

**80 лет кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок»
Уральского федерального университета имени Первого Президента России Б.Н.
Ельцина**

**Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского
федерального университета им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина
БРАСЛАВСКИЙ И.Я.**

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения частотно-регулируемых
электроприводов с емкостными накопителями энергии в крановых механизмах
БРАСЛАВСКИЙ И.Я., ПЛОТНИКОВ Ю.В., ИШМАТОВ З.Ш., ПОЛУНИН Ф.А.**

Рассматривается вариант использования так называемых суперконденсаторов в крановом электроприводе общего назначения, когда блок суперконденсаторов подключается на общую шину постоянного тока, от которой питаются несколько автономных инверторов напряжения. При этом во время тормозных режимов работы одного из электроприводов энергия торможения запасается в суперконденсаторе и может быть затем использована для двигательных режимов работы. Очевидно, что в этом случае будет наблюдаться экономия электрической энергии по сравнению с частотно-регулируемым электроприводом, в котором используется тормозное сопротивление. Проведена оценка технико-экономической эффективности использования емкостных накопителей электрической энергии в крановых электроприводах. Задача решается с применением математических моделей кранового электропривода с общим звеном постоянного тока, приводятся результаты моделирования и приближенный расчет энергопотребления электроприводов с суперконденсатором и тормозным сопротивлением, дается сравнительная оценка технико-экономических характеристик электропривода и приводятся ориентировочные сроки окупаемости проектов по модернизации крановых электроприводов с использованием емкостных накопителей энергии.

Ключевые слова: крановые механизмы, частотно-регулируемый асинхронный электропривод, емкостный накопитель энергии, суперконденсатор.

The article discusses the possibility of using the so-called supercapacitors in the crane electric drives for general use. The main idea is that the supercapacitors block is connected directly to the common DC link, from which the several voltage source invertors are feed. With this solution during braking modes of one of electric drives, the braking energy is stored on the supercapacitor and then can be used to implement the motor modes. It is obvious that in this case there will be a saving of electrical energy compared with frequency-controlled electric drive, in which the braking resistor are used. The task of this work is to estimate the technical and economic efficiency of using the capacitive energy storages in the crane electric drives. The problem is solved with the using of mathematical models for crane electric drive with a common DC link. The simulation results and approximate calculation of electric energy consumption for frequency-controlled electric drive with supercapacitor and braking resistor are given. The comparative estimation of the technical and economic characteristics of the electric drive, and the approximate payback periods of crane electric drive modernization with using capacitive energy storage are shown.

Key words: crane mechanisms, frequency- controlled electric drive, capacitive energy storage, supercapacitor.

**Динамика электропривода с асинхронной машиной двойного питания при векторном
управлении**

ПОЛЯКОВ В.Н.

Рассмотрены динамические свойства электропривода с асинхронной машиной двойного питания при векторном управлении. Приведены функциональная схема системы векторного управления электропривода с подчиненным регулированием, математическая модель силовой части, алгоритмы регуляторов и результаты математического моделирования процессов электропривода. При моделировании процессов электропривода используются следующие условия. Модель асинхронной машины учитывает электромагнитные, электромеханические переходные процессы и насыщение по главному магнитному пути. Модели преобразователей частоты представляют собой идеальные устройства.

Математическое описание модели силовой части базируется на представлении переменных (напряжений, токов и потокоцеплений) в виде алгебраических векторов, компоненты которых приведены к вращающейся прямоугольной системе координат. Алгоритмы регуляторов системы управления синтезированы по методике нелинейных многосвязных систем подчиненного регулирования с учетом возможности оптимизации управления синтезированы по методике нелинейных многосвязных систем подчиненного регулирования с учетом возможности оптимизации режимов насыщенной машины по минимуму суммарных потерь при переменном магнитном потоке. Оценка динамики электропривода дается на основании результатов моделирования переходных процессов по моменту и скорости электропривода при разгоне двигателя, набросе и сбросе нагрузки. При этом контролируется характер поведения электрических и электромагнитных переменных машины. Результаты математического моделирования, полученные при сформулированных условиях, позволяют сделать следующий вывод о том, что в электроприводе с асинхронной машиной двойного питания при векторном управлении можно обеспечить переходные процессы, близкие к типовым процессам систем подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока, и оптимизацию режимов работы машины по минимуму суммарных потерь при переменном магнитном потоке.

Ключевые слова: электропривод, машина двойного питания, математическая модель, динамические характеристики, оптимизация.

Dynamic behaviors of the electric drive with double-fed asynchronous machine under the vector control are considered. Functional diagram of electric drive vector control system, the mathematical model of power part, the algorithms of controllers and mathematical simulation results of electric drive are given. The simulation was made under following conditions. The model of induction motor takes into account the electromagnetic, electromechanical transient and main magnetic circuit saturation. Models of frequency converters are the ideal elements. The model mathematical description of power part is based on presentation variables (voltages, currents and flux linkages) in form of algebraic vectors. The components of vectors transformed to rotating rectangular coordinate system. Algorithms of control system controllers were synthesized according to the method of nonlinear multivariable systems with possibility of minimization total power losses of saturated motor under variable magnetic flux. The estimation of electric drive dynamic responses are given based on simulation results of torque and speed during the starting of motor and applying of mechanical load. During this simulation the behavior of electric and electromagnetic variables of motor was controlled. The mathematical simulation results, which were obtained under formulated conditions, allow us to make the following conclusions. In the electric drive with double-fed asynchronous machine with vector control it is possible to obtain the similar transients as in direct current electric drives with subordinate control system and total loss minimization under variable magnetic flux.

Key words: electric drive, double-fed asynchronous machine, mathematical model, dynamic behavior, optimization.

Динамические свойства системы регулирования момента в электроприводе с асинхронной машиной двойного питания

ПОЛЯКОВ В.Н.

Рассмотрены динамические свойства разомкнутой системы регулирования электромагнитного момента, входящей в состав электропривода с асинхронной машиной двойного питания. Выполнен анализ системы регулирования электромагнитного момента с подчиненной системой регулирования токов обмоток статора и ротора асинхронной машины при частотном способе регулирования скорости. Приведены математические модели элементов, входящих в состав системы регулирования электромагнитного момента – силовой части, регулятора токов и формирователя режимов асинхронной машины. При описании элементов системы регулирования электромагнитного момента учтено насыщение машины по главному магнитному пути. Программа моделирования процессов нацелена на исследование влияния быстродействия системы регулирования токов на динамику разомкнутой системы регулирования электромагнитного момента. Приведены результаты моделирования процессов системы регулирования электромагнитного момента при различном быстродействии системы регулирования токов. Показано, что при снижении быстродействия регулятор токов начинает терять способность компенсировать влияние возмущающего фактора, в качестве которого рассматривается скорость асинхронной машины. В результате нарушается ориентация системы координат, осуществляемая регулятором момента. В итоге ухудшаются динамические характеристики систем регулирования электромагнитного момента и скорости. При заданном быстродействии системы регулирования токов показатели качества разомкнутой системы регулирования электромагнитного момента зависят от величины и скорости изменения управляющего и возмущающего воздействий. Динамика системы регулирования момента иллюстрируется графиками переходных процессов при ступенчатом задании управляющего воздействия и линейном нарастании возмущающего воздействия. По результатам исследований сформулированы основные выводы и рекомендации.

Ключевые слова: электропривод, машина двойного питания, система регулирования электромагнитного момента, математическая модель, динамические характеристики.

The dynamics behavior of open-loop electromagnetic torque control system, which is a part of double-fed asynchronous machine control system, is considered. The variant of torque control system with subordinated rotor and stator currents control systems under the frequency control is analyzed. The mathematical models of elements of electromagnetic torque system are shown. These models consist of the power part, current controllers and mode builder of asynchronous machine. During the description of electromagnetic torque control system the saturation of magnetic field was taken into account. The main aim of simulation program is to investigate the influence of current control system performance on the dynamics of open-loop electromagnetic torque control system. The simulation results of electromagnetic torque control system under different response speed of current control system are shown. It is shown that the decreasing of response speed the current controller begins to lose the ability to compensate the external disturbance, which is a motor speed. This fact results in disturbing the coordinate system orientation, for which the electromagnetic torque controller is responsible. As a result, the dynamic responses of electromagnetic torque and speed control systems are decreased. Under given response speed of currents control system the quality levels of open-loop electromagnetic torque control system depend on the value and rate of change of the control and disturbance actions. The dynamics of torque control system are illustrated by means of transients graphics under the step control action and linear disturbance action. The main conclusions and recommendations for these investigations were formulated.

Key words: electric drive, double-fed asynchronous machine, control system of electromagnetic torque, mathematical model, dynamic behavior.

К оценке теплового состояния асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме

ЗЮЗЕВ А.М., МЕТЕЛЬКОВ В.П.

Рассмотрена обоснованность допущений, принимаемых при выводе соотношений метода средних потерь, используемого для оценки теплового состояния асинхронного двигателя, определены границы применимости этого метода. Метод средних потерь базируется на допущении о том, что средняя за цикл скорость старения изоляции линейно связана со средней температурой обмотки. В то же время динамика температуры обмотки статора существенно отличается от динамики средней температуры двигателя. Соответственно, в повторно-кратковременном режиме работы амплитуда колебаний температуры обмотки статора может выходить далеко за пределы, при которых корректна оценка средней скорости старения изоляции по средней температуре. Выполнен анализ зависимости, устанавливающей соотношение между средней за цикл скоростью старения изоляции и скоростью старения при средней за цикл температуре для простейшего цикла повторно-кратковременного режима, включающего период работы и паузу. На основе этих соотношений определена область таких сочетаний продолжительности включения и длительности цикла, при которых корректно использование метода средних потерь, так как в этой области достаточно точно выполняются допущения, положенные в основу этого метода. Показано, что существует большая область с такими сочетаниями времен цикла и продолжительностей включения, при которых метод средних потерь дает оценку теплового состояния двигателя с существенной ошибкой. Определены границы области применимости метода средних потерь на плоскости с координатами «продолжительность включения» и «длительность цикла». Выявлена комбинация параметров двигателя, которая определяет положение границ области применимости метода средних потерь в этих координатах. Приведены значения этой комбинации параметров для асинхронных двигателей закрытого исполнения с изоляцией классов В и F.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод средних потерь, термическое старение изоляции, обмотка статора, повторно-кратковременный режим.

The article examines the validity of the assumptions made in the derivation of the relations for average losses method used to evaluate the thermal state of the induction motor. Defined the boundaries of applicability of this method. Average losses method is based on the assumption that the average rate of insulation aging linearly related to the average winding temperature. At the same time, the dynamics of the temperature of the stator winding is substantially different from the dynamics of the average motor temperature. Therefore, in the intermittent mode oscillations of stator winding temperature can go far beyond the boundaries in which the definition of the average rate of insulation aging based on the average temperature remains valid. The article analyzes the dependences establishing the ratio between the average rate per cycle of insulation aging and aging at an average rate per cycle temperature for the simple intermittent mode cycle, including the period of work and pause. On the basis of these relations defined the area for such combinations of relative operation time and cycle time at which will be the correct use of the average losses method, since in this area quite accurately performed assumptions underlying this method. However, it is shown that there is a large area with such combinations of relative operation time and cycle time under which the average losses method gives an estimation of the motor thermal state with a substantial error. The charts of the area of applicability of the average losses method in the plane with coordinates «relative operation time» and «cycle time» are shown. Defined combination of motor parameters, which determines the position of the boundaries of the area of applicability in

these coordinates. Gives the values of this parameter combinations for asynchronous motors with insulation class B and F.

Key words: induction motor, average loss method, thermal deterioration of insulation, stator winding, intermittent mode.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов с емкостными накопителями энергии в крановых механизмах БРАСЛАВСКИЙ И.Я., ПЛОТНИКОВ Ю.В., ИШМАТОВ З.Ш., ПОЛУНИН Ф.А.

Рассматривается вариант использования так называемых суперконденсаторов в крановом электроприводе общего назначения, когда блок суперконденсаторов подключается на общую шину постоянного тока, от которой питаются несколько автономных инверторов напряжения. При этом во время тормозных режимов работы одного из электроприводов энергия торможения запасается в суперконденсаторе и может быть затем использована для двигательных режимов работы. Очевидно, что в этом случае будет наблюдаться экономия электрической энергии по сравнению с частотно-регулируемым электроприводом, в котором используется тормозное сопротивление. Проведена оценка технико-экономической эффективности использования емкостных накопителей электрической энергии в крановых электроприводах. Задача решается с применением математических моделей кранового электропривода с общим звеном постоянного тока, приводятся результаты моделирования и приближенный расчет энергопотребления электроприводов с суперконденсатором и тормозным сопротивлением, дается сравнительная оценка технико-экономических характеристик электропривода и приводятся ориентировочные сроки окупаемости проектов по модернизации крановых электроприводов с использованием емкостных накопителей энергии.

Ключевые слова: крановые механизмы, частотно-регулируемый асинхронный электропривод, емкостный накопитель энергии, суперконденсатор.

The article discusses the possibility of using the so-called supercapacitors in the crane electric drives for general use. The main idea is that the supercapacitors block is connected directly to the common DC link, from which the several voltage source invertors are feed. With this solution during braking modes of one of electric drives, the braking energy is stored on the supercapacitor and then can be used to implement the motor modes. It is obvious that in this case there will be a saving of electrical energy compared with frequency-controlled electric drive, in which the braking resistor are used. The task of this work is to estimate the technical and economic efficiency of using the capacitive energy storages in the crane electric drives. The problem is solved with the using of mathematical models for crane electric drive with a common DC link. The simulation results and approximate calculation of electric energy consumption for frequency-controlled electric drive with supercapacitor and braking resistor are given. The comparative estimation of the technical and economic characteristics of the electric drive, and the approximate payback periods of crane electric drive modernization with using capacitive energy storage are shown.

Key words: crane mechanisms, frequency- controlled electric drive, capacitive energy storage, supercapacitor.

Анализ робастности типовых систем управления электроприводом ИШМАТОВ З.Ш., ФЕДОСЕЕВ А.А.

Для многих электроприводов как постоянного, так и переменного тока, характерно изменение параметров в процессе их работы, иногда значительное. Это приводит к ухудшению качества и точности регулирования и негативно влияет на технологический

процесс. Поэтому актуальным является анализ систем управления электроприводами с целью обеспечить малую чувствительность статических и динамических характеристик к параметрическим возмущениям. Рассмотрены типовые системы регулирования тока и скорости электроприводов при изменении параметров объекта управления. Выполнен анализ основных возмущающих факторов, действующих в электроприводах. Для исследования робастных свойств систем регулирования использованы интервальные модели объектов регулирования и элементы интервальной математики. Получены обобщенные интервальные модели объектов в контурах регулирования тока и скорости, учитывающие изменение основных параметров. Рассмотрены два варианта регулятора тока (с компенсацией инерционности объекта и без нее) и три варианта регулятора скорости (П, ПИ и ПИД) со стандартными настройками. С использованием коэффициентных оценок устойчивости, качества и точности выполнен теоретический анализ робастных свойств этих систем. Показано, что регулятор тока с компенсацией инерционности объекта более чувствителен к изменению параметров. В контуре регулирования скорости усложнение регулятора ведет к снижению чувствительности. Приводятся результаты математического моделирования, подтверждающие сделанные выводы.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, интервальная модель объекта, робастное управление.

Many AC and DC drives are characterized to have parameters variation, sometimes significant, while operating. This results to the decrease of the control property and accuracy and impacts the technological process negatively. Thus, the problem of electric drives control system analysis aiming to provide low sensitivity of static and dynamic characteristics to parametrical fluctuations is very urgent. The typical current and speed control systems under variation of control object's parameters are considered in the paper. The analysis of major disturbing factors in the electric drives is carried out. The interval models of control objects and elements of interval mathematics are used to study the robust properties of control systems. The integrated interval models of control objects allowing variation of major parameters in the speed and current control loops are obtained. Two types of current controller (with object lag compensation and without it) and three speed controller variants (P, PI, PID) with standard preferences are considered. Theoretical analysis of the robust properties of these systems is carried out using the coefficient evaluations of stability, property and accuracy. The current controller with control object lag compensation is shown to have greater sensitivity to the parameters variation. In the speed control loop the complication of the speed controller results to decrease of the sensitivity. The results of mathematical modeling confirming the conclusions drawn are given.

Key words: the variable speed drive, interval object model, robust control.

Робастные регуляторы тока и скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода

ИШМАТОВ З.Ш., ПЛОТНИКОВ Ю.В., ГУРЕНТЬЕВ Е.А.

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением является многосвязным и нелинейным объектом управления. В состав уравнений, описывающих объект, входят параметры, значения которых подвержены изменениям. Кроме того, на электропривод действует ряд внешних возмущений. Традиционные способы представления объекта управления не дают возможности учесть эти явления, что затрудняет анализ статических и динамических свойств полученной системы в условиях внешних и внутренних возмущений. Предложено использовать интервальные передаточные функции объекта с входящими в их состав относительными вариациями, что позволяет выполнить анализ действия параметрических возмущений. На основе полиномиальных методов синтезированы робастные регуляторы проекций фазных токов и скорости. Анализ этих

регуляторов с использованием интервальных моделей показал, что они действительно обеспечивают слабую чувствительность к возмущениям. Математическое моделирование и экспериментальные исследования подтвердили возможность исследования на основе интервальных передаточных функций, а также эффективность полученных робастных регуляторов.

Ключевые слова: частотно-регулируемый асинхронный электропривод, интервальная модель, робастное управление.

Induction motor electric drive with vector control is multiply and nonlinear control object. The structure of the equations describing the object includes parameters whose values are subjected to changes. In addition, the drive has a number of external disturbances. Traditional methods of control object representation do not allow to take into account these effects, which complicates the analysis of static and dynamic properties of the resulting system in terms of external and internal disturbances. In the paper it is proposed to use the interval object transfer functions with their member relative variations that allows to perform analysis of the effects of parametric perturbations. Based on polynomial methods the robust controllers of the phase currents projections and speed were synthesized. Analysis of these controllers with using interval models showed that they provide a low sensitivity to perturbations. Implementation of mathematical modeling and experimental studies have confirmed the possibility of research based on interval transfer functions, as well as the effectiveness of the obtained robust controllers.

Key words: frequency-controlled asynchronous electric drive, interval model, robust control.

Оптимизация динамических процессов в асинхронном электроприводе со скалярной САР

БРАСЛАВСКИЙ И.Я., КОСТЫЛЕВ А.В., ЦИБАНОВ Д.В., ХАБАРОВ А.И.

Рассматриваются подходы к обеспечению энергоэффективности динамических асинхронных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов со скалярными разомкнутыми системами управления. Обсуждаются вопросы формирования специальных законов скалярного управления, предназначенных для работы в динамических (пуско-тормозных режимах). Вводится понятие интегрального критерия эффективности электромагнитного преобразования. С точки зрения приведенного критерия рассматривается эффективность следующих законов управления: закон, полученный на основе статических уравнений двигателя; закон, полученный с учетом электромагнитной инерционности двигателя и закон с начальным намагничиванием асинхронного двигателя напряжением малой частоты. Определяются целесообразные области применения данных законов. Показано, что использование предварительного намагничивания обеспечивает существенное снижение бросков тока статора на начальном этапе пуска, что позволяет дополнительно снизить потери в двигателе и улучшить соотношение «ток–момент» при пуске. При этом дополнительные потери на предварительное намагничивание существенно меньше потерь, вызванных бросками тока на начальном этапе процесса в традиционных системах. Приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, оптимизация, скалярное управление.

This paper describes the principles of optimization of asynchronous variable frequency induction motor drives with scalar open loop control systems. The development problems of special control laws designed for dynamic (starting-breaking) modes are discussed. Concept of integral electromagnetic conversion efficiency criterion is introduced. From the standpoint of the above criteria, the efficiency of the following control laws is considered: the control law obtained from static equations of the induction motor; the control law obtained from dynamic equations and the control law with initial magnetization of the motor by low frequency voltage. Reasonable areas of

application of these laws are defined. The using of the initial magnetization allows to significantly reducing initial inrush stator at the beginning of start process. This allows to further reduce losses in the motor and to improve the ratio of «current - torque» at start. The additional losses caused by the pre-magnetization are much smaller losses caused by the inrush current during start up in traditional systems. Simulating results are given.

Key words: induction motor drive, optimization, scalar control.

Применение метода кластерного анализа для формирования закона частотного управления в асинхронном электроприводе

БРАСЛАВСКИЙ И.Я., КОСТЫЛЕВ А.В., ЕСАУЛКОВА Д.В., КИРИЛЛОВ А.В.

Рассмотрен упрощенный синтез энергоэффективных скалярных систем частотного регулирования асинхронными электроприводами. В качестве способа обеспечения энергоэффективности рассмотрен метод формирования специальных законов частотного регулирования, рассчитываемых для заданного диапазона нагрузок. Расчет закона частотного управления асинхронным электроприводом выполняется на основе итерационной оптимизации, при этом количество итераций может достигать тысячи. Представляется целесообразным найти упрощенную процедуру формирования закона, пригодную для инженерных расчетов. Предложена гипотеза «похожести» законов управления для двигателей с относительно близкими параметрами схемы замещения. Это предполагает, что закон управления (квазиоптимальный закон), полученный для одного двигателя, может быть с определенной погрешностью применен и для других, близких по параметрам электрических машин. Выявление двигателей с близкими параметрами предлагается осуществить с помощью кластеризации, выполненной на основе самоорганизующихся искусственных нейронных сетей (карты Кохонена). Число кластеров выбрано исходя из желаемого разброса параметров двигателя, определяемого на основе отклонения значений критерия оптимизации от экстремального. В итоге получена гексагональная карта Кохонена из 49 кластеров, при этом каждому кластеру соответствует свой набор квазиоптимальных законов. Таким образом, достаточно соотнести двигатель с каким-либо кластером (иначе классифицировать), что автоматически сопоставит ему квазиоптимальный закон управления. Приведены процедура формирования и обучения сети, а также примеры реализации оптимизированных законов управления.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, скалярное управление, оптимизация, нейронная кластеризация.

The problems of simplified synthesis of scalar energy efficient systems of frequency control induction motor are discussed. As a method to provide energy efficiency the method of special frequency control laws calculated for a given load range is considered. The calculation procedure of the frequency control law of induction motor is performed by iterative optimization, where the number of iterations reached thousands. So more appropriate simplified procedure for the method of control law forming is needed. This is suitable for engineering calculations. The hypothesis of «similarity» of control laws is introduced for motors with similar parameters of the equivalent circuit. Assumed that the control law (quasi-optimal law) is obtained for one motor and it is applied to other with similar parameters of the equivalent circuit with a certain error. Identification of motors with similar parameters are performed via the self-organizing artificial neural networks (Kohonen map). The number of clusters is chosen according to the desired dispersion of the motor parameters, which is determined by deviation from the values of the optimization criterion extremum. The result is presented as hexagonal Kohonen map of 49 clusters, where each cluster has its own set of quasi-optimal laws. Thus, it is enough to match the motor with a certain cluster (otherwise classify). As a result the motor get automatically the quasi-optimal control law. The

paper describes the procedure of the network forming and training. Examples of optimized control laws are given.

Key words: induction motor, scalar control, optimization, neural network clustering.

Устройство плавного пуска асинхронного двигателя с контролем напряжения сети ЗЮЗЕВ А.М., КОСТЫЛЕВ А.В., СТЕПАНЮК Д.П.

Рассмотрено использование тиристорного преобразователя напряжения для ограничения провалов напряжения при пуске асинхронного двигателя. Показано, что традиционное решение – пуск с отсечкой по току – в общем случае не решает задачу поддержания остаточного напряжения на шинах сети в процессе запуска двигателя на уровне, при котором обеспечивается бесперебойная работа другого оборудования, подключенного к этой сети. Для ограничения провалов напряжения при пуске необходимо контролировать напряжение сети. Предложена структура системы управления тиристорного устройства плавного пуска, реализующая замкнутый контур поддержания напряжения сети в процессе пуска и методика синтеза регулятора в этой структуре. Показано, что регулятор, полученный на основе упрощенной модели объекта, дает приемлемые результаты для практического использования. Приведены результаты моделирования и экспериментальные данные, которые доказывают работоспособность предложенного подхода. В системе с контролем напряжения непосредственно на вход подается задание на желаемое значение напряжения сети и обеспечивается возможность поддержания этого значения в процессе пуска асинхронного двигателя при структурных и параметрических изменениях питающей сети и нагрузки с высокой точностью и достаточным качеством переходных процессов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь напряжения, сеть ограниченной мощности, провал напряжения.

The article deals with using thyristor voltage converter for restriction voltage dip during induction motor start. This question is actual in case of using supply network of limited power. It is shown that traditional solution – current limiting startup mode in general case does not solve the problem of maintaining the residual voltage during the start of motor at the level that provides undisturbed operation of other equipment which is connected to this supply network. For voltage dip restriction it is necessary to control the supply voltage. It is proposed control system structure for the soft-starter which realizes closed loop of supporting the supply voltage during the start process and technique of regulator synthesis in this structure. It is shown that regulator which is created based on simple model of subject gives acceptable results for practical use. Results of modeling and experimental data which prove operability of this method are represented. In the system with voltage control the value of required supply voltage is directly set to input, and it is provided the possibility of maintaining this value during the induction motor start with structural and parametrical changes of the supply power system and load, with high accuracy and adequate quality of transient.

Key words: induction motor, thyristor voltage converter, limited capacity network, voltage dip.

Программно-аппаратный комплекс для моделирования электроприводов в реальном времени

ЗЮЗЕВ А.М., НЕСТЕРОВ К.Е., МУДРОВ М.В.

Рассматриваются вопросы разработки программно-аппаратного комплекса для исследования систем электроприводов переменного тока. На примере системы тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН-АД) показана возможность создания подобного комплекса на базе контроллера со встроенной программируемой

логической интегральной схемой (ПЛИС). Силовая часть асинхронного электропривода, а именно, преобразователь, двигатель и рабочий орган реализована в виде математической модели в среде LabVIEW FPGA, взаимодействующей с реальной системой управления. Решение уравнений модели силовой части электропривода выполнено на базе ПЛИС с периодом расчёта 1 мкс реального времени. Приводятся фрагменты математической модели, осциллограммы фазных токов и напряжений, полученные в реальной системе ТПН-АД и программно-аппаратном комплексе. Осциллограммы демонстрируют возможность выявления реальных характеристик процессов при проведении пусконаладочных работ систем управления электроприводов на предлагаемом комплексе. Комплекс позволяет исследовать различные типы электроприводов: ПЧ-АД, Т-Д или ПЧ-ВД.

Ключевые слова: симулятор электропривода, модель, реальное время.

The questions of constructing experimental software-hardware complex for study of AC drives systems are under consideration. Using of software-hardware simulator of equipment solves the problems of tests of the equipment during designing electric drive systems which often are expensive or difficult for implementation. It is shown, with using, for example, thyristor voltage converter with induction motor (TVC-IM), possibility of creating this simulator based on single-board controller with integrated field-programmable gate array (FPGA). Power part of the AC drive: converter, motor and the load, is represented as mathematical model that is created in LabVIEW FPGA which communicates with real control system. Calculation of mathematical model equations of power part is implemented on FPGA with calculation period 1 microsecond of real time. Parts of the mathematical model, oscillograms of phase current and voltage that were obtained in real TVC-IM and in the simulator are represented in this article. These oscillograms demonstrates the possibility of getting real characteristics of processes during debugging the control system of electric drive with the simulator. Created simulator allows to explore others types of electric drive systems: induction motor with frequency converter, TVC-IM system and others.

Key words: electric drive simulator, model, real-time.