

Способ стабилизации работы синхронных машин с использованием виртуального датчика нагрузки

КРЮКОВ О.В., ГУЛЯЕВ И.В., ТЕПЛУХОВ Д.Ю.

Рассмотрены пути повышения устойчивости синхронных машин большой мощности при стабилизации угла нагрузки в структуре системы автоматического регулирования возбуждения. Получена математическая модель электрической машины в разомкнутых и замкнутых системах автоматического регулирования, выполнены исследования электромагнитных процессов и анализ существующих и предлагаемых систем оптимального управления. Разработан бесконтактный датчик угла нагрузки синхронного двигателя, базирующийся на измерении доступных параметров синхронной машины и позволяющий вычислять угол нагрузки в статических и динамических режимах работы синхронного генератора, и совместимый с новой системой регулирования. Предложены системы регулирования возбуждения синхронной машиной с датчиком измерения угла нагрузки, обеспечивающие более высокие показатели в динамических режимах и более быстродействующую защиту от выпадения из синхронизма, а также позволяющие стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности и напряжение на статоре синхронной машины.

Ключевые слова: синхронная машина, система возбуждения, угол нагрузки, система автоматического регулирования, устойчивость.

In the article analyzed the methods of increasing the stability of high-power synchronous machines in the stabilization of the load angle in the structure of the automatic excitation control system are considered. Received a mathematical model of an electric machine in open and closed automatic control systems is obtained, results of studies of electromagnetic processes and analysis of existing and proposed optimal control systems. Developed contactless sensor torque angle of the synchronous motor, based on measuring the available parameters of a synchronous machine, allowing to calculate the torque angle in static and dynamic modes of operation of synchronous generator and compatible with the new control system. The presented system of regulation of excitation of synchronous machine with a with measurement sensor the torque angle of the load, providing higher performance in dynamic modes as well as allowing to stabilize the reactive power, power coefficient and voltage on the stator of a synchronous machine.

Key words: synchronous machine, excitation system, torque angle, automatic control system, stability.

Электротехника, 2019, №7, стр. 8-13

Энергоэффективное управление асинхронным двигателем: методы повышения его динамики

ПОПОВ А.А., ПОПОВА В.А., ГУЛЯЕВ И.В., BRIZ DEL BLANCO F.

Для повышения эффективности системы электропривода в условиях низких скоростей в системе векторного управления асинхронным двигателем используется стратегия управления, оптимизированная по минимуму токов статора (МТРА – maximum torque per ampere). МТРА – это метод управления возбуждением двигателя, который серьезно снижает динамику крутящего момента из-за влияния постоянной времени ротора.

Традиционно для такой стратегии управления рассматриваются установившиеся режимы двигателя, но не рассматриваются переходные режимы. Приведено сравнение стратегии управления МТРА асинхронного двигателя с применением регулятора потока ротора и без него. Предложены новые подходы к повышению динамики управления МТРА, описаны переходные режимы и приведено их сравнение.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, моделирование, динамика электропривода, полеориентированное управление.

To improve the efficiency of the electric drive system under low speed conditions, the vector control system of an asynchronous motor uses a control strategy optimized for maximum torque per ampere (МТРА). The МТРА is a kind of variable excitation control strategy essentially that seriously reduces torque dynamics due to the influence of the rotor time constant. Traditionally, steady state engine conditions are considered for МТРА, but transients are not considered. This article compares the control strategy of an МТРА induction motor with and without the use of a rotor flow controller. New approaches to improving the dynamics of МТРА control are proposed, transients are described and compared.

Key words: induction motor, simulation, electric drive dynamics, field-oriented control.

Электротехника, 2019, №7, стр. 13-18

Имитационное моделирование асинхронного электропривода, управляемого матричным преобразователем частоты

БАЙКОВ Д.В., ГУЛЯЕВ И.В., ИНШАКОВ А.П., ТЕПЛУХОВ Д.Ю.

Рассмотрены характеристики, конструкция и принципы пространственно-векторного управления асинхронным электроприводом на базе матричного преобразователя частоты.

Выполнено исследование выходного напряжения и тока системы «матричный преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» при единичном коэффициенте мощности. Применение такой системы в приводах переменного тока позволяет обеспечить высокую энергетическую эффективность и двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и нагрузкой без дополнительного преобразования энергии.

Ключевые слова: электропривод, асинхронный двигатель, матричный преобразователь частоты, пространственно-векторная модуляция.

The article discusses the characteristics, design and principles of space-vector control of an asynchronous electric drive based on a matrix converter. In this paper, a study was made of the output voltage and current of the system «matrix frequency converter - asynchronous motor with a squirrel-cage rotor» with a single power factor. The use of such a system in AC drives allows for high energy efficiency and two-way exchange of energy between the supply network and the load without additional energy conversion.

Key words: electric drive, asynchronous motor, matrix converter, space-vector modulation.

Электротехника, 2019, №7, стр. 19-23

Определение собственных тепловых сопротивлений силовых транзисторов и диодов IGBT модуля на основе его трёхмерной модели

ИЛЬИН М.В., ВИЛКОВ Е.А., ГУЛЯЕВ И.В., BRIZ DEL BLANCO F.

Рассмотрен подход к определению собственных тепловых сопротивлений для формирования тепловой модели силового IGBT модуля на основе метода электротепловой аналогии. В отличие от традиционного предложенный метод учитывает изменение тепловых сопротивлений в зависимости от места расположения силового полупроводникового прибора (СПП) в IGBT модуле. Тепловые параметры для создания модели силового модуля на основе электротепловой аналогии оценивались на трёхмерной модели IGBT модуля в среде ANSYS с использованием метода конечных элементов. Предложенный подход предназначен повысить качество прогнозирования температуры кристаллов силового модуля, в условиях приближенных к эксплуатационным.

Ключевые слова: IGBT-модуль, тепловая модель, электротепловая аналогия, метод конечных элементов, собственное тепловое сопротивление.

The article describes improved approach to define self-thermal impedance for organization

thermal model of power IGBT-module by electrothermal analogy. The new method takes into account the change in thermal resistance of power device, which depends on his location in the IGBT module. Evaluation of thermal parameters for create an electrothermal model was performed on a three-dimensional model of an IGBT module in the ANSYS environment by the finite element method. The proposed approach is intended to improve the quality of prediction of the temperature of the crystals of the power module, in conditions which is close to operational ones.

Key words: IGBT-module, thermal model, electrothermal analogy, finite element method, self-thermal impedances.

Электротехника, 2019, №7, стр. 24-32

Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки

МАКАРИЧЕВ Ю.А., ЗУБКОВ Ю.В., ИВАННИКОВ Ю.Н., И.В. ГУЛЯЕВ И.В.

Рассмотрена возможность применения синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) для электрического пуска газотурбинных двигателей (ГТД) в системах транспорта газа. Анализируются два варианта исполнения стартера: с радиально намагниченными ПМ на поверхности индуктора (SPM) и с V-образными ПМ, расположенными в сердечнике индуктора (IPM). Технические условия предполагают многорежимную эксплуатацию стартера (горячий запуск, холодная прокрутка, промывка газоздушного тракта) в кратковременном и повторно-кратковременном режимах при обеспечении заданных моментных характеристик. У сравниваемых конструкций роторов проанализированы распределение магнитного потока, гармонический состав поля и противоЭДС, значения и пульсации крутящего момента, энергоэффективность и устойчивость ПМ к необратимому размагничиванию. Установлено, что SPM стартер обладает лучшей плотностью крутящего момента и перегрузочной способностью, меньшими пульсациями момента и может быть рекомендован для электрического запуска ГТД, обладающих повышенным моментом инерции. Стартер с IPM ротором предпочтительнее по энергоэффективности и способности к противодействию размагничивающему действию реакции якоря. Технологические трудности, возникающие при производстве роторов с внешними магнитами, затрудняют их использование в двигателях с высокими частотами вращения.

Ключевые слова: электромеханический стартер, газотурбинный двигатель, синхронный двигатель, постоянные магниты.

The article explores the possibility of using synchronous motors with excitation from permanent magnets (PM) for electrical start-up of gas turbine plants (GTP) in gas transportation systems. Two versions of the starter are analyzed: with radially magnetized PM on the inductor surface (SPM) and with V-shaped PM located in the core of the inductor (IPM). Authors are analyzed two versions of the stator design: with radially magnetized (PM) on the inductor surface (SPM) and with V-shaped PM located in the core of the inductor (IPM). Technical requirements supposed multi-mode operation of the starter (hot starting, dry starting, gas-air flushing) in short-time and repeating short-time operating mode with the specified torque characteristics. As a result of comparison designs of rotors starters were analyzed on the distribution of the magnetic flux, the harmonic composition of the field and the back-EMF, the magnitude and ripple of the torque, energy efficiency and the stability of the PM to irreversible demagnetization. As a result of the comparison, it was found that the SPM starter has a better torque density and overload capacity, lower torque pulsations and can be recommended for the electric start of GTM with an increased moment of inertia. A starter with an IPM rotor is preferable in terms of energy-efficiency and the ability to counteract the demagnetizing action of the rotor reaction. Technological difficulties arising in the production of rotors with external magnets complicate use them in motors with high rotational frequencies.

Key words: electromechanical starter, gas turbine plant, synchronous motor, permanent magnets.

Электротехника, 2019, №7, стр. 33-37

Энергоустановки на основе возобновляемых источников и электрохимических устройств хранения и генерации энергии для децентрализованного автономного электроснабжения

ГРИГОРЬЕВ А.С., СКОРЛЫГИН В.В., ГРИГОРЬЕВ С.А., МЕЛЬНИК Д.А., ЛОСЕВ О.Г.

Рассмотрена линейка энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии (солнца и ветра) и электрохимических систем хранения и генерации энергии, обеспечивающих автономное электроснабжение удаленных потребителей мощностью от нескольких сотен ватт до нескольких киловатт. Отличительной особенностью созданного модельного ряда энергоустановок является их северное исполнение, обеспечивающее работу при температурах окружающего воздуха до минус 50°C, сверхвысоком уровне снежного покрова, в условиях полярной ночи, ураганных ветров и прочих суровых факторов, присущих северным территориям России, Норвегии, Финляндии, Дании, Ирландии, США и Канады. Другим важным преимуществом разработанных энергоустановок по сравнению с существующими аналогами является отказ от

использования загрязняющих атмосферу дизель-генераторов в качестве вспомогательных источников энергии и их замена электрохимическими генераторами на основе топливных элементов прямого окисления метанола. Энергоустановки укомплектованы программно-техническими комплексами, позволяющими осуществлять удаленный контроль и управление работой.

Ключевые слова: автономная энергоустановка, возобновляемый источник энергии, электрохимическая система, хранение энергии, децентрализованное энергоснабжение.

The article deals with the model series of stand-alone power plants on the basis of renewables (sun and wind) and the electrochemical energy storage and generation systems providing autonomous power supply of remote customers with electric power from several hundred W up to several kW. Distinctive feature of the developed model range of power plants consists in their Arctic survival design ensuring operation at air temperatures up to minus 50°C, the ultrahigh level of snow cover, in the conditions of the polar night, storm winds and other severe factors inherent in northern territories of Russia, Norway, Finland, Denmark, Ireland, USA and Canada. Other important advantage of the developed power plants in comparison with the existing analogs is the refusal of use of the ecologically destructive diesel generators as auxiliary power sources and their replacement with electrochemical generators on the basis of direct methanol fuel cells. Power plans are equipped with the software and hardware complexes allowing for remote control and management of work.

Key words: stand-alone power plant, renewable energy source, electrochemical system, energy storage, decentralized energy supply.

Электротехника, 2019, №7, стр. 37-43

Способ синфазного подключения резервного питания в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой

СИВОКОБЫЛЕНКО В.Ф., ДЕРКАЧЕВ С.В.

Предложен способ подачи резервного питания в системах электроснабжения с асинхронными и синхронными двигателями, в котором обеспечивается синфазное подключение напряжения резервного источника при групповом выбеге двигателей после аварийной потери рабочего питания. По результатам математического моделирования режимов переключения питания определены допустимые зоны углов сдвига по фазе напряжений. В предложенном способе контролируются мгновенные напряжения рабочего

и резервного источников питания и определяется угол сдвига фаз между векторами этих напряжений. По данным фиксации времен достижения углом сдвига фаз трех заранее заданных значений производится параболическая аппроксимация временной зависимости изменения угла, при помощи которой прогнозируется время достижения углом значения 360^0 , а затем, с учетом собственного времени включения выключателя резервного питания, определяется время подачи команды на его включение. Приведены результаты математического моделирования и натурного испытания режимов переключения питания, которые подтверждают синфазную подачу напряжения при использовании разработанного способа и реализованного на его основе устройства, что позволяет рекомендовать способ для его использования в микропроцессорных устройствах быстродействующего автоматического переключения питания.

Ключевые слова: асинхронные и синхронные электродвигатели, резервное питание, синфазные напряжения, переключение питания.

Developed the method for supplying backup power in power supply systems with induction and synchronous motors, which provides a synchronous switching of the backup source voltage in case of a group spin down of motors after emergency loss of main power source. Based on the results of mathematical modeling of power mode switching defined the areas of the angle phase shift of the voltages. In the proposed method control the instantaneous voltages of the main and backup power sources and determining angle of phase shift between the vectors of these voltages. According to the fixation data's of the times when the phase shift achieved three predetermined values, performed a parabolic approximation of the temporal dependence of the angle change, with the help of which the time of reaching by angle to 360 degrees is predicted and then, taking into account the own time of switching on the switch, determined time of giving command to switch backup power switch. Is shown the results of mathematical modeling and field experiment of power switching modes, which confirm the in-phase supply of voltage when using the developed method and the device implemented on its method, which allows us to recommend a method for using in microprocessor-based devices of high-speed automatic power supply switching.

Key words: induction and synchronous motors, backup power, in-phase voltage, power supply switch.

Схема замещения для расчета тока короткого замыкания в тяговой сети переменного тока

ГЕРМАН Л.А., СЕРЕБРЯКОВ А.С., ОСОКИН В.Л., СУБХАНВЕРДИЕВ К.С.

Для расчета двухфазных КЗ в тяговой сети независимо от схемы внешнего электроснабжения показана допустимость замены трехфазной системы электроснабжения однофазной. При этом установлены особенности в расчете при соединении трансформатора по схеме Y/Y или Y/ Δ . На основании результатов выполненного анализа для снижения методической погрешности в вычислении токов КЗ разработана однофазная схема замещения межподстанционной зоны тяговой сети, учитывающая связь между двумя смежными подстанциями по воздушной линии 110 (220) кВ. Дан пример расчета в соответствии с предложенной схемой замещения.

Ключевые слова: тяговая сеть, переменный ток, короткое замыкание, схема соединения обмоток трансформатора, система внешнего электроснабжения, схема замещения, погрешность.

The authors have proved the feasibility of substitution of a three-phase power supply system with a single-phase one for calculation of double-phase short circuits in the traction network, irrespectively of the external power supply arrangement. Besides, calculation specifics have been established for particular transformer winding connection configurations (Y/Y, or Y/ Δ). Based on results of the analysis performed, for the methodological error in calculation of short circuit currents to be minimized, a single-phase equivalent circuit is developed for the inter-substation zone of the traction network, which takes into account the connection between two adjacent substations via overhead transmission line 100 (220) kV. An example of calculation in accordance with the proposed replacement scheme is given.

Key words: electric traction network, alternating current, short circuit, transformer winding connection configuration, external power supply arrangement, equivalent circuit, error.

Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока

ВЛАСЬЕВСКИЙ С.В., ГРИГОРЬЕВ Н.П., ТРОФИМОВИЧ П.Н.

Обеспечение плановых грузовых и пассажирских железнодорожных перевозок

выполняется по графику движения поездов, для успешного выполнения которого необходимо поддерживать требуемый уровень напряжения на токоприемнике поездов. Напряжение зависит от положения коммутационных аппаратов распределительных устройств и устройств регулирования напряжения. Для повышения эффективности работы предлагается выполнять встречное интервальное регулирование показателей работы системы тягового электроснабжения. Прогнозная последовательность дискретных значений показателей работы определяется по исполненным графикам движения поездов и нагрузок потребителей. Дискретные значения являются исходными данными для определения интервалов времени. Число интервалов за сутки выбирается с учетом коммутационного ресурса аппаратов и устройств. Интервалы времени и прогнозные средние значения в интервалах являются основой выбора нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, встречное интервальное регулирование, прогнозные интервалы времени, графики значений показателей работы.

The provision of freight and passenger traffic on railway is carried out according to the train schedule. To ensure successful train movement it is necessary to keep the required voltage level on locomotive pantographs. The voltage value depends on working conditions of switching devices and voltage regulating installations. To increase their operation efficiency opposing regulation of traction power supply system values is at certain time intervals is offered. The expected sequence of instantaneous discrete values is determined considering train schedule data and the capacity of the given district traction power supply system. The given instantaneous discrete values are taken to calculate time intervals. The number of time interval is chosen taking into account service life of switching devices and voltage regulating installations. Time intervals and expected mean values within the given intervals are the main criteria for identifying the proper power supply diagrams.

Key words: traction power supply system, opposing interval regulation, expected time interval, instantaneous discrete values.

Электротехника, 2019, №7, стр. 54-57

Мехатронный комплекс экскаватора ЭКГ-10м с электроприводами переменного тока

МАЛАФЕЕВ С.И., КОНЯШИН В.И.

Рассматриваются результаты проектирования и промышленной эксплуатации новых

мехатронных систем с двигателями переменного тока и транзисторными преобразователями частоты для экскаватора ЭКГ-10М. Векторное управление асинхронными двигателями обеспечивает высокие динамические характеристики и показатели качества регулирования. Применение современных приводов переменного тока позволило уменьшить электропотребление по сравнению с традиционными экскаваторами с приводами по системе генератор – двигатель на 20–30% и снизить удельную энергоёмкость экскавации. Коэффициент мощности экскаватора во всех режимах работы поддерживается постоянным и равным заданному значению, за счет чего обеспечивается оптимальная электромагнитная совместимость экскаватора и питающей электрической сети. Основным компонентом взаимодействия персонала и системы является дружелюбный и удобный в навигации графический интерфейс пользователя. С помощью сенсорного экрана, сочетающего аппаратную и программную части, происходит управление системами экскаватора. Обслуживающий персонал имеет возможность отслеживать все основные показатели работы экскаватора, состояние оборудования, характеристики питающей сети, данные о неисправностях. Информационная система обеспечивают полный контроль всех основных рабочих параметров, нагрузок на рабочие органы, состояние всех компонентов оборудования, анализ и представление в табличном и графическом виде данных по основным технологическим показателям работы экскаватора. Новые экскаваторы эксплуатируются в настоящее время на разрезе «Тайбинский» (Кемеровская обл., Россия) и АО «Полюс Золото» (Еруда). Приведены результаты проектирования, рассмотрен опыт промышленного производства и эксплуатации мехатронных комплексов для одноковшовых карьерных экскаваторов с электроприводами переменного тока главного движения.

Ключевые слова: экскаватор, мехатроника, двигатель, привод, контроллер.

The results of designing and industrial operation of new mechatronic systems with AC motors and transistor frequency converters for the EG-10M excavator are considered. Vector control of asynchronous motors provides high dynamic characteristics and quality control indicators. The use of modern AC drives has made it possible to reduce power consumption in comparison with traditional excavators with drives in the Ward Leonard system by 20 ... 30% and reduce the specific energy intensity of excavation. The power factor of the excavator in all modes of operation is maintained constant and equal to the set value, which ensures optimal electromagnetic compatibility of the excavator and the power supply network. The main component of the interaction between the personnel and the system is a friendly and easy-to-navigate graphical user interface. Using a touch screen, combining hardware and software parts,

the excavator system is controlled. The service staff has the ability to track all the basic performance indicators of the excavator, the condition of the equipment, the characteristics of the supply network, the data on faults on the excavator. The information system provides full control of all the main operating parameters, loads on the working bodies, the state of all components of the equipment, analysis and presentation in tabular and graphical form of data on the main technological indicators of excavator operation. New excavators are currently in operation at the Tybinskiy (Kemerovo, Russia) and Polyus Gold (Yeruda). The results of designing, experience of industrial production and operation of mechatronic complexes for single-bucket quarry excavators with AC electric drives are given.

Key words: excavator, mechatronics, motor, drive, controller.

Электротехника, 2019, №7, стр. 58-64

Исследование процессов в измерительной части цифровых устройств релейной защиты в программном комплексе MATLAB

АНДРЕЕВ М.В.

Показано, что одной из основных причин некорректной работы устройств релейной защиты (РЗ) является неадекватная реальным условиям функционирования настройка РЗ, которая в свою очередь определяется методиками расчета уставок РЗ. Анализ современных методик настройки РЗ показал отсутствие значительных изменений по сравнению с руководящими указаниями прошлых десятилетий, а соответственно, и наличие тех же недостатков. Статья посвящена разработке новых методик настройки с использованием детализированных математических моделей, учитывающих особенности конкретных РЗ и процессы в измерительных преобразователях. В рамках решения данной задачи синтезированы математические модели измерительной части цифровой релейной защиты для разных типов промежуточных трансформаторов тока (активного и пассивного) и фильтров (Баттерворта, Чебышева), проведен сравнительный их влияния на форму выходного сигнала в программе MATLAB, в том числе с учетом намагничивания измерительных трансформаторов тока. Выявлено, что наиболее простые (явный и неявный методы Эйлера) численные методы не подходят для решения созданных математических моделей. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета указанными методами и более совершенным методом Рунге-Кутты. Представленные теоретические и практические исследования позволили обосновано сформулировать требования к детализированным математическим моделям РЗ.

Ключевые слова: релейная защита, математическое моделирование, метод направленных графов.

The article analyzes reasons for the incorrect operation of relay protection devices (RP). It was revealed that one of the main reasons is the RP setting, which is inadequate to the real operating conditions. That is determined by the methodologies for calculating the RP settings. An analysis of modern methodologies showed no significant changes in comparison with the guidelines of the past decades, and accordingly the presence of the same shortcomings. The article is devoted to the development of new setting techniques using detailed mathematical models that take into account the specific RPs features and processes in the instrumental transformers. Within the framework of this task, mathematical models of the measuring part of numerical relay protection for various types of auxiliary current transformers (active and passive) and filters (Butterworth and Chebyshev) are synthesized, and their impact on the form of the output signal in the MATLAB is carried out, including taking into account the magnetization of instrumental current transformers. It is justified that the simplest (explicit and implicit methods of Euler) numerical methods are not suitable for solving the created mathematical models. The paper presents a comparative analysis of the calculation results by these methods and the more advanced Runge-Kutta method. Summarizing, the theoretical and practical studies presented in the article formulating and justifying the requirements for detailed mathematical RPs models.

Key words: relay protection, mathematical simulation, flow graph.

Электротехника, 2019, №7, стр. 65-69

Определение жесткости направляющих линейного электропривода

ГАННЕЛЬ Л.В.

Рассмотрены преимущества направляющих качения линейного электропривода прецизионных механизмов инспекционных и измерительных машин современного полупроводникового производства. Рассмотрены частотные характеристики линейного электропривода при различном предварительном натяге направляющих. Показано, что источником резонанса, проявляющегося в спаде амплитуды логарифмической амплитудно-частотной характеристики двигателя, являются направляющие линейного электропривода. Значение частоты этого резонанса может быть использовано для расчета жесткости направляющих в направлении движения. Изменение предварительного натяга

направляющих может приводить к существенному снижению запаса по амплитуде контура скорости электропривода, проявляющемуся в возникновении колебаний линейного электропривода на частоте резонанса. Предложены способы подавления таких колебаний.

Ключевые слова: линейный электропривод, упругие колебания, резонанс, жесткость направляющих, режекторный фильтр.

The advantages of linear guide for linear servo drives of precision mechanisms of inspection and measuring machines of modern semiconductor production are considered. It is shown that the source of the resonance, which manifests itself in the fall of the amplitude of the motor's Bode, is the guide itself. The frequency of this resonance can be used for calculation of the rigidity of the guides in the direction of motion. The behavior of a linear electric drive under different guides' preload in frequency domain is investigated.

Changing the guides' preload can lead to a significant reduction in the servo amplitude's margin of velocity loop, which is come out in the appearance of vibrations at the resonance frequency. Methods for damping vibrations in this case are proposed.

Key words: linear electric drive, elastic vibrations, resonance.