

## **Оптимизация управляющего воздействия в синхронных реактивных и индукторных электроприводах переменного тока**

ГОРОЖАНКИН А.Н., ГРЫЗЛОВ А.А., ЦИРКУНЕНКО А.Т., ЖУРАВЛЕВ А.М.

Предложен алгоритм оптимизации управляющего воздействия в контуре момента синхронных реактивных и индукторных электроприводов переменного тока, который позволяет осуществлять поиск оптимальной с точки зрения принципа работы электрической машины формы тока, применимый для любого электромеханического преобразователя с магнитной несимметрией ротора. В качестве параметра оптимизации принят гармонический состав фазных токов. Критерием оптимизации являются удельные электрические и магнитные потери. Функциональные связи, то есть набор уравнений математической модели объекта оптимизации, предлагаются в двух вариантах: аналитическом и численном. В аналитическом варианте рекомендуется проводить оптимизационные расчеты при следующих допущениях: машина не насыщена, магнитная проводимость стали равна бесконечности, отсутствуют потоки рассеяния. Для уточнения результатов оптимизации рекомендуется применять численный метод расчета, когда электрическая машина представляется системой с распределенными параметрами. Рассмотрен пример синтеза наилучшей формы фазных токов в контуре момента электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения. Установлено, что оптимальной формой тока является трапецевидная, при этом время изменения управляющего сигнала определяется временем прохождения края полюса ротора расстояния, равного фазной зоне обмотки статора. Полученный алгоритм оптимизации управляющего воздействия позволяет повысить энергоэффективность синхронных реактивных и индукторных электроприводов переменного тока.

*Ключевые слова:* электропривод, переменный ток, энергоэффективность, оптимизация.

The article present the algorithm for optimizing the control action in the torque contour of synchronous reluctance and inductor AC drives. It is makes it possible to search for an optimal form of current in terms of the operating principle of the electric drive, which is applicable to any electromechanical converter with magnetic asymmetry of the rotor. The harmonic composition of the phase currents serves as an optimization parameter. The optimization criterion is the specific electric and magnetic losses. Functional connections, i.e. a set of equations for the mathematical model of an optimization object, are offered in two versions: analytical and numerical. According to the analytical version, it is recommended to perform optimization calculations under the following assumptions: the machine is not saturated, the

magnetic conductivity of steel is equal to infinity, there are no scattering fluxes. To refine the optimization results, it is recommended to use a numerical calculation method, where the electric machine is represented by a system with distributed parameters. An example of synthesis of the best form of phase currents in the torque contour of an electric drive with a field regulated reluctance machine is considered. It is established that the optimum shape of the current is the trapezium, while the time of the change in the control signal is determined by the transit time of the edge of the pole of the rotor of the distance equal to the value of the phase area of the stator winding. The application of the obtained optimization algorithm of the control effect allows increasing the energy efficiency of synchronous reluctance and inductor AC electric drives.

*Key words:* energy efficiency, algorithm, optimization, electric drive, AC current.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.7 – 13*

### **Расчет электроприводов с электрическими машинами нетрадиционных конструкций**

ЖУРАВЛЕВ А.М., ГРИГОРЬЕВ М.А.

Предложена методика расчета электроприводов, работающих в зоне больших перегрузок или имеющих двигатель с нетрадиционной конструкцией ротора. В основу расчета магнитной системы положен метод конечных элементов, при этом задания на фазные токи поступают из системы регулирования. Для уменьшения времени расчета разработан алгоритм распараллеливания расчетов по критерию максимального ускорения. Дана оценка возможностей расчетных методов в зависимости от количества процессоров и характера решаемой задачи. Показано, что если электропривод имеет небольшие перегрузки, и они входят в зону допуска, то целесообразней отдавать предпочтение упрощенным расчетным моделям, при этом параметры электрической машины могут быть заменены на сосредоточенные. Если асинхронный электропривод работает с существенными перегрузками (при ударном характере момента сопротивления или при частых пуско-тормозных режимах работы с относительно большим динамическим моментом) целесообразно применять уточненные методы расчета. Электроприводы с сложной конфигурацией магнитной системы, например, приводы с синхронной реактивной машиной требуют обязательного учета распределенного характера магнитной системы двигателя. Более того, есть режимы работы электропривода в зоне больших перегрузок по моменту и углах  $\beta < 30^\circ$ , когда к исходным данным расчетной модели предъявляются повышенные требования.

*Ключевые слова:* электропривод, электрические машины нетрадиционной конструкции, метод конечных элементов, перегрузочный момент.

This article presents the technique of calculation of the electric drives which work in a zone of essential overloads or having the electric drive with nontraditional design of a rotor. The calculation of the magnetic system is based on the finite element method. The reference for the phase currents comes from the control system. The algorithm was developed for parallelizing the calculations by the criterion of maximum acceleration to reduce the estimated time. The estimation of the possibilities of calculation methods is given depending on the number of processors and the nature of the problem. It is shown that if the electric drive has small overloads and they enter the tolerance zone, then it is more expedient to give preference to simplified design models, while the parameters of the electric machine can be replaced by concentrated ones. In the case when the asynchronous electric drive works with significant overloads (with the shock character of the moment of resistance or with frequent starting-brake modes of operation with a relatively large dynamic moment), it is advisable to apply refined calculation methods. Electric drives with a complex configuration of the magnetic system, for example, drives with a synchronous reluctance machine require the consideration of the distributed nature of the magnetic system. Moreover, there are operating modes of the electric drive in the zone of significant overloads in the moment and angles  $\beta < 30$ , when higher requirements are imposed on the initial data of the calculation model.

*Key words:* electric drives, electric machines non-traditional designs, finite element method, overloading torque.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.13 – 19*

### **Улучшение удельных массогабаритных показателей синхронных реактивных электроприводов**

МЕНЬШЕНИН А.С., ГРИГОРЬЕВ М.А.

Для сравнения различных методов улучшения удельных массогабаритных показателей электроприводов для объектов, реализующих позиционное или следящее движение, выполнен анализ независимых управляющих воздействий в разных структурах регулирования. Сформулированы алгоритмы оптимизации формы фазных (управляющих) токов. Методом физического моделирования установлено, что в зонах перегрузок удобнее всего пользоваться прямоугольной осциллограммой фазного тока с в схеме

последовательного возбуждения. Показано, что в диапазоне малых мощностей улучшенные массогабаритные показатели могут быть достигнуты в синхронных реактивных электроприводах со сложной (составной с немагнитопроводящими вставками) конструкцией ротора. В электроприводах больших мощностей (более 500 кВт) рациональной является многофазная схема с индивидуальными источниками в каждой фазе. Улучшенные показатели по ускорению достигаются без усложнения конструкции ротора за счет отказа от синусоидальных законов управления. В этом случае показатели рассматриваемого электропривода сопоставимы с показателями синхронного реактивного электропривода, имеющего составной (сложный) ротор. Форма фазного тока на начальном этапе наладки выбирается прямоугольной, а соотношение между токами возбуждения и якорным определяется в зависимости от степени насыщения магнитной системы.

*Ключевые слова:* синхронные реактивные электроприводы, асинхронные электроприводы, перегрузочные моменты, удельные показатели.

This article presents methods of improving the specific mass and dimensions of electric drives for objects that realize positional or tracking motion. The analysis was made of the number of independent control actions in different regulatory structures. The algorithms for optimizing the shape of the phase (control) currents are shown by the analysis of the magnetic field. The method of physical modeling established that in zones of overload it is most convenient to use a rectangular waveform of the phase current. In the low power range improved specific weight and size parameters can be achieved in synchronous reluctance electric drives with a complex rotor design (compound with non-magnetically conductive inserts). In electric drives of high power (more than 500 kW) a multiphase circuit with individual sources for each phase is efficient. Improved characteristics are achieved without complicating the design of the rotor due to the rejection of sinusoidal control laws. In this case, the parameters of the electric drive in question are comparable of a synchronous reluctance drive having a composite rotor. The shape of the phase current at the initial stage of operating is chosen in the rectangular form, and the ratio between the excitation currents and the armature is chosen depending on the degree of saturation of the magnetic system.

*Key words:* synchronous reluctance electric drives, induction electric drive, electromagnetic torque, specific indicators.

## **Основные этапы синтеза электропривода подачи стана холодной прокатки труб**

БЕЛЫХ И.А., ГРИГОРЬЕВ М.А.

В статье предлагается методом последовательной частной оптимизации выбирать параметры силового электрооборудования и параметров корректирующих связей системы управления объектами с тяжелыми условиями эксплуатации. На примере электропривода подачи стана холодной прокатки труб показаны этапы и дана оценка эффекта предлагаемой методики. Показано, что наилучший эффект достигнут на втором участке за счет исполнения удлиненного двигателя, при этом удается уменьшить момент инерции примерно в два раза, а общее время переходного процесса – примерно на (25–30)%.

Используемые на практике методы проектирования силового электрооборудования высокоточных электроприводов могут быть дополнены рядом этапов. Наиболее актуально это для объектов, которые работают в широком диапазоне изменения нагрузки на валу рабочего органа (более 4-5 номинальных значений), и/или которые в канале регулирования содержат элементы с механической податливостью. Так, за счет рационального выбора передаточного числа редуктора можно существенно снизить влияние резонансных максимумов, обусловленных податливостями механической части, на качество настройки последовательного корректирующего устройства традиционной для металлургического электропривода схемы подчиненного регулирования переменных. Предложенная методика может быть успешно применена и в системах с традиционными параметрами для механизмов, работающих в частых пуско-тормозных режимах.

Например, отказ от обычных для асинхронного электропривода отношений длины ротора к его диаметру позволяет в некоторых случаях снизить потери в системе примерно в два раза.

*Ключевые слова:* станы холодной прокатки труб, последовательная частная оптимизация, быстроедействие.

This article presents a method for choosing parameters of power electrical equipment and parameters of corrective connections of the object management system with heavy operating conditions by the method of sequential partial optimization. The example of the electric drive of the feed shows the steps and an assessment of the effect of the proposed procedure. It was shown that the best effect was achieved in the second section due to the performance of an elongated electric drive, while it was possible to reduce the moment of inertia by approximately two times, and the total time of the transient process decreased by approximately (25-30)%. Practical methods for designing power electrical equipment for high-precision electric drives can be supplemented by a

number of steps. This is most relevant for objects that operate with a wide range of load changes on the shaft of the working element (more than 4-5 nominal values) and (or) that contain elements with mechanical compliance in the control channel. Thus, due to the rational choice of the gear ratio, it is possible to significantly reduce the effect of resonant maxima due to the compliance of the mechanical part on the quality of the adjustment of the serial correction device, even in the traditional for the metallurgical electric drive scheme of subordinate variable control. The proposed method can be very successfully used also in cases with the traditional parameters of the system for mechanisms operating in frequent start-up braking regimes. So, the rejection of the ratio of the length of the rotor to its dimmer, traditional for an asynchronous electric drive, allows in some cases to reduce losses in the system by approximately two times.

*Key words:* cold rolling mills, sequential partial optimization, fast response.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.26 – 30*

### **Повышение энергетических и надежностных показателей многоуровневых преобразователей частоты для объектов нефтегазового сектора**

Чупин С.А., Григорьев М.А.

Предложена методика улучшения энергетических показателей и повышения надежности системы за счет перехода к многоуровневым схемам силовых цепей полупроводниковых преобразователей частоты для класса напряжений до 1 кВ. Для решения задачи на первом этапе выбиралось оптимальное количество фаз по критерию минимальной стоимости, далее этот критерий был дополнен ограничением электрических потерь и на заключительном этапе задача решалась из условия обеспечения заданного показателя безотказной работы. Современные полупроводниковые преобразователи на большие установленные мощности имеют модульное исполнение, при этом каждый из узлов преобразователя частоты (выпрямитель, инвертор) содержит, как правило, несколько модулей, подключаемых параллельно. В этих условиях увеличение количества фаз, при котором фазная обмотка двигателя выполняется многофазной, а силовые модули автономного инвертора, ранее включенные в параллель, гальванически развязываются и подключаются отдельно к каждой из фаз двигателя, позволяет увеличить надежностные показатели системы без каких-либо дополнительных капитальных затрат. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что за счет развития современной элементной базы экономически обосновано применение трехуровневых преобразователей частоты для напряжения до 1 кВ. Установлено, что кроме известных преимуществ такой

схемы (снижений коммутационных потерь и перенапряжения на фазной обмотке двигателя) удастся дополнительно повысить КПД преобразователя частоты за счет большего числа степеней свободы при переходе к многофазным схемам.

*Ключевые слова:* многоуровневые преобразователи частоты, надежность, показатели, электрические потери.

This article presents a method of improving energy performance and improving the reliability of the system due to the transition to multi-level circuits of power circuits of a semiconductor frequency converter for a voltage class up to 1 kV. This task was solved in several stages. At the first, the optimal number of phases was selected by the criterion of minimum cost. At the next stage, this criterion was supplemented by the limitation of electrical losses. At the final stage, this task was solved from the condition of ensuring a given indicator of non-failure operation. It is shown that modern semiconductor converters for large power have a modular design. The nodes of the frequency converter (rectifier, inverter) have a several modules that are connected in parallel. The phase winding of the motor is multiphase. The power modules of the autonomous inverter, previously included in parallel, are galvanically isolated and connected separately to each phase. So, increasing of the number of phases allows increasing the reliability of the system without any additional capital expenditure. It has been shown theoretically and experimentally that, due to the development of the modern element base, the use of three-level frequency converters for the voltage level up to 1 kV is economically justified. It was found that, in addition to the existing advantages of such a scheme (reducing switching losses and overvoltage on the phase winding), it is possible to additionally increase the efficiency of the frequency converter due to a greater number of degrees of freedom in the transition to multiphase circuits.

*Key words:* multilevel converters, reliability, electric losses.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.31 – 35*

### **Повышение надежности работы систем релейной защиты и автоматики электрических станций и подстанций**

ГРЫЗЛОВ А.А., ГРИГОРЬЕВ М.А.

Проанализированы основные причины ложного (неправильного) срабатывания микропроцессорных систем релейной защиты. Рассмотрены методы повышения надежности показателей системы релейной автоматики. Анализ статистических данных

показал, что вероятность безотказной работы микропроцессорных систем релейной защиты составляет не менее 0,998. Повышение надежных показателей микропроцессорных систем защиты не диктует пересмотра Правил устройств электроустановок, а требует применения высококачественной кабельной продукции с нормированными техническими характеристиками, перехода к цифровому формату передачи данных с ограничением количества переменных, подаваемых по одному последовательному каналу. Установлены примерные верхняя и нижняя границы зависимости стоимости повышения надежности микропроцессорной системы. Например, снижение отказов в два раза потребует повысить капитальные затраты на защиту от электромагнитных помех примерно в (3–4) раза. Сохранение уровня надежности микропроцессорной системы в процессе эксплуатации возможно только при выполнении плановых мероприятий по оценке электромагнитной обстановки. Как показали статистические данные, наиболее вероятной причиной неправильного срабатывания релейной автоматики являются атмосферные явления – молнии и вызванные ими перенапряжения. Поэтому на этапе оценки электромагнитного состояния необходимо обратить внимание на состояние системы заземления, а диагностику неисправности рациональнее всего выполнять методом половинного деления с учетом вероятности безотказной работы.

*Ключевые слова:* высоковольтное электротехническое оборудование, микропроцессорная система управления, электромагнитная обстановка, электромагнитная совместимость.

This article presents the main reasons of the false (incorrect) operation of the microprocessor relay protection system. The methods of increasing the reliability indicators of the relay automation system are presented. It is shown an analysis of statistical data submitted by PAO “Rosseti” and the probability of failure-free operation of microprocessor relay protection systems is not lower than 0.998. Increasing the reliability of microprocessor protection systems does not require a revision of the Electrical Installation Rules, but requires the use of high-quality cable products with normalized technical characteristics and the transition to a digital data transfer format with limiting the number of variables fed through one serial channel. It shows the upper and lower bounds for the cost of improving the reliability of the microprocessor system. For example, reducing the failure rate by half will require increasing the capital costs of electromagnetic protection by (3–4) times. The saving the level of reliability of the microprocessor system in the process of operation is possible only with the planned measures of assessing the electromagnetic situation. As shown by statistical data, the most likely cause of incorrect operation of relay automation is atmospheric phenomena – lightning and overvoltage



caused by them. Therefore, at the stage of evaluating the electromagnetic state, it is necessary to pay attention to the state of the grounding system, and it is most rational to perform the fault diagnosis using the half-division method, taking into account the probability of failure-free operation.

*Key words:* high-voltage electrotechnical equipment, microprocessor control system, electromagnetic environment, electromagnetic compatibility.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.37 – 42*

### **Контроль параметров процесса электронно-лучевой наплавки с использованием сигналов токов проволоки и изделия**

ЩЕРБАКОВ А.В., МАРТЫНОВ В.Н., ХАРИТОНОВ И.А., ГАПОНОВА Д.А.,  
РОДЯКИНА Р.В., ДРАГУНОВ В.К.

Предложен метод контроля режима переноса металла при электронно-лучевой наплавке с подачей присадочной проволоки, основанный на одновременной регистрации потенциалов проволоки и изделия, соединенных с корпусом установки через резисторы.

Выделены основные режимы переноса металла, наблюдаемые при изменении погонной энергии. Показана актуальность решаемой задачи для создания задела по аддитивным технологиям. Описана схема проведения экспериментальных исследований на установке ЭЛА-15И, приведены полученные осциллограммы. Показана связь характеристик регистрируемых сигналов с режимами работы оборудования и параметрами переноса.

Установлено, что при изменении только скорости подачи присадочной проволоки можно определить переход от капельного переноса к режиму разбрызгивания металла.

Обоснована возможность выявления режима возникновения брызг металла, а также аварийных режимов, связанных с прекращением подачи проволоки или чрезмерным увеличением скорости ее подачи. Проведен анализ влияния плазменных процессов на сигналы, регистрируемые по разработанной схеме, в том числе показано что для снижения влияния этих процессов необходимо уменьшить сопротивление измерительной цепи.

Приведены фотографии процесса, соответствующие определенным интервалам осциллограмм.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая наплавка, аддитивные технологии, система мониторинга, система управления, контроль переноса металла.

A method for controlling the metal transfer regime in electron-beam surfacing with feeding a filler wire, based on the simultaneous detection of the potentials of the wire and the workpiece connected to the ground through resistors is proposed. The main modes of metal transport observed when changing the heat input are identified. It shows the urgency of the problem being solved to create a reserve for additive technologies. A scheme for conducting experimental studies on the ELA-15I facility is described and the obtained oscillograms are given. The connection between the characteristics of the detected signals and the operation modes of the equipment and the transfer parameters is shown. It has been found that when changing only the feed rate of the filler wire, it is possible to determine the transition from the drop transfer to the metal spraying regime. The possibility of detecting the mode of occurrence of metal sprays, as well as emergency regimes associated with stopping the feeding of the wire or an excessive increase in the speed of its feeding, is substantiated. The analysis of the influence of plasma processes on the signals recorded by the developed scheme is carried out, including that it is necessary to reduce the resistance of the measuring circuit in order to reduce the influence of these processes. Photos of the process corresponding to certain intervals of the recorded oscillograms are given.

*Key words:* electron beam surfacing, additive manufacturing, monitoring system, control system, metal transfer control.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.43 – 48*

### **Применение диаграмм детерминированных конечных автоматов для формального описания режимов работы электрических аппаратов**

ГОДЖЕЛЛО А.Г., КУКИН Е.А., МУРЗАКАЕВ П.В.

Рассмотрены способы описания поведения и взаимодействия электрических аппаратов. На примере современного модульного многорежимного автоматического выключателя показана необходимость и возможность применения метода формального описания работы электрических аппаратов с помощью элементов теории детерминированных конечных автоматов. Продемонстрировано решение задачи функциональной идентификации рассматриваемого аппарата и невозможность верификации технических решений для управления электроэнергией на базе взаимодействующих аппаратных комплексов без наличия формального описания всех входящих в систему аппаратов. Показано, что применение теории детерминированных конечных автоматов для формального представления электрических аппаратов как математического объекта позволяет перейти к имитационному моделированию работы как отдельных устройств,

так и комплекса взаимодействующих аппаратов.

*Ключевые слова:* электрический аппарат, детерминированный конечный автомат, верификация схемных решений, многофункциональный автоматический выключатель, комплексы взаимодействующих аппаратов.

The article submits ways of describing the behavior and interaction of electrical apparatus. For example, modern modular circuit breaker shows possibility and necessity of use formal description of electrical apparatus operation modes through deterministic finite automata. The article demonstrates the solution the problem of the functional identification of this apparatus along with the impossibility of verifying the technical solutions for the interacting apparatus complexes without an available formal description of all members of the system devices. It is shown that the application of the theory of deterministic finite automata for the formal presentation of electrical apparatus as a mathematical object allows you to go to the simulation of both individual devices as well as the complexities of interacting apparatuses.

*Key words:* electrical apparatus, deterministic finite automata, verification of circuit solutions, multifunctional circuit breaker, interacting apparatus complexes.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.49 – 52*

### **Математическое моделирование процесса гашения дуги в аппаратах с жидкометаллическим контактом**

КИРЕЕВ К.В.

Рассмотрено моделирование процесса дугогашения при отключении силовых цепей постоянного тока аппаратами с жидкометаллическим рабочим телом. Так как устройства с жидкометаллическим контактом предназначены для коммутации конкретных цепей электропитания, использована возможность совместного рассмотрения электрической цепи и выключателя для оптимизации процесса отключения. Полученная математическая модель позволяет по известному температурному профилю динамической дуги определять основные динамические характеристики дугового разряда – ток, напряжение, проводимость, температуру, радиус проводящей зоны ствола. Показано, что если реальный температурный профиль дуги не известен, расчет таких интегральных характеристик процесса дугогашения, как ток, сопротивление и напряженность дугового ствола может проводиться по эквивалентному температурному профилю. На основе полученной модели разработана методика расчета процесса отключения цепи аппаратами с жидкометаллическими контактами с изменением топологической структуры

отключаемой цепи в процессе коммутации.

*Ключевые слова:* моделирование, коммутация, электрическая дуга, жидкометаллический контакт, устойчивость, температурный профиль.

The problem of simulation of the arc-suppression process in the case of switching off high-current direct current circuits by devices with a liquid-metal working medium is considered. Since devices with a liquid metal contact are designed to switch specific power circuits, the possibility of joint consideration of the electrical circuit and the switch is used to optimize the shutdown process. The obtained mathematical model allows, based on the known temperature profile of the dynamic arc, to calculate the main dynamic characteristics of the arc discharge - current, voltage, conductivity, temperature, trunk conductor radius. The ability to calculating such arc extinction integral performances as current, resistance and intensity of arc trunk in presence of indeterminate real dynamic arc temperature profile on equivalent temperature profile is shown. On basis of resulting mathematical model the calculation methodology for process of circuitry cutout by liquid-metal devices with a change in the topological structure of the switched-off circuit during the commutation process is developed.

*Key words:* modeling, commutation, electric arc, liquid-metal contact, stability, a temperature profile.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.53 – 57*

### **Электродинамические силы в ошиновке электротехнического оборудования автономных систем**

ЦИЦИКЯН Г.Н., АНТИПОВ М.Ю.

Статья посвящена оценке уровня электродинамических сил, возникающих в ошиновке электротехнического оборудования, как важнейшей задаче обеспечения устойчивости энергетических комплексов при коротком замыкании. Рассмотрены электродинамические силы, возникающие между прямолинейными проводниками при их различном расположении. Показана разница в подходах при определении электродинамических сил между параллельными проводниками путём непосредственного расчета и определения этих сил энергетическим методом, сводящемуся к нахождению производной от коэффициента взаимной индукции по соответствующей координате. Непосредственный метод исключает появление сил бокового смещения, в то время как энергетический метод позволяет раскрыть их физический смысл. Приводится расчёт сил взаимодействия на примере характерной конфигурации шинпровода в случае двойного замыкания на корпус

или землю.

*Ключевые слова:* автономные системы, электротехническое оборудование, ошиновка, электродинамические силы, частичная индуктивность, расчет.

The article is devoted to the evaluation of the electrodynamic forces generated in the busbars for the electrical equipment. The paper considers electrodynamic forces between linear conductors at various location. This paper pay attention to the difference in approach when finding electrodynamic force between parallel conductors direct calculations and the energy method, which amounts to finding the derivative the mutual induction coefficient according the generalized coordinate. The direct method eliminates the appearance of lateral forces , while the energy method allows to disclose physical meaning. Also we present the calculation of the electrodynamic forces an example for characteristics configuration of the busbars in the case for two-phase ground fault.

*Key words:* stand-alone systems, electrical equipment, busbars, electrodynamic forces, partial inductance, calculation.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.58 – 63*

### **Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения**

САРАПУЛОВ Ф.Н., ФРИЗЕН В.Э., ШВЫДКИЙ Е.Л., СМОЛЬЯНОВ И.А.

Сферой применения электропривода на основе тяговых линейных асинхронных двигателей является промышленный и городской транспорт. Главными достоинствами такого электропривода являются отсутствие ограничений по ускорениям и углам подъема транспортного средства, а также экологическая чистота. Весьма актуальной при этом становится разработка быстродействующих программных средств проектирования и анализа режимов работы линейных электродвигателей. Применение метода конечных элементов для решения полевых задач в трехмерной постановке и в динамических режимах работы транспортного средства требует больших временных затрат. Предлагается использовать метод детализированных магнитных схем замещения продольного сечения линейного асинхронного двигателя с введением поправочного коэффициента Болтона для учета влияния поперечного краевого эффекта в сплошном вторичном элементе. Показаны особенности моделей на основе многослойных магнитных схем замещения и выполнена оценка влияния количества слоев на расчетное тяговое

усилие двигателя. При выборе рационального отношения полюсного деления к зазору двигателя достаточно корректной оказывается двухслойная схема замещения. Вторичный элемент представлен в модели как набор стержней прямоугольного сечения, соединенных параллельно. Показано влияние способа расчета ЭДС движения стержней вторичного элемента на точность определения тягового усилия двигателя. Наибольшая погрешность наблюдается в области малых скольжений (при переходе двигателя в режим генераторного торможения) и простейшей записи производной от магнитного потока по координате. При усложнении формулы вычисления производной указанная погрешность резко уменьшается. Другим способом уменьшения погрешности вычисления ЭДС движения в контурах вторичного элемента является увеличение количества этих контуров путем уменьшения ширины элементарного стержня. Следует отметить наглядность метода детализированных магнитных схем замещения и удобство оперативного просмотра результатов.

*Ключевые слова:* линейная индукционная машина, магнитное поле, метод конечных элементов, детализированные схемы замещения, оценка точности.

The area of application of the traction linear asynchronous motors are systems of industrial and urban transport. The main advantage of these actuators are the removal of restrictions on the accelerations and the angles of the vehicle, as well as their ecological cleanliness. Actual becomes the task of developing high-speed software for the design and analysis modes of operation of linear motors. Application of the finite element method for solving field problems in three-dimensional and dynamic modes of vehicle operation is time-consuming. It is proposed to use the method of detailed magnetic equivalent circuits of a longitudinal section of a linear induction motor with the introduction of the correction factor Bolton to account for the influence of transverse edge effect in solid secondary element. The features of the models based on multilayer magnetic equivalent circuit and estimation of the influence of number of layers on the calculated tractive effort of the engine. When choosing a rational relationship to the pole pitch of the engine enough to correct the gap is two-layered equivalent circuit. The secondary element is represented in the model as a set of rectangular bars connected in parallel. The influence formula calculation EMF motion of the rods of the secondary element to the calculation accuracy of the traction motor force. The largest error is observed in the region of small slides (when moving the motor in the generator mode of braking) and the simplest of recording derivative of the magnetic flux coordinate. The complication of the calculation formula specified derivative the error decreases sharply. Another way to reduce inaccuracy of calculating the electromotive force of the movement in circuits of the secondary element is the increase in the number of these

contours by reducing the width of the elementary rod. It should be noted the illustration of the method of detailed magnetic equivalent circuits and the convenience of instant viewing of the results of the analysis of options.

*Key words:* linear induction machine, magnetic field, finite element method, a detailed equivalent circuit, accuracy assessment.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.63 – 69*

### **Влияние наружного экрана на эффективность линейного импульсного электромеханического преобразователя индукционного типа**

БОЛЮХ В.Ф., ДАНЬКО В.Г., ОЛЕКСЕНКО С.В.

Рассмотрен линейный импульсный электромеханический преобразователь индукционного типа с наружным магнитным, электромагнитным или комбинированным магнитно-электромагнитным экраном. С использованием метода конечных элементов разработана математическая модель преобразователя, учитывающая быстропротекающие взаимосвязанные электромагнитные, тепловые и механические процессы. Рассмотрено влияние геометрических параметров экранов на показатели преобразователя. Введен критерий эффективности, учитывающий относительные значения КПД, массы и поля рассеяния преобразователя. Показано, что эффективность преобразователя с комбинированным экраном в 2-3 раза выше, чем при использовании магнитного или электромагнитного экранов аналогичных габаритов.

*Ключевые слова:* линейный импульсный электромеханический преобразователь, магнитный экран, электромагнитный экран, комбинированный экран, критерий эффективности.

We consider a linear pulsed induction type electromechanical converter with an external magnetic, electromagnetic or combined magnetic-electromagnetic shield. Developed a mathematical model of a converter, which takes into account the rapidly occurring interconnected electromagnetic, thermal and mechanical processes, which is implemented using the finite element method. Considered the influence the geometric parameters of the screens at the converter performance. The criterion of effectiveness, taking into account the relative values of efficiency, weight, and the scattering field converter, was introduced. Shown that the efficiency the converter with the combined screen is 2-3 times higher than when using magnetic or electromagnetic screens of similar dimensions.

*Key words:* linear pulsed induction type electromechanical converter, magnetic shield, electromagnetic shield, combined shield, criterion of effectiveness.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.70 – 75*

### **Комбинированный преобразователь частоты для плавного разгона асинхронных электроприводов с тяжёлыми условиями пуска**

МУСТАФА Г.М., ГУСЕВ С.И., КУЗИКОВ С.В., ЧЕРНОВ И.С.

Рассмотрена возможность использования тиристорного преобразователя частоты с дополнительным управляемым устройством продольной компенсации реактивной мощности для плавного пуска асинхронных двигателей с большим моментом инерции исполнительных механизмов, как альтернативы транзисторным преобразователям. Показано, что дополнительное устройство в виде транзисторно-конденсаторного преобразователя может рассматриваться, как регулируемый конденсатор, эквивалентная ёмкость которого может изменяться от весьма большой (в пределе - бесконечно большой) до некой фиксированной минимальной. Напряжение регулируемого серийного конденсатора обеспечивает необходимые условия коммутации тиристорного инвертора, а емкостное сопротивление – компенсацию реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем и тиристорным инвертором, уменьшая токовую нагрузку двигателя и преобразователя. Дополнение тиристорного преобразователя тока управляемым устройством продольной компенсации реактивной мощности в виде транзисторно-конденсаторного блока позволяет осуществить режим плавного пуска асинхронных двигателей, аналогичный условиям пуска синхронных машин. Приведены результаты моделирования, подтверждающие достижение необходимого эффекта. Показано, что дополнительное устройство в виде транзисторно-конденсаторного преобразователя является робастной системой, хорошо адаптирующейся к разнообразным условиям работы электропривода. Функциональная эквивалентность транзисторного преобразователя частоты и тиристорного преобразователя с дополнительным транзисторно-конденсаторным блоком при существенно меньшей стоимости последнего, определяет перспективы использования нового решения для плавного пуска мощных электроприводов с асинхронными двигателями в условиях действия больших моментов инерции исполнительных механизмов.

*Ключевые слова:* асинхронный электропривод, плавный пуск, тиристорный преобразователь частоты, транзисторно-конденсаторный преобразователь, регулируемый серийный конденсатор.



The use of current source frequency converter with an additional synchronous static series compensator for soft start of induction motors with high moment of inertia of operating mechanisms, as an alternative to transistor converters, is considered. It is shown that an additional unit in a form of transistor-capacitor convertor can be considered as an adjustable capacitor, the equivalent capacitance of which can be varied from very high values (in the limit of infinitely large) up to some fixed minimum value. Voltage of adjustable series capacitor provides the necessary conditions for commutation of the thyristor inverter, and the capacitance - for compensation of reactive power consumed by an inductor motor and a thyristor inverter, reducing the current load of the motor and the converter. Addition of current source frequency converter by the controlled series compensator of reactive power in the form of a transistor-capacitor unit enables a soft start of induction motors similar to starting mode of synchronous machines. Simulation results confirming the achievement of the desired effect are given. It is shown that the additional device in the form of transistor-capacitor converter is a robust system, adaptable to the diverse conditions of motor drive operation. Functional equivalence of the transistor frequency converter and the thyristor frequency converter with an additional transistor-capacitor unit, having the substantially lower cost, determines the prospects of using of a new solution for a soft start of powerful electric drives with induction motors in conditions of high moments of inertia of operating mechanisms.

*Key words:* asynchronous electric drive, soft start, thyristor frequency converter, transistor-capacitor converter, adjustable series capacitor.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.76 – 79*

### **О снижении влияния вибрации и шума механического происхождения в электрических машинах**

МЕДВЕДЕВ В.Т., МАКАЛЬСКИЙ Л.М.

Рассмотрены возможности снижения вибрации и шума электрических машин, в которых вместе с вибровозмущающими силами магнитного происхождения, действующими в радиальном, тангенциальном и аксиальном направлениях, имеют место составляющие вибровозмущающих сил механического происхождения, среди которых особое место занимают силы, обусловленные работой подшипников качения. Показано, что вибрации и шум, обусловленные этими силами, зависят от ряда факторов, связанных с конструктивно-технологическими погрешностями изготовления подшипников и подшипниковых узлов в целом, а также от свойств и характеристик смазывающих

материалов, которые выбираются исходя из условий эксплуатации и конструктивных особенностей подшипниковых узлов. Показано влияние составляющих, обусловленных различными дефектами элементов подшипников качения, как на спектральный состав вибровозмущающих сил, так и на виброакустические характеристики электрических машин в целом и возможность улучшения виброакустических характеристик с помощью подшипников качения, изготовленных из керамики или гибридных (металл-керамика).

*Ключевые слова:* электрические машины, вибрация, шум, спектральный состав, керамические подшипники.

Considered the possibility of reducing the vibration and noise of electrical machines, which together with vibration forces of magnetic origin acting in the radial, tangential and axial directions, take place components vibration forces of mechanical origin, among which a special place is occupied by the forces due to bearings rolling. It is shown that the vibration and noise caused by these forces depend on a number of factors related to structural and technological errors in the manufacture of bearings and bearing assemblies in general, and the properties and characteristics of lubricants, which are selected based on operating conditions and design features of the bearing units. Shows the effect of the components due to various defects in elements of rolling bearings, as on the spectral composition of vibration forces and vibroacoustic characteristics of electrical machines in general and the possibility of improving vibroacoustic characteristics using rolling bearings made of ceramics or hybrid (metal-ceramic).

*Key words:* electric machines, vibration, noise, spectral composition, ceramic bearings.

*Электротехника, 2018, № 4, стр.80 – 80*

**Дацковский Л.Х. (К 85-летию со дня рождения)**