводе, дан синтез каналов обратных связей в многоконтурной системе регулирования, указаны особенности формирования процессов в многодвигательном электроприводе с СРМНВ.

*Ключевые слова:* синхронная реактивная машина независимого возбуждения, математическая модель, многосвязные системы управления.



In the electric drive with the field regulated reluctance machine the functions of excitation and armature channels are clearly separated due to design features of the electric machine (full pitch winding, multi-phase, the freeness of choosing the phase current form). It improves regulation and energy characteristics of the drive.

The mathematical model of the electric drive with the field regulated reluctance machine is given in block diagram form. Attention is paid to the interaction of excitation and armature fields in forming energy-power performance of the electric drive with account of the motor magnetic system saturation. Profit of the «serial excitation» mode in order to reduce the total losses in the drive is shown, feedback channel synthesis in multi-loop control system is given, features of the processes in multi-engine electric drive with the field regulated reluctance machines formation are pointed.

*Key words:* field regulated reluctance machine, mathematical model, multiply connected control systems.

### **Динамические показатели активных выпрямителей**

ГРИГОРЬЕВ М.А., ГОРОЖАНКИН А.Н., КИНАС С.И., БЕЛОУСОВ Е.В.

Оптимальная траектория движения в электроприводах позиционных механизмов, которые эксплуатируются в экстремальных условиях, определяется несколькими отдельными отрезками, складывающимися из набора фазовых траекторий с различными целевыми функциями. Показано, что оптимизация электропривода на одном из участков требует оценки динамических показателей «узла торможения». В статье проводится сопоставление схемотехнических решений «узлов торможения» электропривода. Отмечены недостатки наиболее распространенной схемы торможения со «сливным транзистором», в которой избыток кинетической энергии рассеивается на активном сопротивлении. Методами математического моделирования сопоставлены динамические показатели «активных выпрямителей», работающих в генераторном режиме, и традиционных схем со «сливным транзистором». Количественная оценка динамических показателей «активных выпрямителей» выполнялась по относительному значению перенапряжения в звене постоянного тока в зависимости от мощности, возвращаемой в питающую.

*Ключевые слова:* активный выпрямитель, синхронная реактивная машина независимого возбуждения, математическая модель.

Optimal trajectory of motion in positional mechanisms electric drives that operate in extreme conditions is determined by several separate segments consisting of a set of phase trajectories with different objective functions. It is shown that the optimization of the electric drive on one of the sections requires evaluation of «braking unit» dynamic parameters. The article compares the circuit solutions of electric drive «braking units». Disadvantages of the most common braking circuit with «braking chopper», in which the excess of kinetic energy is dissipated in the active resistance. Dynamic performance of «active rectifiers» operating in generator mode, and traditional schemes with «braking chopper» in quasi-stationary braking modes are compared by mathematical modeling methods. Quantitative estimation of «active rectifiers» dynamic parameters was made by the relative voltage swell value in the DC link depending on the power returned to the mains.

*Key words:* active rectifier, field regulated reluctance machine, mathematical model.

## **Эффективное частотное управление асинхронными электроприводами для работы при перегрузках**

КОДКИН В.Л., АНИКИН А.С., ШМАРИН Я.А.

Рассмотрены особенности механических характеристик асинхронных электроприводов, а также методы, повышающие их эффективность в статических режимах при перегрузках. Для описания физического процесса снижения электромагнитного момента с ростом частоты по Г-образной схеме замещения построены векторные диаграммы асинхронного электродвигателя с учетом и без учета активного сопротивления статора. С помощью вектора тока ротора, сонаправленного с основным магнитным потоком тока намагничивания, и угла между ними показано каким образом изменяется форма моментного треугольника при увеличении частоты питающего напряжения. Анализ уточненной формулы Клосса показал, что производная электромагнитного момента асинхронного двигателя по частоте питающего напряжения имеет отрицательный знак. В связи с этим общепринятые методы коррекции при перегрузках, увеличивающие частоту питающего напряжения при возрастании статорных токов, приводят к еще большему росту токов и снижению фактической частоты вращения двигателей. Предложены алгоритмы по повышению эффективности частотного управления асинхронными электроприводами. При большой нагрузке необходимо увеличивать поток электродвигателя путем увеличения напряжения, а при отсутствии такой возможности – за счет уменьшения частоты. Предложенные алгоритмы подтверждены экспериментальными исследованиями привода перемещения самоходного вагона.

*Ключевые слова:* асинхронный электропривод, частотное управление, статические характеристики, преобразователь частоты.

The features of the mechanical characteristics of induction motor drives, as well as methods that increase their efficiency in static mode are presented at the article. The induction motor vector diagrams are constructed on the L-shaped equivalent circuit taking into account and neglecting the stator resistance to describe the physical process of reducing the electromagnetic torque by increasing frequency of the supply voltage. It is showed how the shape of a triangle torque by increasing the frequency of the supply voltage using vectors of rotor current, magnetizing current, which is co-current with the main magnetic flux, and the angle between them. Presented a mathematical analysis of the elaborated formula Kloss are proved negative sign of the electromagnetic torque derivative by the induction motor frequency. The conventional methods of correction in overload increases the supply voltage frequency due to increasing stator currents so it leads to even higher currents and reduce actual engine speed. Research-based algorithms are proposed to improve the efficiency of frequency control of asynchronous electric drive. Under a heavy load should be increased by increasing the flow of motor voltage, and if this is not possible – by reducing the frequency. The proposed algorithms are confirmed by experimental of tractive drive of shaft self-propelled car.

*Key words:* asynchronous electric drive, frequency control, static characteristics, the frequency converter

## **Математическая модель синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения**

Предложена математическая модель синхронного реактивного электропривода с независимым управлением по каналу возбуждения. В модели блок электромеханического преобразователя представлен в виде системы с распределенными параметрами и рассчитывается методом конечных элементов, а полупроводниковый преобразователь аппроксимирован непрерывным динамическим звеном. На примере регулируемых асинхронных электроприводов статистическими методами показано, что расчет по предложенной математической модели при нагрузках от 0 до  $M_H$  дает близкие результаты с данными, получаемыми по традиционным расчетным схемам. Показано, что при расчете асинхронных электроприводов в области критического и сверхкритического момента использование традиционных математических моделей некорректно из-за весьма приближенного учета насыщения магнитной системы, поэтому разработанная математическая модель может быть использована и для расчетов традиционных электроприводов в зоне перегрузок по моменту.

*Ключевые слова:* электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения, математическая модель, полупроводниковые преобразователи частоты, многофазность.

The article presents the mathematical model of the field regulated reluctance machine. In the model, the electromechanical converter block is presented as a distributive parameters system and is calculated by finite element method, semiconductor converter is approximated with continuous dynamic element. On the example of regulated electric drives with induction motors, statistical methods have shown that the mathematical model estimation in question with a load of zero to rated torque gives similar results with data obtained by the traditional design schemes. It is shown that in calculating induction motor drives in critical and supercritical points the usage of traditional mathematical models is incorrect because of the very approximate calculation of the magnetic system saturation, so the mathematical model can be used for calculations of traditional electric drives in the torque overload area.

*Key words:* electric drive with the field-regulated reluctance machine, mathematical model, semiconductor frequency converters, multiphase.