

К расчёту магнитного редуктора методом разделения переменных Фурье

АФАНАСЬЕВ А.А.

Магнитные редукторы можно подразделить на две группы: неуправляемые, выполненные на постоянных магнитах, и управляемые, содержащие, кроме магнитов, обмотку статора с преобразователем частоты. Первые имеют фиксированный коэффициент магнитной редукции, у вторых он может изменяться благодаря преобразователю частоты. Рассмотрен полевой аналитический метод расчета, который может использоваться для оценки функциональных свойств обоих типов этих устройств, оперируя двумя декартовыми координатами x, y . В каждой из активных областей магнитного редуктора (воздушных зазорах, магнитах, ярмах статора и ротора, роторе со сквозными зубцами и пазами – модуляторе) искомые переменные (магнитные потенциалы и магнитные индукции) представляются в виде произведения двух функций, первая из которых зависит от координаты x , вторая – от координаты y . Эти функции умножаются на некоторые неизвестные постоянные, значения которых находятся из граничных условий магнитного поля на линиях сопряжения активных областей. Магнитные проницаемости ферромагнитных областей предполагаются фиксированными, их значения корректируются по данным расчёта магнитной цепи редуктора. Такой подход дает возможность реализовать принцип суперпозиции магнитных полей, созданных источниками ротора и статора. При этом расчёт неизвестных постоянных выполняется дважды – применительно к каждому источнику, так как последние имеют принципиально разные числа полюсов и, следовательно, имеют разный спектр гармонических составляющих магнитодвижущих сил. Предложенный метод позволяет определять магнитные индукции в рабочих воздушных зазорах редуктора и электромагнитные моменты, воздействующие на роторы и статор. Полученные результаты подтверждены опытными данными. Для реализации метода достаточно набора функций, имеющихся в программе Mathcad.

Ключевые слова: магнитный редуктор, постоянные магниты, скалярные магнитные потенциалы, магнитные индукции, электромагнитные моменты.

Magnetic reducers can be divided into two groups: unmanageable, made on permanent magnets, and controlled, containing, in addition to magnets, the stator winding with a frequency Converter. The first have a fixed coefficient of magnetic reduction, the second it can be changed thanks to the frequency Converter. The proposed field analytical calculation method can be used

to evaluate the functional properties of both types of these devices using two Cartesian coordinates. In each of the active regions of the magnetic reducer (air gaps, magnets, yoke of the stator and rotor, rotor with through teeth and grooves (modulator), the required variables – magnetic potentials and magnetic induction – are represented as a product of two functions, the first of which depends on the coordinate x , the other – on the coordinate y . These functions are also multiplied by some unknown constants whose values are from the boundary conditions of the magnetic field on the interface lines of the active regions. Magnetic permeability of ferromagnetic regions (yoke, modulator rods) are assumed to be fixed, the values of which are adjusted according to the calculation of the magnetic circuit of the reducer. This approach makes it possible to implement the principle of superposition of magnetic fields created by the rotor and stator sources, respectively. In this case, the calculation of the unknown constants is made twice for each source, since the latter have fundamentally different numbers of poles and, consequently, have a different spectrum of harmonic components of the magnetomotive forces. The considered method makes it possible to solve such applied problems as finding magnetic inductions in the working air gaps of the reducer, determining the electromagnetic moments acting on the rotors and the stator. The results were confirmed by experimental data. To implement the method, a set of functions available in the Mathcad mathematical program is sufficient.

Key words: magnetic gear, permanent magnets, scalar magnetic potentials, magnetic induction, electromagnetic moments.

Электротехника, 2021, №1, стр. 8-19

Математическая модель асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором КОРШУНОВ А.И.

При обычных допущениях построена математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором (АД), не использующая предположение о круговом вращающемся поле в его воздушном зазоре и различные преобразования координат. Модель справедлива как в переходных, так и в установившихся режимах и при различных способах управления путем изменения параметров трехфазной системы напряжений питания обмотки статора АД. Показано существование в построенной нелинейной модели АД при постоянных параметрах напряжения питания статора и моменте нагрузки желательного стационарного режима работы, соответствующего постоянным электромагнитному моменту и частоте вращения ротора при синусоидальных токах ротора и статора. В системе Matlab Simulink

построена цифровая модель АД. Получено аналитическое решение системы линейных дифференциальных уравнений, описывающей АД при заторможенном роторе и позволяющей оценить корректность нелинейной цифровой модели. Приведены примеры применения модели АД к анализу переходных и установившихся режимов его работы.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазный ротор, математическая модель.

At usual assumptions the mathematical model of the asynchronous engine with a phase rotor (AE) which is not using the assumption of the circular rotating field in its air gap and various transformations of coordinates is constructed. The model is fair both in transitional, and in the set modes and at various ways of management by change of parameters of a three-phase system of supply voltages of a winding of the AE stator. Existence in the constructed nonlinear AE model at constant parameters of supply voltages of the stator and the moment of loading, the desirable stationary operating mode corresponding to constants to the electromagnetic moment and frequency of rotation of a rotor at sinusoidal currents of a rotor and the stator is shown. In the Mathlab Simulink AE digital model is constructed. The analytical solution of a system of the linear differential equations describing AE at an fixed rotor, the correctness of nonlinear digital model allowing to estimate is received. Examples of application of the AT model to the analysis of the transitional and set modes of its work are given.

Key words: asynchronous engine, phase rotor, mathematical model.

Электротехника, 2021, №1, стр. 20-25

Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях

ВОРОНЦОВ А.Г., ПРОНИН М.В.

Для сокращения затрат машинного времени на расчеты систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями предложено использовать описание процессов по «гладким» составляющим токов и напряжений. Предложено также использовать сдвоенные модели систем, в которых сочетаются метод моделирования по «гладким» составляющим кривых и метод моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, что позволяет согласовать требования по скорости и точности расчетов длительных процессов. Приведен пример создания сдвоенной модели транзисторного

привода с двигателем на постоянных магнитах.

Ключевые слова: электрическая машина, полупроводниковый преобразователь, моделирование, расчет, затраты машинного времени.

To reduce the cost of computer time for calculating systems with electric machines and semiconductor converters, it is proposed to use a description of the processes according to the «smooth» components of currents and voltages. It is also proposed to use dual models of systems, which combine the modeling method using «smooth» components and the method of modeling systems using the interconnected subsystems which allows matching requirements for the speed and accuracy of calculation of long-term processes. An example of creating a dual model of a transistor electric drive with the permanent magnet synchronous motor is given.

Key words: electric machine, semiconductor converter, simulation, calculation, simulation costs.

Электротехника, 2021, №1, стр. 26-33

Электромагнитный момент и его пульсации в униполярном бесконтактном моментном электродвигателе с постоянными магнитами

ЕПИФАНОВ О.К., ГРЕЧУШКИН Ю.В., САЛОВА И.А.

Рассмотрены процессы образования электромагнитного момента и его пульсаций в униполярном индукторном моментном электродвигателе с электромагнитной редукцией и возбуждением от постоянных магнитов. Приведены физико-математическая модель и расчетно-аналитическое описание физических процессов и взаимосвязей электродвигателя исследуемого типа с построением схем замещения его электромагнитной цепи, определены источники и исследованы взаимосвязи при возникновении пульсаций электромагнитного момента, получены их аналитические зависимости с учетом характера магнитной проводимости его воздушного зазора и протекающих токов в его сосредоточенных фазных обмотках. Показано, что источниками указанных пульсаций являются высшие гармоники магнитной проводимости воздушного зазора, при этом пульсации содержат три составляющие: пульсации основного, добавочного и остаточного моментов. Определено, что амплитуды и фазы составляющих пульсаций основного и добавочного электромагнитных моментов связаны с углом опережения вектора тока в обмотках относительно вектора магнитного потока,

проходящего через полюса статора электродвигателя. Полученные результаты подтверждены численным моделированием электромагнитной системы электродвигателя методом конечных элементов в ANSYS Maxwell. Эти результаты могут быть использованы для совершенствования конструкций электродвигателей рассмотренного типа, а также при разработке схемотехнических решений и алгоритмов управления прецизионными безредукторными электроприводами автоматических систем управления.

Ключевые слова: униполярный индукторный бесконтактный моментный электродвигатель, постоянные магниты, пульсации электромагнитного момента, управление, безредукторный электропривод.

A physical and mathematical model and a computational and analytical description of physical processes and the relationship of the electric motor with the construction of equivalent circuits of its electromagnetic circuit are given. The sources are determined and the relationships are investigated when the electromagnetic moment ripples occur. The analytical dependences of the ripples are obtained taking into account the nature of the air gap magnetic conductivity and the currents in the phase windings. It has been shown, that the sources of these ripples are the higher harmonics of the air gap magnetic conduction function. The ripples contain three components: ripples of the main, additional and residual moments. It was determined that the amplitudes and phases of the ripple components of the main and additional electromagnetic moments are related to the lead angle of the windings current vector relative to the magnetic flux vector passing through the stator poles of the electric motor. The results were confirmed by numerical simulation of the electric motor electromagnetic system by the finite element method in ANSYS Maxwell. These results can be used to improve the designs of this type of electric motors, as well as in the development of circuit solutions and control algorithms for precision gearless electric drives of automatic control systems.

Key words: inductor unipolar brushless torque motor, permanent magnets, electromagnetic torque ripples, control, gearless electric drive.

Электротехника, 2021, №1, стр. 34-39

Применение спектрального анализа токов ротора для оценки эффективности работы систем управления асинхронных электроприводов

КОДКИН В.Л., АНИКИН А.С., БАЛДЕНКОВ А.А.

В статье обосновывается эффективность анализа роторных токов асинхронных электроприводов с частотным управлением. Предлагается использовать спектральный анализ этих токов и основную гармонику, как наиболее точное «отображение» скольжения в асинхронном двигателе – как метод оценки качества формирования момента в двигателе. Моделирование и эксперименты подтверждают предлагаемые теоретические положения. Эксперименты, отражающие работу электропривода при малых нагрузках, соответствующих скольжению 3% и при нагрузке, близкой к номинальной, соответствующей скольжению 8–10%, показали, что реализованный в стандартных преобразователях частоты алгоритм формирования вращающего момента не является наилучшим. Предложено структурное решение, улучшающее динамику привода почти в два раза и делающее ее соизмеримой с динамикой двигателей с постоянными магнитами. Это решение позволит применять асинхронные электроприводы в точных технологиях.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, частотное управление, роторные токи, спектральный анализ, вращающий момент.

The article substantiates the effectiveness of the analysis of the rotor currents of asynchronous electric drives with frequency control. It is proposed to use the spectral analysis of these currents and the main harmonic, as the most accurate "display" of slip in an asynchronous motor – as a method for assessing the quality of torque formation in a motor. Modeling and experiments confirm the proposed theoretical position. These experiments reflecting the operation of the electric drive with low loads corresponding to a slip of 3% and at a load close to the nominal, corresponding to a slip of 8–10%, convincingly showed that the algorithm for generating torque implemented in standard frequency converters is not the best, however, proposed a structural solution that improves the dynamics of the drive almost twice, making it comparable with the dynamics of permanent-magnet engines. This solution will allow the use of asynchronous electric drives in precise technologies.

Key words: asynchronous electric drive, frequency control, rotor currents, spectral analysis, torque.

Электротехника, 2021, №1, стр. 40-45

Сравнительная оценка энергопотребления асинхронного и синхронного реактивного приводов в насосном приложении с учетом потерь в преобразователе частоты

КАЗАКБАЕВ В.М., ПРАХТ В.А., ДМИТРИЕВСКИЙ В.А., ОШУРБЕКОВ С.Х., Н.
ИБРАГИМ МОХАМЕД

Выполнен сравнительный анализ энергетических характеристик асинхронного и синхронного реактивного электроприводов малой мощности. Рассматриваются асинхронный (АД) и синхронный реактивный двигатели (СРД), выполненные в одинаковом корпусе. Приведены результаты испытаний регулируемого электропривода с АД и СРД в широком диапазоне режимов работы. Расчет КПД двигателя в точках, для которых непосредственно не имеется опытных данных, выполнен с помощью полиномиальной интерполяции. Рассмотрено влияние типа двигателя на потери в двухзвенном преобразователе частоты с использованием аналитического и численного методов. Показано, что, несмотря на ряд допущений, аналитический метод обладает сравнительно небольшой погрешностью. Также предложен альтернативный подход для определения значения тока и коэффициента мощности двигателя, необходимых для расчета потерь в преобразователе частоты. На примере привода мощностью 1,1 кВт показано, что применение СРД по сравнению с АД позволяет значительно снизить энергопотребление насосного агрегата.

Ключевые слова: регулируемый привод, асинхронный двигатель, синхронный реактивный двигатель, потери в преобразователе частоты, энергоэффективность.

This paper presents a comparative analysis of the energy consumption of induction and synchronous reluctance electric drives of low rated power used in the water supply system of a large building. The induction motor (IM) and synchronous reluctance motor (SynRM) were manufactured using a similar motor housing. Test results of the variable speed drive employing IM and SynRM are presented in a wide range of operating modes. The calculation of motor efficiency in points where there is no experimental data was carried out using polynomial interpolation. The influence of the motor type on the losses in a two-stage frequency converter is investigated using analytical and numerical methods. It is shown that despite a number of theoretical assumptions the analytical method used has a relatively small error. In addition, an alternative approach is proposed for determining values of the current and the power factor of the motor that is needed for calculating the losses in the frequency converter. Considering an example of a 1.1 kW drive, it is shown that using SynRM, as compared to IM, can significantly reduce energy consumption of the pump unit.

Key words: adjustable drive, asynchronous motor, synchronous jet engine, frequency converter losses, energy efficiency.

Методы определения реактивного сопротивления рассеяния обмоток трансформатора

ПОПОВ И.П.

Существующие методы не позволяют измерять реактивные сопротивления рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности, поэтому часто для простоты полагают их равными друг другу. В действительности, применительно к рассматриваемому случаю, они существенно не равны. Расчет потокосцепления внешней обмотки показывает, что ее реактивное сопротивление рассеяния больше суммарного сопротивления рассеяния обеих обмоток, откуда следует, что реактивное сопротивление рассеяния внутренней обмотки имеет емкостный характер. Цель статьи – обоснование возможности экспериментального определения реактивных сопротивлений рассеяния для каждой обмотки трансформатора в отдельности. Реактивное сопротивление рассеяния каждой обмотки трансформатора в отдельности может быть определено, по крайней мере, тремя экспериментальными методами, дающими удовлетворительное совпадение результатов. Представленные экспериментальные методы не привязаны к характеру реактивности сопротивлений рассеяния. Они являются универсальными – их можно использовать при любых типах обмоток. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании и исследовании трансформаторов.

Ключевые слова: трансформатор, обмотка, рассеяние, индуктивный, емкостной, потокосцепление, магнитный поток.

The existing methods do not allow measuring the scattering reactances for each winding of the transformer separately, therefore, for simplicity, they are often considered to be equal to each other. In fact, as applied to the case under consideration, they are not substantially equal. In fact, the calculation of the flux linkage of the external winding shows that its dissipation reactance is greater than the total resistance to scattering of both windings. Two circumstances follow from this. The first is that the internal winding of the transformer absorbs the magnetic flux to a greater extent than it dissipates (dissipates its magnetic flux, absorbs from the external winding). The second is that its (equivalent) reactive dissipation resistance is capacitive. The purpose of the study is to substantiate the possibility of experimentally determining the scattering reactances for

each winding of the transformer separately. The scattering reactance of each winding of the transformer separately can be determined by at least three experimental methods that give satisfactory agreement of the results. The presented experimental methods are not tied to the nature of the reactivity of scattering resistances. They are universal – they can be used in all types of windings. The obtained results are recommended to use when designing and researching transformers.

Key words: transformer, winding, scattering, inductive, capacitive, flux linkage, magnetic flux.

Электротехника, 2021, №1, стр. 50-54

Кольцевой ленточный магнитопровод с эллипсообразным поперечным сечением ОШЕВ Ю.А.

Представлен новый класс магнитопроводов – кольцевой ленточный магнитопровод с эллипсообразным поперечным сечением, содержащим прямоугольную часть и две противоположные полукруговые части. Выведена параметрическая формула фасонной резки исходной постоянной ширины ленты для получения развертки, навивка которой на оправке обеспечивает получение кольцевого ленточного магнитопровода с эллипсообразным поперечным сечением заданных размеров. Фасонная резка ленты и навивка магнитопровода осуществляются одновременно, в одном устройстве.

Рассмотрена составная конструкция магнитопровода, позволяющая собирать различные по размерам магнитопроводы из типовых готовых элементов. Предлагаемый класс магнитопроводов обладает предельным, равным единице, коэффициентом заполнения окна обмоток.

Ключевые слова: кольцевой ленточный магнитопровод, эллипсообразное поперечное сечение, фасонная резка ленты, навивка на оправке, коэффициент заполнения окна обмоток.

A new class of magnetic cores is presented – an annular tape magnetic core with an elliptical cross-section containing a rectangular part and two opposite semicircular parts. The parametric formula of shaped cutting of the initial constant width of the tape is derived to obtain a sweep, the winding of which on the mandrel provides an annular tape magnetic core with an elliptical cross-section of the specified dimensions. Shaped cutting of the tape and winding of the magnetic circuit are carried out simultaneously, in one device. A composite design of a magnetic circuit is considered, which allows assembling various sizes of magnetic circuits from

standard ready-made elements. The proposed class of magnetic cores has a limit, equal to one, the filling coefficient of the windings window.

Key words: annular magnetic tape, elliptical cross-section, shaped cutting of the tape, winding on the mandrel, filling factor of the windings window.

Электротехника, 2021, №1, стр. 55-59

Влияние термомагнитной обработки сердечников из аморфных магнитных материалов на метрологические характеристики электромагнитных трансформаторов тока

МИРОНЮК Н.Е., САМАТОВ М.В.

Рассматривается метод термомагнитной обработки сердечников из аморфного магнитного материала в поперечном постоянном магнитном поле, предназначенный для улучшения метрологических характеристик трансформаторов тока. Эффективность метода связана с существенным увеличением магнитной проницаемости сердечников трансформаторов тока. Использование метода термомагнитной обработки позволяет повысить класс их точности.

Ключевые слова: электромагнитные трансформаторы тока, аморфные магнитные материалы, метрологические характеристики, магнитные характеристики, термомагнитная обработка.

The method thermomagnetic processings of cores from an amorphous magnetic material in a cross-section constant magnetic field is considered. Thermomagnetic processing is applied for improvement of metrological characteristics of transformers of a current. Efficiency of a method is connected to essential increase in magnetic permeability of cores of transformers of a current. Use of a method thermomagnetic processings allows to raise(increase) a class of accuracy of transformers of a current.

Key words: electromagnetic current transformers, amorphous magnetic materials, metrological characteristics, magnetic characteristics, thermomagnetic processing.

Электротехника, 2021, №1, стр.60-63

Влияние карбонитрации на магнитные свойства электротехнической стали

ИСАКОВ Д.В., КОРОТКОВ В.А.

Исследовано влияние карбонитрации на магнитные свойства, твердость и износостойкость нелегированной электротехнической стали марки 10895. Установлено, что карбонитрация увеличила твердость поверхности от HV140 до 580. Это не столь существенно, как при нанесении боридов и никельборидов (HV2015) но все же весьма значительно (в 4,1 раза), при этом износостойкость при трении о диск «Ферадо» увеличивается на 90%. Благодаря улучшению магнитных свойств стали крутящий момент магнитной муфты MWU увеличился на 40%.

Ключевые слова: электротехническая сталь, карбонитрация, магнитная проницаемость, износостойкость.

The influence of carbonitration on the magnetic properties, hardness and wear resistance of unalloyed electrical steel grade 10895 was investigated. It was found that carbonitration increased the surface hardness from HV=140 to 580. This is not so important as when applying the borides and nickelborides (HV=2015) but still very significantly (4.1 fold) that produced an increase in the wear resistance at 90% of the friction of the drive letter «Ferodo». Due to the improvement of the magnetic properties of steel, the torque of the magnetic coupling MWU increased by 40%.

Key words: electrical steel, carbonitration, magnetic permeability, wear resistance.

Электротехника, 2021, №1, стр. 64-65

Авторы номера

Электротехника, 2021, №1, стр. 66-67

Рудольф Теодорович Шрейнер (некролог)