

Содержание

30 лет Академии Электротехнических наук Российской Федерации

Численный расчёт и анализ влияния центробежной силы и вязкостной диссипации энергии на работу высокоскоростных магнитожидкостных герметизаторов НЕСТЕРОВ С.А.

Рассмотрена математическая модель магнитожидкостных герметизаторов с учётом взаимного влияния физических полей. Взаимосвязь магнитного и гидродинамического полей реализована через дополнительную объёмную силу, зависящую от напряжённости магнитного поля и создающую давление внутри магнитной жидкости. Влияние гидродинамических процессов на распределение магнитного поля учтено через изменение магнитной проводимости при смещении границы магнитной жидкости. На основе предложенной модели исследовано влияние центробежной силы на критический перепад давления магнитожидкостного герметизатора. Показано, что конструктивными решениями можно не только нивелировать негативный эффект отрыва магнитной жидкости от поверхности вала, но и увеличить удерживаемый герметизатором перепад давления. С использованием теории планирования эксперимента проведена оценка степени влияния геометрии рабочей зоны и физических свойств магнитной жидкости на мощность диссипативных потерь. Показано, что наибольший вклад в разогрев магнитной жидкости вносят величина рабочего зазора между зубцом и корпусом, ширина площадки у вершины зубца, радиус вала и вязкость магнитной жидкости; влияние угла скоса зубца, плотности и объёма магнитной жидкости (для двухмерной задачи выраженного через площадь её поперечного сечения) при анализе вязкостного разогрева можно не учитывать.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизатор, перепад давления, вязкостная диссипация, численное моделирование.

A mathematical model of magnetofluidic sealants is considered, taking into account the mutual influence of physical fields. The relationship between the magnetic and hydrodynamic fields is realized through an additional volumetric force that depends on the magnetic field strength and

creates pressure inside the magnetic fluid. The influence of hydrodynamic processes on the distribution of the magnetic field is taken into account through a change in magnetic conductivity when the boundary of the magnetic fluid is shifted. On the basis of the proposed model, the effect of centrifugal force on the critical pressure drop of a magnetofluidic sealer is investigated. It is shown that constructive solutions can not only neutralize the negative effect of magnetic fluid separation from the shaft surface, but also increase the pressure drop held by the sealer. Using the theory of experimental planning, the degree of influence of the geometry of the working zone and the physical properties of the magnetic fluid on the power of dissipative losses was estimated. It is shown that the greatest contribution to the heating of the magnetic fluid is made by the size of the working gap between the tooth and the body, the width of the platform at the top of the tooth, the radius of the shaft and the viscosity of the magnetic fluid; the influence of the angle of the bevel of the tooth, the density and volume of the magnetic fluid (for a two-dimensional problem expressed in terms of its cross-sectional area) in the analysis of viscous heating can not be taken into account.

Key words: magnetic fluid, magnetofluidic sealer, pressure drop, viscous dissipation, numerical simulation.

Электротехника, 2023, №2, стр. 9-16

Управление с прогнозированием в системах с малым числом переменных состояния
БОГДАНОВ А.Н., АНУЧИН А.С., ДЕМИДОВА Г.Л.

Системы управления с прогнозированием активно используются в промышленности в мощных электроприводах, где допустимо применение дорогих программируемых логических матриц, обеспечивающих расчёт с горизонтом прогнозирования до 10 эпох и деревом прогноза в несколько миллионов вариантов. Однако вычислительных мощностей микроконтроллеров не хватает для реализации подобных систем в электроприводе малой мощности. Развитие микроконтроллеров идёт по пути увеличения не только вычислительной мощности, но и памяти, что позволяет реализовывать на практике системы управления с прогнозированием, используя табличные методы расчёта управляющих воздействий для всех комбинаций переменных состояния и задающих воздействий. В статье показана возможность проектирования управления с прогнозированием для двух типов электроприводов – электропривода постоянного тока и вентильно-индукторного электропривода, как объектов, имеющих малое число переменных состояния, что позволяет уместить предварительно рассчитанные таблицы управляющих воздействий в памяти микроконтроллера. Исследования на математических

моделях показали, что управление с прогнозированием с конечным набором управляющих воздействий и единичным горизонтом прогнозирования имеет недостатки, обусловленные переменной частотой коммутации, а управление с непрерывным управляющим воздействием, реализованное табличным методом, позволяет выполнять вычисления управления непосредственно перед началом следующего периода широтно-импульсной модуляции в сотни раз уменьшая время выполнения алгоритма.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, вентильно-индукторный электропривод, управление с прогнозированием, управление с конечным набором управляющих воздействий, управление с непрерывным управляющим воздействием.

Control systems with forecasting are actively used in industry in high-power electric drives, where it is permissible to use expensive programmable logic matrices that provide calculations with a prediction horizon of up to 10 epochs and a forecast tree of several million variants. However, the computing power of microcontrollers is not enough to implement such systems in a low-power electric drive. The development of microcontrollers follows the path of increasing not only computing power, but also memory, which makes it possible to implement control systems with forecasting in practice, using tabular methods for calculating control actions for all combinations of state variables and control actions. The article shows the possibility of designing control with prediction for two types of electric drives – a DC electric drive and a valve-inductor electric drive, as objects with a small number of state variables, which allows you to fit the pre-calculated tables of control actions in the memory of the microcontroller. Studies on mathematical models have shown that control with forecasting with a finite set of control actions and a single prediction horizon has disadvantages due to variable switching frequency, and control with continuous control action implemented by the tabular method allows you to perform control calculations immediately before the start of the next pulse width modulation period, reducing the algorithm execution time by hundreds of times.

Key words: DC electric drive, valve-inductor electric drive, control with prediction, control with a finite set of control actions, control with continuous control action.

Электротехника, 2023, №2, стр. 16-24

Модельно-ориентированная разработка микропроцессорной системы управления следящего электропривода постоянного тока

ПОЛЮЩЕНКОВ И.С.

Рассмотрена микропроцессорная система управления следящего электропривода

актуатора, предназначенного для автоматизации управления агрегатами дорожной техники. Программные и аппаратные средства электропривода осуществляют управление силовым преобразователем, формирование электромагнитных и электромеханических процессов в электрическом двигателе постоянного тока независимого возбуждения, автоматическое регулирование координат и взаимодействие с управляющими устройствами по цифровым линиям связи. Приведено математическое описание замкнутого контура регулирования положения штока актуатора. Предложено использование пропорционально-интегрального регулятора положения для обеспечения астатического автоматического регулирования положения штока актуатора при воздействии механической нагрузки. Для настройки регулятора положения на максимальное демпфирование колебательных процессов контура регулирования положения применена расчётная методика на основе модального синтеза. Для ограничения электромагнитного момента электропривода использовано токоограничение с отсечкой на уровне его стопорного значения. При разработке программного обеспечения системы управления использованы средства модельно-ориентированного программирования в сочетании с подпрограммами, разработанными на языке высокого уровня. С целью расширения практики применения средств модельно-ориентированного программирования дана иллюстрация их использования при компоновке структуры программного обеспечения, при которой обеспечивается рациональное распределение вычислительных ресурсов микроконтроллера. Приведены экспериментальные графики движения электропривода при отработке задающих воздействий.

Ключевые слова: следящий электропривод, автоматическое управление, модельно-ориентированное программирование, микропроцессорное управление, программное обеспечение систем управления.

The microprocessor control system of the tracking electric drive of the actuator intended for automation of control of aggregates of road equipment is considered. The software and hardware of the electric drive control the power converter, the formation of electromagnetic and electromechanical processes in a DC electric motor of independent excitation, automatic control of coordinates and interaction with control devices via digital communication lines. A mathematical description of a closed loop for regulating the position of the actuator stem is given. The use of a proportional-integral position controller is proposed to provide astatic automatic regulation of the position of the actuator stem under the influence of mechanical load. To adjust the position controller to the maximum damping of the oscillatory processes of the position control circuit, a calculation technique based on modal synthesis was applied. To limit

the electromagnetic torque of the electric drive, a current limitation with a cut-off at the level of its stop value is used. When developing the management system software, model-oriented programming tools were used in combination with routines developed in a high-level language. In order to expand the practice of using model-oriented programming tools, an illustration of their use in the layout of the software structure is given, which ensures a rational distribution of computing resources of the microcontroller. Experimental graphs of the movement of the electric drive when working out the driving influences are given.

Key words: tracking electric drive, automatic control, model-oriented programming, microprocessor control, control systems software.

Электротехника, 2023, №2, стр. 25-34

Способы компенсации влияния механических зазоров на работу позиционно-следящих систем электропривода

ТАРАРЫКИН С.В., АПОЛОНСКИЙ В.В.

Рассмотрены способы компенсации влияния механических зазоров на работу одноканальных систем электропривода с жесткой кинематикой, реализующих позиционно-следящее управление технологическими машинами (металлообрабатывающими станками, роботами, манипуляторами, агрегатированным поточным оборудованием в химической, бумагоделательной, текстильной и других отраслях промышленности). Выполнен анализ технического решения, основанного на совместном использовании изменения структуры регулятора положения с переключением входа его интегральной части при раскрытии зазора и введения дополнительной стабилизирующей обратной связи по разности угловых перемещений вала электродвигателя и рабочего органа на вход регулятора тока в системе подчиненного регулирования координат следящего электропривода. Установлено, что равнозначной альтернативой изменению структуры регулятора положения в зависимости от состояния зазора является соответствующая замена обратной связи по положению рабочего органа на обратную связь по угловому перемещению вала электродвигателя при сохранении стабилизирующей обратной связи по разности угловых перемещений рабочего органа и электродвигателя. Преимущество второго подхода заключается в значительно меньшей чувствительности системы к неточной настройке монитора зазора в составе управляющего устройства на реальный размер зазора в кинематической передаче, а также к возможным вариациям зазора в процессе эксплуатации оборудования. Повышение точности движения рабочего органа в завершающей стадии слежения и режиме

позиционирования для обоих вариантов систем может достигаться за счет дополнительных коммутирующих элементов, обеспечивающих принудительное включение интегратора в структуре регулятора положения в первом варианте системы управления или обратной связи по положению рабочего органа – во втором варианте. Эффективность рассматриваемых систем управления следящего электропривода подтверждена результатами математического моделирования в программном комплексе MATLAB и натурными испытаниями на многофункциональном экспериментальном стенде.

Ключевые слова: одноканальный электропривод, режимы позиционирования и слежения, подчиненное регулирование координат, способы компенсации влияния зазора.

The methods of compensation of the influence of mechanical gaps on the operation of single-channel electric drive systems with rigid kinematics, implementing position-tracking control of technological machines (metalworking machines, robots, manipulators, aggregated production equipment in chemical, papermaking, textile and other industries) are considered. The analysis of a technical solution based on the joint use of changing the structure of the position controller with switching the input of its integral part when opening the gap and introducing additional stabilizing feedback on the difference in angular displacements of the motor shaft and the working body to the input of the current regulator in the system of subordinate control of the coordinates of the tracking electric drive. It is established that an equivalent alternative to changing the structure of the position controller depending on the state of the gap is the corresponding replacement of feedback on the position of the working body with feedback on the angular displacement of the motor shaft while maintaining stabilizing feedback on the difference in angular displacement of the working body and the electric motor. The advantage of the second approach is that the system is significantly less sensitive to inaccurate adjustment of the gap monitor as part of the control device to the actual size of the gap in the kinematic transmission, as well as to possible variations of the gap during the operation of the equipment. An increase in the accuracy of the movement of the working body in the final stage of tracking and positioning mode for both variants of systems can be achieved due to additional switching elements that ensure the forced inclusion of the integrator in the structure of the position controller in the first version of the control system or feedback on the position of the working body in the second version. The effectiveness of the considered control systems of the tracking electric drive is confirmed by the results of mathematical modeling in the MATLAB software package and field tests on a multifunctional experimental stand.

Key words: single-channel electric drive, positioning and tracking modes, subordinate coordinate control, ways to compensate for the effect of the gap.

Электротехника, 2023, №2, стр. 34-40

Превентивная защита автономных электроэнергетических систем от обратной мощности на основе предупредительного управления

САУШЕВ А.В., ШИРОКОВ Н.В.

Рассмотрены вопросы обеспечения безаварийного перехода автономной электроэнергетической системы в частично неработоспособное состояние, вызванное отказом работающих генераторных агрегатов. Исследованы процессы, происходящие в сети при переходе одного из источников электроэнергии в двигательный режим. Показано, что выдержка времени при формировании сигнала на отключение вышедшего из строя агрегата, работающего с обратной мощностью, может не только способствовать развитию дефекта первичного двигателя, но и привести к аварийной ситуации, связанной с потерей управляемости. Сформулирована задача отключения неисправного источника электроэнергии и снижения нагрузки сети до момента перегрузки генераторных агрегатов, оставшихся работоспособными. Предложен диагностический признак, позволяющий идентифицировать неработоспособное состояние генераторного агрегата в процессе его функционирования. Разработан подход, реализующий метод предупредительного управления автономной электроэнергетической системой в условиях отказа ее элементов. Предложен алгоритм, обеспечивающий превентивную защиту системы от обратной мощности, осуществляющий прогнозирование режимов ее функционирования при наступлении нештатной ситуации. При этом обеспечивается структурная адаптация, которая исключает аварийную ситуацию, связанную с перерывом электроснабжения системы, и позволяет повысить ее надежность и безопасность.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, обратная мощность, предупредительное управление, диагностический признак, превентивная защита.

The issues of ensuring a trouble-free transition of an autonomous electric power system to a partially inoperable state caused by the failure of working generator sets are considered. The processes occurring in the network during the transition of one of the sources of electricity to the motor mode are investigated. It is shown that the use of time delay when generating a signal to turn off a failed unit operating with reverse power can not only contribute to the development of a defect in the primary engine, but also lead to an emergency situation associated with loss of

controllability. The problem of disconnecting a faulty power source and reducing the load of the network until the moment of overload of the generator sets remaining operational is formulated. Based on the results of the study, a diagnostic feature is proposed that allows identifying the inoperable state of the generator unit during its operation. A new approach has been developed that implements a method of preventive control of an autonomous electric power system in conditions of failure of its elements. An algorithm is proposed that provides preventive protection of the system from reverse power, predicting the modes of its operation in the event of an emergency situation. At the same time, structural adaptation is provided, which eliminates an emergency situation associated with a power supply interruption of the system, and allows to increase its reliability and safety.

Key words: autonomous electric power system, reverse power, preventive control, diagnostic sign, preventive protection.

Электротехника, 2023, №2, стр. 41-45

Влияние антиоксидантов на устойчивость рапсового масла высоковольтного электрооборудования к окислению

АЛЬ-БАЗИЛИ Н.М., МУСИН Л.И., ХАМИДУЛЛИНА Л.Ш., БАГАВЕЕВ А.М.,
АХМАДУЛЛИН Р.М.

Изучено влияние различных видов антиоксидантов на устойчивость рапсового масла к окислению при высоких температурах. Экспериментальные данные сравнивались с характеристиками трансформаторного масла MIDEL eN 1204 Fluid. Описаны процессы, обуславливающие старение масла.

Ключевые слова: высоковольтное оборудование, рапсовое масло, устойчивость к окислению, антиоксиданты.

The influence of various types of antioxidants on the resistance of rapeseed oil to oxidation at high temperatures has been studied. The experimental data were compared with the characteristics of the transformer oil MIDEL eN 1204 Fluid. The processes that cause the aging of the oil are described.

Key words: high-voltage equipment, rapeseed oil, oxidation resistance, antioxidants.

Электротехника, 2023, №2, стр.46-50

Об эффективности применения трансформаторов со схемой соединения обмоток

«звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом» при нелинейной несинусоидальной нагрузке

ЮНДИН М.А., ЮНДИН К.М., ИСУПОВА А.М., ЛУКИН В.В., БАБИНА Л.В.

Представлены результаты экспериментальных исследований при одинаковых нагрузках силовых трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда/звезда с нулевым проводом» в лабораторных условиях. Оба трансформатора нагружались симметричной и несимметричной нелинейной нагрузкой при разных коэффициентах загрузки. Контролировались значения коэффициентов искажения синусоидальности токов в фазах, К-фактор, потери активной мощности в силовых трансформаторах, полная суммарная мощность, суммарные коэффициенты мощности, токи в нулевом проводе, коэффициенты несимметрии токов нагрузки по нулевой последовательности. Выполнено сравнение полученных результатов, сделаны выводы об эффективности использования трансформаторов с различными схемами соединения обмоток.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, схемы соединения обмоток «звезда/звезда с нулевым проводом» и «звезда/двойной зигзаг с нулевым проводом», несимметрия, несинусоидальность, эксперимент.

The results of experimental studies with identical loads of power transformers with circuits for connecting windings «star/double zigzag with zero wire» and «star/star with zero wire» in laboratory conditions are presented. Both transformers were loaded with symmetrical and non-symmetrical nonlinear load at different load coefficients. The values of the distortion coefficients of the sinusoidal currents in phases, K-factor, active power losses in power transformers, total power, total power coefficients, currents in the zero wire, load current asymmetry coefficients in the zero sequence were monitored. The results obtained were compared, conclusions were drawn about the efficiency of using transformers with different winding connection schemes.

Key words: power transformers, winding connection schemes «star/star with zero wire» and «star/double zigzag with zero wire», asymmetry, non-sinusoidality, experiment.

Электротехника, 2023, №2, стр. 51-54

О совершенствовании технологии импульсного дефектографирования обмоток высоковольтных силовых трансформаторов

МЫТНИКОВ А.В., КАВУН И.А.

Показана принципиальная возможность контроля механического состояния обмоток

силового высоковольтного трансформатора, используя только одну ступень диагностической процедуры, а именно, зондирующий импульс. Показано, что дефект обмотки вида «полегание проводников» определяется путем спектрального анализа зондирующего импульса, подаваемого на обследуемую обмотку. Результаты анализа зондирующего импульса позволяют контролировать степень развития дефекта. Эксперименты, выполненные при различной длине зондирующего импульса в диапазоне 20–520 нс, позволили установить оптимальную длительность определения дефекта, которая находится в области 100 нс. Наличие одной ступени существенно повышает потенциальную эффективность импульсного дефектографирования благодаря снижению погрешности измерений и возможности контроля состояния активной части под рабочим напряжением при подключении генератора зондирующих импульсов через ПИН-датчик высоковольтного ввода.

Ключевые слова: силовой трансформатор, обмотки, диагностика, импульсный метод, зондирующий импульс.

It is shown that it is possible in principle to control the mechanical state of the windings of a high-voltage power transformer using only one stage of the diagnostic procedure, namely, a probing pulse. It is shown that the winding defect of the "conductor lodging" type is determined by spectral analysis of the probing pulse applied to the examined winding. The results of the probing pulse analysis make it possible to control the degree of defect development. Experiments performed at different probing pulse lengths in the range of 20-520 ns allowed us to establish the optimal duration of defect detection, which is in the region of 100 ns. The presence of one stage significantly increases the potential efficiency of pulse flaw detection by reducing the measurement error and the ability to monitor the state of the active part under operating voltage when connecting a probing pulse generator via a high-voltage input PIN sensor.

Key words: power transformer, windings, diagnostics, pulse method, probing pulse.

Электротехника, 2023, №2, стр. 55-64

Математическая модель системы «сеть – нелинейная нагрузка» с активным силовым фильтром в режиме компенсации высших гармоник
ДЫБКО М.А., НОС О.В., АЛЕКСАНДРОВ И.В.

Представлена математическая модель, позволяющая описывать электромагнитные процессы в системе «сеть – нагрузка – активный силовой фильтр». В частности, задаваясь

формой тока нагрузки и параметрами напряжения сети, можно определить показатели качества электрической энергии в точке общего присоединения – показатели качества напряжения сети и токов в сечениях сети и нагрузки. Кроме того, модель дает возможность рассчитать мгновенные значения токов в силовой цепи самого активного фильтра, что позволяет оценить потери мощности в фильтре. Основа математической модели – спектральный метод анализа периодических несинусоидальных процессов и использование переключающих функций. Особенностью модели является возможность анализировать электромагнитные процессы при различных структурах активного силового фильтра с внесением минимальных изменений. Также возможен учет искажений формы напряжения сети и использование различных алгоритмов компенсации высших гармоник. Выполнен электромагнитный анализ для системы «сеть – нелинейная нагрузка» при компенсации гармоник активным силовым фильтром на базе двух- и трехуровневого преобразователя, а также при использовании пассивных фильтров ШИМ-гармоник первого и третьего порядков. Моделирование выполнено для трех алгоритмов работы активного силового фильтра в условиях искаженной сети: поддержания постоянной потребляемой активной мощности, поддержания синусоидальной формы сетевого тока и поддержания единичного коэффициента мощности.

Ключевые слова: система «сеть – нелинейная нагрузка», качество электрической энергии, активные силовые фильтры, компенсация высших гармоник, математическое моделирование.

A mathematical model is presented that allows describing electromagnetic processes in the «network – load – active power filter» system. In particular, by specifying the shape of the load current and the network voltage parameters, it is possible to determine the quality indicators of electrical energy at the point of common connection – the quality indicators of the network voltage and currents in the sections of the network and load. In addition, the model makes it possible to calculate the instantaneous values of currents in the power circuit of the most active filter, which allows you to estimate the power loss in the filter. The basis of the mathematical model is the spectral method of analysis of periodic non-sinusoidal processes and the use of switching functions. A feature of the model is the ability to analyze electromagnetic processes with various structures of the active power filter with minimal changes. It is also possible to take into account distortions of the network voltage form and use various algorithms for compensation of higher harmonics. Electromagnetic analysis was performed for the «network – nonlinear load» system when harmonics are compensated by an active power filter based on a two- and three-level converter, as well as when using passive PWM harmonic filters of the first

and third orders. The simulation was performed for three algorithms for the operation of an active power filter in a distorted network: maintaining a constant active power consumption, maintaining a sinusoidal shape of the mains current and maintaining a single power factor.

Key words: system «network – nonlinear load», quality of electrical energy, active power filters, compensation of higher harmonics, mathematical modeling.

Электротехника, 2023, №2, стр. 65-66

Авторы номера