

**VI международная научно-техническая конференция «Локомотивы.  
Электрический транспорт. XXI век»**

ПАНЫЧЕВ А.Ю.

**Магнитная развертка пучка релятивистских электронов в прямоугольный растр**

КИМ К.К., ПАНЫЧЕВ А.Ю., БЛАЖКО Л.С.

Рассмотрена конструкция блока магнитной развертки, обеспечивающего сочетание двух линейных (во времени) разверток пучка релятивистских электронов, и поле облучения пучка ускоренных электронов, развернутое в прямоугольный растр, претерпевшее рассеяние на слое воздуха при подлете к мишени. Получены выражения для распределения поглощенной дозы по всей облучаемой поверхности с учетом реального распределения плотности тока в пучке. Приведенные выражения для функции распределения поглощенной дозы могут служить основой для расчетов блоков магнитной развертки радиационно-химических аппаратов с использованием сильноточных промышленных ускорителей электронов, в частности, с выпуском концентрированного пучка ускоренных электронов в атмосферу.

*Ключевые слова:* магнитная развертка, прямоугольный растр, пучок релятивистских электронов, доза облучения.

We describe the design of the block of the magnetic sweep providing a combination of two linear (in time) sweeps of a relativistic electron beam. We consider the radiation field of swept relativistic electron beam in a rectangular raster; this beam was diffraction in air layer at approach to a target. The equations for the distribution of the absorbed radiation dose on whole exposed surface taking into account the real distribution of current density in a beam is received. These equations for the distribution of the absorbed radiation dose are foundations to calculate the block of the magnetic sweep of the radiation-chemical with using the high-current industrial accelerator of electrons particularly with the outlet of concentrate beam of the accelerated electrons to atmosphere.

*Key words:* magnetic sweep, rectangular raster, beam of relativistic electrons, radiation dose.

*Электротехника, №10-2018, стр. 10-14*

**Эффективность процессов энергообмена в тяговых электроприводах с бортовыми емкостными накопителями энергии**

ВАЛИНСКИЙ О.С., ЕВСТАФЬЕВ А.М., НИКИТИН В.В.

Рекуперативное торможение с возвратом энергии в контактную сеть принципиально позволяет сократить расход энергии на тяговые нужды, но в реальных условиях эффективность этого вида торможения как средства снижения расхода энергоресурсов зачастую ограничена. Более эффективным и независимым от внешних условий является электрическое торможение подвижного состава, при котором генерируемая энергия запасается в бортовых накопителях энергии. Наибольшего сокращения расхода энергоресурсов на тяговые нужды при использовании бортовых накопителей энергии в составе тяговых электроприводов можно добиться для подвижного состава, работающего в режиме частых пусков и остановок. К такому типу подвижного состава относятся электропоезда пригородного движения и метрополитенов и городской электротранспорт, специфике работы которых наилучшим образом соответствуют емкостные накопители энергии на основе суперконденсаторов. В статье рассматриваются процессы обмена энергией в системах тягового электропривода с бортовыми емкостными накопителями энергии при разгоне и электрическом торможении подвижного состава. Энергообменные процессы рассматриваются применительно к резистивным зарядно-разрядным контурам и контурам с реакторами, при этом главное внимание уделяется эффективности энергообменных процессов. Потребитель энергии в разрядном контуре накопителя и источник энергии в зарядном контуре представлены источником ЭДС, которая в общем случае может изменяться с течением времени. Получены зависимости энергетической эффективности процессов заряда и разряда емкостного накопителя энергии от его начального напряжения и интенсивности изменения ЭДС потребителя энергии.

*Ключевые слова:* тяговые электроприводы, емкостные накопители энергии, энергетическая эффективность.

Regenerative braking with the return of energy to the traction network in principle allows to reduce energy consumption for traction needs, but in real conditions the effectiveness of this type of braking as a means of reducing the consumption of energy resources is often limited. More

effective and independent of external conditions is the electric braking of the rolling stock, in which the generated energy is stored in the on-board energy stores. The greatest reduction in the consumption of energy resources for traction needs when using on-board energy stores as part of traction electric drives can be achieved for rolling stock operating with frequent starts and stops. To this type of rolling stock belong electric trains of suburban traffic and metro and city electric transport, which specific features of work best correspond to capacitive energy storage devices based on supercapacitors. The article discusses the processes of energy exchange in traction drive systems with onboard capacitive energy storage devices during acceleration and electric braking of rolling stock. Energy exchange processes are considered in relation to resistive charge-discharge circuits and circuits with reactors, with the main focus on the efficiency of energy exchange processes. The energy consumer in the discharge circuit of the energy storage and the source of energy in the charging circuit are represented by a source of EMF, which in general can vary with time. The dependences of the energy efficiency of the charge and discharge processes of the capacitive energy storage device on its initial voltage and the intensity of the change of the energy consumer EMF are obtained.

*Key words:* traction electric drives, capacitive energy storage devices, energy efficiency.

*Электротехника, №10-2018, стр. 15-20*

**Энергетическая эффективность полупроводниковых преобразователей локомотивов**  
МИХАЛЬЧУК Н.Л., КУРИЛКИН Д.Н., УРУШЕВ С.В. МАКАРОВА Е.И.

Приведены расчетные энергетические характеристики тягового привода электровоза 2ЭС5К при работе в середине фидерной зоны контактной сети. На всем диапазоне регулирования, особенно в начальной зоне малых мощностей, тяговый привод с разработанным преобразователем входного электрического сопротивления имеет преимущества. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на токоприемнике электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем составляет 10,87%, с применением электрического полупроводникового вариатора в таком же режиме ведения поезда этот коэффициент равен 7,5%. Показано, что регулированием мощности локомотива путем изменения электрического сопротивления в процессе передачи и потребления электроэнергии из контактной сети повышается энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость локомотива с системой электроснабжения без применения дополнительного оборудования.

*Ключевые слова:* электровоз однофазного переменного тока, коэффициент мощности, энергетическая эффективность, выпрямительно-инверторный преобразователь.

Calculated power characteristics of the traction drive of the 2ES5K electric locomotive are shown when operating in the middle of the feeder zone of the contact network. Throughout the entire control range, and especially in the initial low-power zone, the traction drive with the developed input electric resistance converter has advantages. The distortion factor of the sinusoidal voltage on the current collector of an electric locomotive with a rectifier-inverter Converter is 10,87%, with the use of electric semiconductor variator in the same mode of conducting a train this coefficient is 7,5%. It is shown that by adjusting the power of the locomotive by changing the electrical resistance in the process of transmission and consumption of electricity from the contact network, the energy efficiency and electromagnetic.

*Key words:* electric locomotive single-phase alternating current, power factor, energy efficiency, rectifier-inverter converter.

*Электротехника, №10-2018, стр. 21-25*

### **Применение накопителей энергии для повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава**

ТИТОВА Т.С., ЕВСТАФЬЕВ А.М., НИКИТИН В.В.

Актуальная задача повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава железных дорог и городского электрического транспорта может быть решена путем использования бортовых накопителей энергии в системах тягового электропривода. Бортовые накопители энергии могут выполнять ряд важных функций, способствующих эффективному использованию энергоресурсов: аккумулярование энергии при остановочном электрическом торможении, выравнивание графика потребления мощности от первичного теплового двигателя, аккумулярование избыточной энергии рекуперативного торможения. Рассмотрены основные характеристики электромеханических, индуктивных, емкостных и электрохимических накопителей энергии с точки зрения целесообразности их использования в качестве бортовых накопителей энергии на тяговом подвижном составе.

*Ключевые слова:* тяговой подвижной состав, энергетическая эффективность, накопители энергии.

The actual task of increasing the energy efficiency of the traction rolling stock of railways and urban electric transport can be solved by using onboard energy storages in traction drive systems. On-board energy storage devices can perform a number of important functions that promote the efficient use of energy resources: accumulation of energy during stopping electric braking, equalization of the power consumption from the primary heat engine, accumulation of excess energy of regenerative braking. The main characteristics of electromechanical, inductive, capacitive and electrochemical energy storage devices are considered from the point of view of expediency of their use as on-board energy storage devices on traction rolling stock.

*Key words:* traction rolling stock, energy efficiency, energy storages.

*Электротехника, №10-2018, стр. 26-33*

### **Автоматизация настройки селективной характеристики тягового генератора тепловоза с электрической передачей**

ГРАЧЕВ В.В., ГРИЩЕНКО А.В., КРУЧЕК В.А.

В статье рассматривается метод автоматизации настройки селективной характеристики тягового генератора тепловоза, который дает возможность наиболее полно и эффективно использовать свободную мощность дизеля. Задача минимизации функции нескольких переменных решена методом Хука-Дживса, алгоритм которого представляет собой комбинацию исследующего поиска с поочередным изменением переменных и ускоряющего поиска по образцу в направлении, определенном в процессе исследующего поиска. Разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать процесс настройки селективной характеристики тягового генератора тепловоза. На основе предложенного метода расчета разработана серия обучающих программ для изучения электрических схем тепловозов. Главным отличием этих программ от программ подобного назначения является наличие развернутой математической модели изучаемого узла схемы, на которой строится вся функциональность программы. Такая модель позволяет рассчитывать и отображать состояние электрической схемы при любом состоянии элементов управления и в любом режиме работы силовой установки, использовать виртуальные измерительные приборы для поиска неисправностей или настройки схемы.

*Ключевые слова:* тепловоз, система автоматического регулирования, тяговый генератор,

селективная характеристика, диагностическая модель, микропроцессорная система управления.

In this paper we consider the method of automation of the selective characteristics of the locomotive traction generator, which allows the most complete and efficient use of the free power of the diesel engine. Solving the problem of minimizing the function of several variables by the Hook-Jeeves method, the algorithm of which is a combination of the exploratory search with alternating changes of variables and accelerating the search by the sample in the direction determined in the process of the exploratory search. As a result of the research, a computer program has been developed that allows to automate the process of adjusting the selective characteristics of the locomotive traction generator. Using the proposed calculation method developed a series of training programs for study of electrical circuits of diesel locomotives. Their main difference from all other programs of similar purpose is the presence of a detailed mathematical model of the studied circuit node, on which all the functionality of the program is built. This model allows to calculate and display the circuit state at any state of controls and in any mode of operation of the power plant, use of virtual measuring instruments for Troubleshooting or configuration scheme.

*Key word:* the locomotive, the system of automatic regulation of the traction generator, selective characteristics, microprocessor, laser-weed control system.

*Электротехника, №10-2018, стр. 34-38*

### **Повышение производительности электрической тяги в долгосрочной перспективе на новом уровне индустриальных технологий**

БУРКОВ А.Т., МАРИКИН А.Н., МИЗИНЦЕВ А.В., СЕРОНОСОВ В.В.

Повышение производительности электрической тяги железнодорожного транспорта является приоритетной задачей в долгосрочной перспективе. В настоящее время резервы повышения маршрутной скорости движения грузовых поездов только за счет сокращения простоев на технических станциях исчерпаны. Повышение скорости принесет синергетический эффект в производственной деятельности. В восьмилетней Долгосрочной программе развития холдинга «РЖД» (2018–2025 гг.) рассмотрена предпосылка для взаимовыгодного сотрудничества железнодорожной отрасли с предприятиями транспортного машиностроения и промышленности, готовыми работать

на долгую перспективу. Реализация данной программы должна опираться на новые индустриальные технологии. В статье рассматриваются прорывные технологии, включая конкурентоспособные высокопроизводительные системы тягового электроснабжения постоянного тока высокого напряжения и универсальный тяговый подвижной состав с повышенным качеством отбора электрической энергии из электротяговых сетей всех систем по роду тока и уровню напряжения.

*Ключевые слова:* производительность электрической тяги, повышение маршрутной скорости, новые индустриальные технологии, тяговое электроснабжение, постоянный ток, высокое напряжение, универсальный электроподвижной состав.

Improving the productivity of electric traction of railway transport is a priority in the long term. Currently, the reserves for increasing the route speed of freight trains are exhausted only by reducing downtime at technical stations. Increasing the speed will bring a synergistic effect in production activities. The eight-year long-term development program of the Russian Railways holding (2018–2025) considered a prerequisite for mutually beneficial cooperation of the railway industry with transport engineering and industry enterprises, ready to work for the long term. The implementation of this program should be based on new industrial technologies. The article considers breakthrough technologies, including competitive high-performance systems of DC traction power supply of high voltage and universal traction rolling stock with improved quality of selection of electric energy from electric traction networks of all systems by type of current and voltage level at the Russian Railways.

*Key word:* performance of electric traction, increase of route speed, new industrial technologies, traction power supply, direct current, high voltage, universal electric rolling stock.

*Электротехника, №10-2018, стр.39-45*

### **Имитационная модель следящей системы рекуперативно-резисторного торможения электропоезда постоянного тока**

МАЗНЕВ А.С., КИСЕЛЕВ И.Г., ИВАНОВ И.А., КИСЕЛЕВ А.А.

Рассмотрены возможности улучшения энергетических показателей электропоездов постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями; показаны особенности структуры силовой цепи, реализующей контакторно-реостатный пуск, регулирование скорости в тяговом и тормозном режимах с использованием реостатного и

рекуперативного торможения. Предложены направления совершенствования силовой схемы и системы управления, позволяющие повысить энергетическую эффективность рекуперации. Разработана следящая система рекуперативно-реостатного торможения и математическая модель силовой цепи применительно к электропоезду серии ЭД4М, определены параметры тормозных резисторов и способ регулирования их сопротивления в режиме электродинамического торможения. Оценено качество регулирования тока рекуперации предложенной следящей системой, обеспечивающей стабилизацию его значения при изменении напряжения контактной сети. Показана возможность увеличения энергии, отдаваемой источнику питания в режиме рекуперативно-реостатного торможения, на 3–6 %. Рекомендовано для повышения быстродействия и точности регулирования использовать искусственную нейронную сеть, позволяющую объединить системы управления импульсным преобразователем и автоматического управления торможением.

*Ключевые слова:* электропоезд постоянного тока, рекуперативно-реостатное торможение, следящая система, импульсное регулирование.

The possibilities of improving the energy indicators of DC electric trains with collector traction motors are considered. The features of the structure of the power circuit realizing contact-rheostatic start-up, speed regulation in traction and braking modes with the use of rheostatic and regenerative braking are shown. The directions of improving the power circuit and control system, which allow to increase the energy efficiency of recuperation, are proposed. The monitoring system of recuperative-rheostatic braking and the mathematical model of the power circuit applied to the typical series of electric train have been developed, the parameters of the braking resistors have been calculated, a method for regulating their resistance in the electrodynamic braking mode has been implemented. The quality of regulating the regeneration current by the proposed monitoring system is estimated, which ensures the stabilization of its magnitude when the voltage of the catenary changes. The possibility of increasing by 3-6% of the energy supplied to the power supply in the regenerative-rheostatic braking mode is shown. It is recommended to use an artificial neural network to combine the pulsed converter control system and automatic braking control systems modules to improve the speed and accuracy of regulation.

*Key words:* DC electric train, recuperative-rheostatic braking, follow up system, pulse controlling.

## **Исследование режимов работы синхронного компенсатора с двумя обмотками возбуждения**

КИМ К.И., КИМ К.К.

В синхронных компенсаторах с двумя обмотками возбуждения возможно осуществить принудительный поворот магнитного потока ротора и тем самым в аварийных режимах добиться более благоприятного воздействия компенсатора на генератор. Такая возможность связана с образованием дополнительной электромагнитной мощности в машинах в результате введения возбуждения и по второй оси компенсатора.

Регулирование должно обеспечить относительно неизменное и возможно большее значение составляющей электромагнитной мощности генератора, обусловленной компенсатором. Максимальное значение этой мощности генератора будет таким же, что и в случае компенсатора обычного исполнения при прочих равных условиях. С позиции повышения динамической устойчивости линии электропередачи, использование второй обмотки возбуждения может привести в лучшем случае к реализации положительного максимума указанной составляющей мощности в необходимый промежуток времени.

Регулирование возбуждения компенсатора по законам синуса и косинуса относительного угла между роторами генератора и компенсатора, их производных, а также производных продольной и поперечной составляющих токов статора может обеспечить увеличение электромагнитной мощности генератора на относительно постоянную величину.

Регулирование по законам синуса и косинуса угла компенсатора относительно вектора напряжения приемной системы, их производных, а также производных составляющих токов статора приводит к увеличению амплитуды угловой характеристики генератора, как это имеет место при уменьшении взаимной реактивности между генератором и приемной системой. Напряжение на контактных кольцах компенсатора, определяемое в основном постоянной времени обмотки возбуждения компенсатора и его скольжением, может достигнуть достаточно большой величины, при этом предел по динамической устойчивости достигает предела послеаварийного режима.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, синхронный компенсатор, две обмотки возбуждения, регулирование, аварийный режим, динамическая устойчивость.

A forced rotation of the magnetic flux of the rotor in the synchronous compensators with two excitation windings allows to achieve a more favorable effect of the compensator on the

generator in emergency modes. This possibility is connected with the creation of additional electromagnetic power in machines as a result of the introduction of excitation by the second axis of the compensator. The control should provide a relatively constant and possibly greater value of the component of the generator electromagnetic power caused by the compensator. The maximum value of this generator power will be the same as in the case of conventional compensator at all equal other conditions. From the position of increasing the dynamic stability of the power line the use of the second excitation winding can lead, at best, to the realization of a positive maximum of this power component in the required time interval. The control of the compensator excitation under the laws of sine and cosine of the relative angle between the rotors of the generator and the compensator, their derivatives and the derivatives of the longitudinal and transverse components of the stator currents can provide an increase of the generator electromagnetic power by a relatively constant value. The control under the laws of the sine and cosine of the compensator angle relative to the voltage vector of the receiving system, their derivatives and derivatives of the stator current components leads to an increase of the amplitude of the generator angular characteristic as in the case with a decrease of the mutual reactivity between the generator and the receiving system. The voltage on the contact rings of the compensator determined mainly by the time constant of the compensator excitation winding and its sliding can reach a sufficiently large value, at the same time the limit of dynamic stability reaches the limit of the post-emergency mode.

**Key words:** power line, synchronous compensator, two windings of excitation, control, emergency mode, dynamic stability.

*Электротехника, №10-2018, стр. 55-59*

### **Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава**

ШАРЯКОВ В.А. ШАРЯКОВА О.Л., АГУНОВ А.В. ТРЕТЬЯКОВ А.В.

Рассмотрен способ повышения энергетической эффективности тягового электропривода за счет накопления и дальнейшего использования части энергии торможения, которая на современном подвижном составе рассеивается в тормозных резисторах из-за отсутствия потребителей в контактной сети. В качестве накопителей электрической энергии предлагается использовать конденсаторы большой емкости (суперконденсаторы). Предложена силовая электрическая схема включения суперконденсаторов в схему электропривода, построена имитационная модель, позволяющая определить основные

энергетические показатели предложенного способа. Основным достоинством предложенной имитационной модели является использование данных, полученных при движении существующего электрического подвижного состава, не оснащенного суперконденсаторами, и записанных в текстовом формате: потребляемый ток из контактной сети, напряжение контактной сети в месте токосъема, ток через тормозные резисторы. Проведенные исследования показали возможность снижения затрачиваемой энергии на разгон подвижного состава, а наличие накопителя энергии на борту позволит снизить вредное влияние работы тягового электропривода на контактную сеть за счет снижения выходного напряжения при рекуперативном торможении.

*Ключевые слова:* электрический подвижной состав, транзисторный тяговый электропривод, рекуперативное торможение, накопитель энергии, суперконденсатор, имитационная модель.

In this paper, we consider a method for increasing the energy efficiency of a traction electric drive by accumulating and further using a part of the braking energy that is dispersed in the braking resistors in the current rolling stock due to the lack of consumers in the contact network. As capacitors of electrical energy in work it is proposed to use capacitors of high capacity (supercapacitors). The paper proposes a power circuit for the inclusion of supercapacitors in the electric drive circuit, and a simulation model is constructed to determine the main energy parameters of the proposed method. The main advantage of the proposed simulation model is the use of data obtained from the movement of an existing electric rolling stock not equipped with supercapacitors and recorded in text format: the current consumed from the contact network, the voltage of the contact network at the point of pick-up, and current through the braking resistors. The results of the research carried out in the work demonstrated the possibility of reducing the energy expended for dispersing the rolling stock, and the presence of an energy storage onboard will reduce the harmful effect of the traction drive on the contact network by reducing the output voltage in regenerative braking.

*Key words:* electric rolling stock, transistor traction electric drive, regenerative braking, energy storage, supercapacitor, imitation model.

*Электротехника, №10-2018, стр. 59-63*

**Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного**

### **тока с помощью компьютерного моделирования**

ЗАЙЦЕВ А.А., РОЛЛЕ И.А., ЕВСТАФЬЕВА М.В., СЫЧУГОВ А.Н., ТЕЛИЧЕНКО С.А.

Высшие гармоники напряжения и тока, создаваемые тяговыми преобразователями, установленными на электроподвижном составе переменного тока, оказывают негативное влияние на системы распределения электроэнергии и компоненты. Точная взаимосвязь между гармониками и потерями сложна для обобщения, поэтому влияние формы тока и напряжения принято определять с помощью коэффициента мощности. Электровозы переменного тока обладают существенным недостатком – малым коэффициентом мощности. Для улучшения энергетических показателей разработаны меры, позволяющие повысить коэффициент мощности. Оценка эффективности предложенных мер, как правило, выполняют с помощью определения коэффициента мощности. В статье предложен алгоритм расчета коэффициента мощности, который учитывает влияние мощности искажений.

*Ключевые слова:* электровоз однофазного переменного тока, коэффициент мощности, энергетическая эффективность, выпрямительно-инверторный преобразователь.

Harmonics of voltage and current generated by traction converters mounted on the electric rolling stock of alternating current, providing a negative impact on the distribution systems of electricity and components. The exact relationship between harmonics and losses is very complex and difficult to generalize, therefore the influence of form and voltage is usually determined by power. AC locomotives are a powerful drawback – low power factors. To improve the energy performance, measures were taken to increase the power factor. Estimates of the effectiveness of the proposed measures, usually by means of determining the power factor. The paper proposes an algorithm for calculating the power factor, which takes into account the effect of distortion power.

*Key words:* electric locomotive single-phase alternating current, power factor, energy efficiency, rectifier-inverter converter.

*Электротехника, №10-2018, стр. 66-71*

### **Перемежающаяся несимметрия токов в электрической сети и ее оценка на шинах тяговых подстанций**

СИЛАЕВ М.А., ДВОРКИН Д.В., ТУЛЬСКИЙ В.Н., ПАЛИС С., КАРТАШЕВ И.И.

В высоковольтных электрических сетях России регулярно встречаются нарушения нормативных требований к качеству электрической энергии. Это приводит к особо негативным последствиям в районах с электрифицированными железными дорогами переменного тока, которые являются мощным источником искажений, в том числе, приводит к возникновению несимметрии токов. В статье рассмотрен процесс и причины возникновения перемежающейся несимметрии токов – кондуктивной помехи, создаваемой тяговыми подстанциями. Предложены характеристики для оценки данной несимметрии. Выведено аналитическое выражение для определения угла между симметричными составляющими токов на шинах тяговой подстанции. Показано, как влияет на этот угол изменение электрической нагрузки тяговой сети. На примере модели одиночной тяговой подстанции подтверждена корректность предложенного аналитического выражения с учетом принятых допущений.

*Ключевые слова:* электрические сети, качество электрической энергии, тяговые подстанции переменного тока, перемежающаяся несимметрия напряжений и токов, угол между симметричными составляющими.

Systematic violation of power quality regulations take place in the high-voltage electrical grids of Russian Federation. Particularly, this problem is relevant for electrical power supply systems containing AC railways. Electrified railways are powerful sources of electromagnetic disturbances. As rule, they lead to occurrence of current unbalance in electrical grid. The paper considers the intermittent current unbalance, which is the electromagnetic interference created by railway substations. Indexes for intermittent current unbalance assessment are proposed. An analytic expression for determining the angle between symmetrical components of currents on the railway substation buses is derived. Impact of electrical load changes on the angle between symmetrical components is shown. Accuracy of the proposed analytic expression is confirmed, using the example of single railway substation model and taking into account accepted allowances.

*Key words:* electrical grids, power quality, AC railway substations, intermittent voltage unbalance, intermittent current unbalance, angle between symmetrical components.

ГЕЧА В.Я., ЗАХАРЕНКО А.Б., БЕЛОКУРОВА Н.А., НАДКИН А.К.

Рассмотрена конструкция линейного двигателя-маховика для системы ориентации и стабилизации средних и малых космических аппаратов, а также для механизма «быстрого» поворота малого космического аппарата. Предложена конструкция линейного двигателя-маховика с улучшенными массогабаритными характеристиками за счет совмещения подшипникового узла с ротором. Ротор линейного двигателя-маховика представляет собой кольцо, набранное из намагниченных в осевом направлении постоянных магнитов и ферромагнитных шариков. Ротор помещен в трубку из немагнитного материала, на которой смонтированы катушки обмотки статора.

Рассмотрены два варианта конструкции обмотки статора с различным числом пазов на полюс и фазу. Для обоих вариантов проведен электромагнитный расчет двигателя и выбрано оптимальное число пазов на полюс и фазу. Также рассмотрен вопрос выбора смазочного материала для ротора. Предложено использовать магнитную жидкость в качестве смазки, которая обеспечивает значительное уменьшение сил трения по сравнению с традиционными смазочными материалами.

*Ключевые слова:* двигатель-маховик, магнитная жидкость.

The article is devoted to the development of the linear flywheel motor design for the orientation and stabilization system of medium and small spacecrafts, as well as for the "fast" turning mechanism of small spacecraft. The linear flywheel motor design is proposed, which has improved mass-size characteristics by combining the bearing assembly with the rotor. The rotor of the linear flywheel motor is a ring, recruited from permanent magnets magnetized in the axial direction and ferromagnetic balls. It is placed in a tube of non-magnetic material, where the stator winding coils are mounted. The article considers two variants of the stator winding design with different number of slots for the pole and phase. The electromagnetic calculation of the motor is performed for both and the optimum number of slots for the pole and phase is chosen. The question of the choice of the lubricant for the rotor is considered. It is proposed to use a magnetic fluid as a lubricant, because magnetic fluid, enveloping magnets, will provide a significant reduction in frictional forces, and hence heat release, even at low rotation speeds relative to traditional lubricants.

*Key words:* motor-flywheel, magnetic fluid.

## **Особенности испытаний распределительных трансформаторов на стойкость при коротких замыканиях**

Ларин В.С., Горшунов В.Ю.

Стойкость при коротких замыканиях (КЗ) является одной из ключевых характеристик, определяющих надежность работы силовых трансформаторов. Методы испытаний на стойкость при КЗ силовых трансформаторов установлены стандартами ГОСТ 20243 и ГОСТ Р 55188 (МЭК 60076-5). В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с испытанием распределительных трансформаторов на стойкость при КЗ, которые не охвачены вышеуказанными стандартами. Рассмотрена зависимость ударного тока КЗ от средней температуры обмоток. Отмечена возможность разогрева обмоток распределительных трансформаторов во время испытаний на стойкость при КЗ и связанного с этим изменения ударного коэффициента. Рассмотрены требования стандартов в части температуры обмоток при испытаниях на стойкость при КЗ. Показано, что при испытаниях распределительных трансформаторов можно ожидать отклонения фактического ударного тока от расчетного значения около 5%, что следует принимать во внимание при проведении испытаний и обработке их результатов. Особенностью испытаний трансформаторов, имеющих соединенную в треугольник обмотку, является то, что, как правило, во время опытов КЗ могут быть зарегистрированы только линейные токи этой обмотки, при этом имеются отличия ударных токов для линейных и фазных токов обмоток. Приведенные в ГОСТ 20243 и ГОСТ Р 55188 (МЭК 60076-5) требования к ударному току КЗ установлены применительно к фазным токам обмоток, а также линейным токам соединенных в звезду обмоток. В статье показано отличие ударного коэффициента при испытании трансформаторов с обмотками, соединенными в звезду и треугольник, и сделаны выводы о необходимости уточнения вышеупомянутых стандартов на требования и методы испытаний трансформаторов на стойкость при КЗ.

*Ключевые слова:* распределительные трансформаторы, стойкость при коротких замыканиях, испытания, ударный коэффициент, схемы испытаний.

Ability to withstand short circuits (SC) is one of the key parameter that define the reliability of power transformers. SC test method standardized in GOST 20243 and GOST R 55188 (IEC 60076-5). This article presents the issues associated with the SC test of distribution transformers, which are not covered by the above mentioned standards. The dependence of peak factor of short-circuit current from average temperature of windings is described. The possibility of

heating of the windings of distribution transformers during the SC test and corresponding changes of peak factor is noted. The requirements of standards related to the winding temperature before SC test is considered. It is shown that during testing distribution transformers, one can expect the deviation of the actual peak factor from its calculated value by about 5%, which should be taken into account when performing the SC tests and analyzing test results. Peculiarity of SC test of three-phase transformers having delta-connected winding is that, generally, only linear winding currents can be measured, while there are differences in peak factor for line and phase currents of the windings. Requirements of GOST 20243 and GOST R 55188 (IEC 60076-5) for asymmetrical test current were establish related to the phase currents of the windings, as well as line currents of star-connected windings. The article shows the difference in the peak factor for line currents when testing transformers with star and delta-connected windings, and conclusions about the need to clarify the requirements of the above mentioned standards is noted.

*Key words:* distribution transformers, ability to withstand short-circuits, short-circuit test, peak factor, tests schemes.

*Электротехника, №10-2018, стр. 82*

**Сергей Ефимович Рывкин (некролог)**