

## **Содержание**

### **Исследование финитных систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами**

ЮДИН Р.Ю., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б., СОЛОДКИЙ Е.М., ВИШНЯКОВ Д.Д., САЛЬНИКОВ С.В.

Рассмотрены линеаризованная математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами с управлением по одному входу, финитные системы управления и процедура синтеза финитного регулятора состояния. Описана специфика практической реализации квазифинитных систем управления. Проведено сравнение векторной системы управления с системой управления с финитным регулятором состояния.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель с постоянными магнитами, финитное управление, векторная система управления, регулятор состояния.

The research considers a permanent magnet synchronous motor linearized mathematical model with single input control, finite control systems and a finite state controller synthesising procedure. The implementation specifics of quasi-finite control systems in practice are described. The vector control system and the control system with a finite state controller comparison is carried out.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor, finite control, vector control system, state controller.

### **Экспериментальное и численное исследование индукционно-резистивной системы обогрева трубопроводов**

ЩЕРБИНИН А.Г., ТЕРЛЫЧ А.Е., ЧЕРНЯЕВ В.В., НАУМОВ М.Д.

Для обогрева сверхдлинных трубопроводов применяются индукционно-резистивные системы, которые представляют собой короткозамкнутую коаксиальную линию. При расчете мощности тепловыделения такой системы необходимо учитывать поверхностный эффект и эффект близости в стальной трубе, которые приводят к существенному увеличению ее электрического сопротивления. Полное сопротивление стальной трубы

системы индукционно-резистивного нагрева (ИРН) было определено путем аналитического решения магнитодинамической задачи. Проверка методики определения мощности выполнена с помощью физического и математического моделирования работы системы ИРН при различных токовых нагрузках. Для физического моделирования была смонтирована экспериментальная установка, представляющая собой участок системы ИРН. При проведении испытаний фиксировался ток и измерялись температуры токопроводящей жилы, поверхности кабеля, трубы и окружающей среды. Переходные тепловые процессы, реализованные на установке, описаны дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в одномерной осесимметричной постановке. Объемная мощность тепловыделения при этом определена с помощью предложенной методики. Сравнительный анализ температурных зависимостей, полученных с помощью физического и численного эксперимента, свидетельствует о достаточно хорошем совпадении результатов.

**Ключевые слова:** электроподогрев трубопроводов, индукционно-резистивный нагрев, тепловые процессы, моделирование.

Induction-resistive systems, which are a short-circuited coaxial line, are used to heat ultra-long pipelines. When calculating the heat dissipation power of such a system, it is necessary to take into account the surface effect and the proximity effect in a steel pipe, which lead to a significant increase in its electrical resistance. The total resistance of the steel pipe of the induction-resistive heating (IRH) system was determined by an analytical solution of the magnetodynamic problem. Verification of the power determination methodology was performed using physical and mathematical modeling of the IRH system operation at various current loads. For physical modeling, an experimental installation was installed, which is a section of the IRH system. During the tests, the current was recorded and the temperatures of the conductive core, the surface of the cable, pipe and the environment were measured. Transient thermal processes implemented at the installation are described by the differential equation of nonstationary thermal conductivity in a one-dimensional axisymmetric formulation. The volumetric heat dissipation capacity is determined using the proposed methodology. A comparative analysis of the temperature dependences obtained using physical and numerical experiments indicates a fairly good coincidence of the results.

**Key words:** electric heating of pipelines, induction-resistive heating, thermal processes, modeling.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 14-19*

**Математическая модель переходных процессов в цилиндрическом линейном двигателе при возвратно-поступательном движения**

ЖУЖГОВ Н.В., КОРОТАЕВ А.Д., ЧАБАНОВ Е.А.

Представлено математическое описание переходных процессов в линейных синхронных двигателях с постоянными магнитами, за основу которого приняты дифференциальные уравнения Парка-Горева применительно к синхронному двигателю вращательного действия, преобразованные с учетом необходимых дополнений. Рассмотрена математическая модель в программной среде MATLAB Simulink линейного синхронного двигателя цилиндрической формы, предназначенная для исследования переходных процессов при поступательном и возвратно-поступательном движение вторичного элемента. Определен наиболее эффективный вариант рассчитанного модуля двигателя для исполнительного механизма плоскошлифовального станка.

**Ключевые слова:** линейный двигатель с постоянными магнитами, линейный синхронный двигатель, постоянные магниты, переходные процессы, возвратно-поступательное движение, математическая модель.

A mathematical description of transients in linear synchronous motors with permanent magnets is presented, based on the Park-Gorev differential equations applied to a synchronous motor of rotational action, transformed taking into account the necessary additions. A mathematical model in the MATLAB Simulink software environment of a cylindrical linear synchronous motor designed to study transients during translational and reciprocating motion of a secondary element is considered. The most effective variant of the calculated engine module for the executive mechanism of the plane grinding machine is determined.

**Keywords:** linear motor with permanent magnets, linear synchronous motor, permanent magnets, transients, reciprocating motion, mathematical model.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 20-24*

**Система поддержки принятия решений при управлении режимами нагрузки в**

## **кабельном блоке**

КУХАРЧУК И.Б., ТРУФАНОВА Н.М.

Повышение пропускной способности кабельных линий возможно в результате перехода от определения значений длительно допустимых токов с помощью нормативных документов, не учитывающих полный режим нагрузки кабельного сооружения, к использованию математических моделей процессов тепломассообмена. Внедрение цифровых технологий в процессы контроля и управления системами электроснабжения обеспечит рост надежности и качества в этих системах. В статье предлагается внедрение в систему управления режимами нагрузки кабельных блоков системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей определить оптимальные для конкретных условий эксплуатации нагрузочные режимы, исходя из температурных ограничений. СППР, основанная на использовании математических моделей, помогает выработать управляющие воздействия по вынужденному снижению нагрузки части линий при возможном превышении допустимых температур. Рекомендации по снижению нагрузки должны учитывать диапазон возможных рабочих токов каждой линии, зависящий от категории потребителя и технологических возможностей. В качестве оптимального рабочего режима выбирается такой, для которого температуры изоляции не превышают допустимых значений, а относительное снижение потребляемой мощности минимально.

**Ключевые слова:** кабельный блок, система поддержки принятия решений, управление режимами нагрузки.

An increase in the capacity of cable lines is possible as a result of the transition from determining the values of long-term permissible currents with the help of regulatory documents that do not take into account the full load mode of the cable structure to the use of mathematical models of heat and mass transfer processes. The introduction of digital technologies into the processes of control and management of power supply systems will ensure an increase in reliability and quality in these systems. The article proposes the introduction of a decision support system (DSS) into the load management system of cable blocks, which allows determining the optimal load conditions for specific operating conditions, based on temperature restrictions. The DSS, based on the use of mathematical models, helps to develop control actions for the forced reduction of the load of a part of the lines with a possible excess of permissible temperatures. Recommendations for load reduction should take into account the range of possible operating currents of each line, determined by the category of the consumer and technological capabilities. The optimal operating mode is chosen for which the insulation temperatures do not exceed the

permissible values, and the relative reduction in power consumption is minimal.

**Key words:** cable block, decision support system, load mode management.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 25-28*

### **Суррогатные модели для диагностики электротехнического оборудования**

КИЛИН Г.А., КАВАЛЕРОВ Б.В., СУСЛОВ А.И., ЩЕРБИНИН Д.А.

Рассмотрена возможность применения современных бесконтактных методов диагностики и контроля электротехнического оборудования. Один из таких методов – использование искусственных нейронных сетей для оценки текущего состояния электротехнического оборудования, которые позволяют своевременно выявлять различные неисправности, оценивать его состояние и предотвращать возможные отказы.

**Ключевые слова:** электротехническое оборудование, суррогатные модели, искусственные нейронные сети, нейросетевая модель, диагностика, предиктивная аналитика.

The possibility of using modern contactless methods of diagnostics and control of electrical equipment is considered. One of such methods is the use of artificial neural networks to assess the current state of electrical equipment, which allow timely detection of various malfunctions, assess its condition and prevent possible failures.

**Key words:** electrical equipment, surrogate models, artificial neural networks, neural network model, diagnostics, predictive analytics.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 29-37*

### **Повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия**

СЕМЕНОВ А.С., МИШУРИНСКИХ С.В., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б.

Предложен алгоритм оптимизации потребления электрической энергии в электротехническом комплексе нефтедобывающего предприятия в рамках одного куста скважин. Реализация алгоритма возможна при внедрении разработанной структуры единой, централизованной схемы управления. Структура управления позволит быстро интегрировать и апробировать новейшие алгоритмы энергоэффективных способов

управления нефтедобывающими агрегатами без риска длительного простоя оборудования и нарушения технологического процесса. Предложенный способ управления позволит оперативно корректировать технологические карты нефтедобычи для обеспечения желаемых результатов нефтедобычи при снижении суммарного потребления электроэнергии на границе балансовой принадлежности.

**Ключевые слова:** нефтедобывающее предприятие, электротехнический комплекс, цифровизация, энергетическая эффективность, контроль энергоресурсов.

An algorithm for optimizing the consumption of electrical energy in the electrical complex of an oil-producing enterprise within a single well cluster is proposed. The implementation of the algorithm is possible with the implementation of the developed structure of a single, centralized control scheme. The management structure will allow you to quickly integrate and test the latest algorithms of energy-efficient ways of controlling oil-producing units without the risk of prolonged equipment downtime and disruption of the technological process. The proposed control method will allow to quickly adjust the technological maps of oil production to ensure the desired results of oil production while reducing the total electricity consumption at the border of the balance sheet.

**Key words:** oil-producing enterprise, electrotechnical complex, digitalization, energy efficiency, control of energy resources.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 37-42*

**Бездатчиковое управление синхронным двигателем на базе нечеткой логики**

ХИЖНЯКОВ Ю.Н., ЮЖАКОВ А.А., СТОРОЖЕВ С.А., НИКУЛИН В.С.

Рассмотрена возможность замены классического ПИ-регулятора на нечеткий регулятор для существующей системы автоматического управления скоростью вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами без датчика положения. Применение ПИ-регуляторов скорости вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами имеет несколько недостатков, которые следует учитывать при проектировании и эксплуатации таких систем. Такие регуляторы требуют тщательной настройки коэффициентов для достижения желаемой производительности; они могут быть чувствительны к изменениям параметров системы - таким как сопротивление обмоток или индуктивность; они могут иметь ограниченную способность реагировать на быстрые и

большие изменения нагрузки. Применение нечеткого регулятора исключает ряд недостатков ПИ-регулятора. Архитектура предлагаемого нечеткого регулятора стандартная - фаззификатор, блок правил, дефаззификатор. Нечеткий регулятор имеет тип «Сугено-Такаги». Фаззификатор выполнен с помощью треугольных терм-множеств, дефаззификация выполняется по методу среднего взвешенного значения. Выполнена оптимизация количества параметров нечеткого регулятора. Моделирование выполнено в пакете MATLAB Simulink с учетом изменяющейся нагрузки на двигатель и изменяющихся параметрах двигателя. Полученные результаты подтверждают возможность и целесообразность замены ПИ-регулятора на нечеткий регулятор.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, нечеткий регулятор.

The possibility of replacing the classical PI controller with a fuzzy controller for the existing system of automatic control of the rotation speed of the rotor of a synchronous motor with permanent magnets without a position sensor is considered. The use of PI-speed controllers of the rotor of a synchronous motor with permanent magnets has several disadvantages that should be taken into account when designing and operating such systems. Such regulators require careful adjustment of the coefficients to achieve the desired performance; they may be sensitive to changes in system parameters, such as winding resistance or inductance; they may have a limited ability to respond to rapid and large load changes. The use of a fuzzy controller eliminates a number of disadvantages of the PI controller. The architecture of the proposed fuzzy controller is standard - a fuzzifier, a block of rules, a defuzzifier. The fuzzy controller is of the «Sugeno-Takagi» type. The fuzzifier is made using triangular term sets, defuzzification is performed using the weighted average method. Optimization of the number of parameters of the fuzzy controller is performed. The simulation was performed in the MATLAB Simulink package, taking into account the changing load on the engine and the changing engine parameters. The results obtained confirm the possibility and expediency of replacing the PI controller with a fuzzy controller.

**Key words:** synchronous motor with permanent magnets, sensorless control, fuzzy controller.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 43-47*

**Стартер-генератор на основе синхронной машины с постоянными магнитами**

ГОНЧАРОВСКИЙ О.В., ЮЖАКОВ А.А., СТОРОЖЕВ С.А., НИКУЛИН В.С.

Рассмотрен подход к созданию стартер-генератора с использованием синхронной машины с постоянными магнитами без датчика положения ротора. Синхронная машина с постоянными магнитами может работать в режиме стартера и генератора. В режиме стартера осуществляется полеориентированное управление для преобразования электрической энергии от аккумулятора в механическую энергию машины; в режиме генератора аккумулятор отключается, работает генератор. Стабилизатор обеспечивает выходное напряжение 24 В при входном напряжении от 24 до 150 В. Переключение из режима потребления в режим генерации осуществляется без отключения питания, что является особенностью предлагаемой системы управления стартер-генератором.

Предлагаемый стабилизатор способен поддерживать стабильный выходной ток до 40 А. Приведены подробное описание и принцип работы стабилизатора. Разработана система управления синхронной машиной с постоянными магнитами, учитывающая оба режима работы.

**Ключевые слова:** стартер-генератор, синхронный двигатель с постоянными магнитами, бездатчиковое управление, стабилизатор.

An approach to the creation of a starter generator using a synchronous machine with permanent magnets without a rotor position sensor is considered. A synchronous machine with permanent magnets can operate in starter and generator mode. In the starter mode, field-oriented control is carried out to convert electrical energy from the battery into mechanical energy of the machine; in the generator mode, the battery is turned off, the generator is running. The stabilizer provides an output voltage of 24 V with an input voltage from 24 to 150 V. Switching from consumption mode to generation mode is carried out without power off, which is a feature of the proposed starter-generator control system. The proposed stabilizer is capable of maintaining a stable output current of up to 40 A. A detailed description and principle of operation of the stabilizer are given. A control system for a synchronous machine with permanent magnets has been developed, taking into account both operating modes.

**Key words:** starter-generator, synchronous motor with permanent magnets, sensorless control, stabilizer.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 48-55*

**Линейный двигатель с коротким ходом штока для мембранного насоса**



ОПАРИН Д.А., КУЖЛЕВ М.П.

Рассмотрена методика разработки линейного двигателя с коротким ходом штока для промышленного применения в качестве приводного механизма мембранного насоса. Особенности предлагаемой конструкции двигателя связаны со специфическими условиями работы при возвратно-поступательном движении с малой длиной рабочего хода. Представлен расчет двигателя, показаны результаты моделирования, сопровождавшие процесс его разработки, который был доведен до изготовления опытного образца.

**Ключевые слова:** цилиндрический линейный вентильный двигатель, короткоходовой линейный двигатель, проектирование, мембранный насос.

The method of developing a linear motor with a short stroke of the rod for industrial use as a drive mechanism of a diaphragm pump is considered. The features of the proposed engine design are associated with specific operating conditions in reciprocating motion with a short stroke length. The calculation of the engine is presented, the simulation results accompanying the process of its development, which was brought to the production of a prototype, are shown.

**Key words:** cylindrical linear valve motor, short-stroke linear motor, design, diaphragm pump.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 56-60*

### **Переходные процессы в коллекторной цепи открытого биполярного транзистора при индуктивной нагрузке**

ЛЯКИШЕВ А.В., СОЛОДКИЙ Е.М., ЮДИН Р.Ю., ПЕТРОЧЕНКОВ А.Б.

В рамках подготовки учебного пособия, посвященного переходным процессам в коллекторной цепи биполярного транзистора обратной проводимости, включенного по схеме с общим эмиттером при индуктивно-активном характере нагрузки, проведены исследования на экспериментальном стенде. На основе опытных данных рассмотрены процессы, происходящие в исследуемой цепи. Дано наглядное описание всех этапов переходных процессов в коллекторной цепи транзистора при действии положительного импульса на входе ключевого транзисторного каскада. Получено апробированное описание работы исследуемой схемы, позволяющее обучающимся детально понять работу биполярного транзисторного неидеального ключа при индуктивной нагрузке.

**Ключевые слова:** биполярный транзистор, переходный процесс, индуктивная нагрузка, учебное пособие.

As part of the preparation of a textbook on transients in the collector circuit of a bipolar reverse conduction transistor switched on according to a scheme with a common emitter with an

inductively active nature of the load, studies were conducted on an experimental stand. Based on experimental data, the processes occurring in the studied chain are described. A visual description of all stages of transients in the collector circuit of a transistor under the action of a positive pulse at the input of a key transistor cascade is given. An approved description of the operation of the studied circuit is obtained, allowing students to understand in detail the operation of a bipolar transistor non-ideal key under inductive load.

**Key words:** bipolar transistor, transient, inductive load, textbook.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 61-68*

### **Имитационные модели трансформаторов для применения в составе САПР**

ТИХОНОВ А.И., КРАСОВСКИЙ А.Б., СТУЛОВ А.В., СНИТЬКО И.С., КАРЖЕВИН А.А.

Предложена методика построения имитационных моделей трансформаторов, позволяющая учитывать особенности их конструкции. Разработано несколько вариантов имитационных моделей трансформаторов в среде MATLAB – Simulink - SimPowerSystems, которые приняты за базовые их варианты – функционально законченные модели, отражающие наиболее существенные свойства характерных типов трансформаторов и обладающие разной степенью универсальности. Показано, что модификация предложенных моделей позволяет создавать широкий спектр имитационных моделей, отражающих специфические особенности конкретного варианта проектируемого трансформатора для использования в качестве основы для цифровых двойников трансформаторов в составе системы автоматизированного проектирования на этапе расширенного поверочного расчета. Приведены и проанализированы результаты моделирования.

**Ключевые слова:** трансформаторы, система автоматизированного проектирования, цифровой двойник, имитационное моделирование, базовые имитационные модели.

A method for constructing simulation models of transformers is proposed, which allows taking into account the features of their design. Several variants of transformer simulation models have been developed in the MATLAB – Simulink - SimPowerSystems environment, which are taken as their basic variants – functionally complete models reflecting the most essential properties of characteristic types of transformers and having varying degrees of versatility. It is shown that the modification of the proposed models makes it possible to create a wide range of simulation models reflecting the specific features of a specific variant of the designed transformer for use as

a basis for digital transformer twins as part of a computer-aided design system at the stage of advanced calibration calculation. Simulation results are presented and analyzed.

**Key words:** transformers, computer-aided design system, digital twin, simulation modeling, basic simulation models.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 69-76*

### **Исследование режима автоколебаний короткозамкнутой длинной линии**

МЕНАКЕР К.В., КУЦЕНКО С.М., ВОСТРИКОВ М.В., САВЧЕНКО П.В.

Аналитическим и экспериментальным путем подтвержден механизм возникновения автоколебаний в короткозамкнутом отрезке длинной линии в режиме неискажающей передачи колебаний, исключения активных потерь и одновременного действия электрического и волнового резонансов. Такой режим достигнут за счет определенного соотношения удельных параметров симметричного кабеля. Исключение активных потерь стало возможным при равенстве входного сопротивления короткозамкнутого отрезка длинной линии волновому сопротивлению при длине линии, равной одной восьмой длине волны и действию свободных колебаний на частоте, найденной для четвертьволновой линии за счет подключения емкостного элемента параллельно входным концам линии. Электрический резонанс достигнут в колебательном контуре, образованном эквивалентной индуктивностью короткозамкнутого отрезка длинной линии и емкостью, подключенной к входным концам линии; волновой резонанс при отсутствии активных потерь сопровождается кратным увеличением тока на конце линии при каждом проходе волны вдоль линии, при этом напряжение на входе линии при каждом проходе волны меняет свой знак. За счет наличия емкостного элемента напряжение на входе линии, так же как и ток на конце линии, кратно растет, что приводит к еще большему увеличению тока; этот процесс носит лавинообразный характер. Область практического применения найденного режима автоколебаний весьма обширна.

**Ключевые слова:** короткозамкнутая длинная линия, режим автоколебаний, электрический резонанс, волновой резонанс, частота свободных колебаний.

The mechanism of the occurrence of self-oscillations in a short-circuited segment of a long line in the mode of undistorted transmission of vibrations, exclusion of active losses and simultaneous action of electric and wave resonances has been confirmed analytically and experimentally. This mode is achieved due to a certain ratio of the specific parameters of the

symmetrical cable. The exclusion of active losses became possible when the input resistance of a short-circuited segment of a long line is equal to the wave resistance with a line length equal to one eighth of the wavelength and the effect of free oscillations at the frequency found for a quarter-wave line by connecting a capacitive element parallel to the input ends of the line. Electrical resonance is achieved in an oscillatory circuit formed by the equivalent inductance of a short-circuited segment of a long line and a capacitance connected to the input ends of the line; wave resonance in the absence of active losses is accompanied by a multiple increase in the current at the end of the line with each passage of the wave along the line, while the voltage at the input of the line changes its sign with each passage of the wave. Due to the presence of a capacitive element, the voltage at the input of the line, as well as the current at the end of the line, increases many times, which leads to an even greater increase in current; this process is avalanche-like. The field of practical application of the found self-oscillation mode is very extensive.

**Keywords:** short-circuited long line, self-oscillation mode, electric resonance, wave resonance, frequency of free oscillations.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 77-82*

### **Влияние трансформатора с обмотками «двойной зигзаг с нулевым выводом» на уровень несимметрии и несинусоидальности токов в сети 0,38 кВ**

ЮНДИН М.А., ЮНДИН К.М., ИСУПОВА А.М.

Приведены результаты лабораторных исследований поперечного включения трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» к модели сети напряжением 0,38 кВ с целью повышения пропускной способности электрической сети за счет снижения действующего тока в нулевом рабочем проводнике трехфазной четырехпроводной электрической сети. Выполнен анализ токов, создающих нагрузку нулевого рабочего провода сети напряжением 0,38 кВ. Для нагрузочной стороны силового трансформатора представлены уравнения мгновенных значений наиболее значимых гармонических составляющих токов, полученные по результатам экспериментальных исследований при различных коэффициентах загрузки силового трансформатора. Оценено шунтирующее влияние трансформатора со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом» на коэффициенты несимметрии токов и напряжений обратной и нулевой последовательности, а также на коэффициенты искажения синусоидальности кривых токов и напряжений и коэффициенты третьей гармонической составляющей тока и напряжения. Выявленные закономерности

изменения токовой нагрузки нулевого рабочего провода позволяют улучшить эффективность передачи электроэнергии в электрической сети, продлить срок службы кабельных линий, уменьшить пожарную опасность электроустановок.

**Ключевые слова:** трансформатор со схемой соединения обмоток «двойной зигзаг с нулевым выводом», нулевой провод сети, ток нулевой последовательности основной частоты, ток третьей гармоники.

The results of laboratory studies of the transverse inclusion of a transformer with a circuit for connecting the windings «double zigzag with zero output» to a 0.38 kV network model in order to increase the capacity of the electrical network by reducing the operating current in the zero working conductor of a three-phase four-wire electrical network are presented. The analysis of currents creating a load of the zero working wire of the network with a voltage of 0.38 kV is performed. For the load side of the power transformer, the equations of the instantaneous values of the most significant harmonic components of the currents are presented, obtained from experimental studies with different load coefficients of the power transformer. The shunting effect of a transformer with a «double zigzag with zero terminal» winding connection scheme on the asymmetry coefficients of currents and voltages of the reverse and zero sequence, as well as on the distortion coefficients of the sinusoidal curves of currents and voltages and the coefficients of the third harmonic component of current and voltage is estimated. The revealed patterns of changes in the current load of the zero working wire make it possible to improve the efficiency of electricity transmission in the electrical network, extend the service life of cable lines, and reduce the fire hazard of electrical installations.

**Keywords:** transformer with a circuit for connecting windings «double zigzag with zero output», zero wire of the network, zero sequence current of the fundamental frequency, third harmonic current.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 83-89*

### **Электродвигатель с высокой удельной мощностью для малого летательного аппарата**

ШИРОКОВ А.А., ЗДОРОВА М.В., ЖУРАВЛЕВ С.В., СУХАНОВ А.Б., ИВАНОВ Н.С.,  
ХАРЬКИНА О.А., МОСКАЛЕНКО А.В.

Статья посвящена разработке электродвигателя мощностью 150 кВт с удельной мощностью свыше 4 кВт/кг для системы электродвижения малого летательного аппарата.

Проведен анализ существующих электродвигателей в области электродвижения и определена потребная мощность электродвигателя. Выполнены расчеты по исходным данным и рассмотрены возможные конструктивные и технологические решения, которые могут позволить обеспечить высокие удельные показатели. Для подтверждения и уточнения результатов аналитического расчета выполнен конечно-элементный анализ магнитных полей выбранных схем электродвигателей. По результатам аналитического и численного расчетов определен оптимальный вариант электродвигателя, для которого построены зависимости основных параметров от механической мощности и разработана конструкция с учетом экстремума удельных показателей. По разработанной 3D-модели проведен расчет полной массы электродвигателя и проведено сравнение основных параметров электродвигателя с зарубежными аналогами.

**Ключевые слова:** малый летательный аппарат, синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов, удельные показатели, конечно-элементный анализ магнитных полей, магнитная система Хальбаха.

The article is devoted to the development of a 150 kW electric motor with a specific power of over 4 kW/kg for the electric propulsion system of a small aircraft. The analysis of existing electric motors in the field of electric propulsion is carried out and the required power of the electric motor is determined. Calculations are performed based on the initial data and possible design and technological solutions that can allow for high specific indicators are considered. To confirm and refine the results of the analytical calculation, a finite element analysis of the magnetic fields of the selected electric motor circuits was performed. Based on the results of analytical and numerical calculations, the optimal variant of the electric motor was determined, for which the dependences of the main parameters on mechanical power were constructed and the design was developed taking into account the extremum of specific indicators. According to the developed 3D model, the total mass of the electric motor was calculated and the main parameters of the electric motor were compared with foreign analogues.

**Key words:** small aircraft, synchronous electric motor with excitation from permanent magnets, specific indicators, finite element analysis of magnetic fields, Halbach magnetic system.

*Электротехника, 2023, №11, стр. 93-93*

**Аркадий Иванович ПОДАРУЕВ**

**(Некролог)**

*Электротехника, 2023, №11, стр. 94-95*

**Павел Александрович КУРБАТОВ**

**(Некролог)**