

*Электротехника, 2019, №1, стр. 2-7*

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ РОТОРОМ В КОРАБЕЛЬНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

**Высоцкий В.Е., Гуляев И.В., Нагирняк А.А., Олейников А.М., Чушев В.Д.**

В статье рассматриваются характеристики, конструкция и подходы к исследованию асинхронного двигателя с двухслойным ротором для электропривода корабельных насосных установок. Основным техническим требованием, предъявляемым к ним, является низкий уровень шумоизлучения при обеспечении необходимого отвода тепла от работающего двигателя. Применение внешнего двухслойного ротора в подобном двигателе даёт возможность существенно улучшить его рабочие и эксплуатационные характеристики.

*Ключевые слова:* насосные установки, электропривод, асинхронный двигатель, двухслойный ротор, низкое шумоизлучение.

This article examines the characteristics, structure and approaches to the study of asynchronous motor with double rotor (ADDR) for ship electric pumping units. The main technical requirement applicable to it, is the low level of noise while providing the necessary heat dissipation of ADDR. Application of the external rotor motor in this double layer makes it possible to substantially improve its operating and maintenance characteristics.

*Key words:* pumping units, electric, induction motor, double-layer rotor, low noise emission.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 8-12*

## ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ IGBT МОДУЛЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ КРИСТАЛЛАМИ

**Ильин М. В., Вилков Е. А., Гуляев И. В.**

Рассмотрен подход к формированию тепловой модели силового IGBT модуля на основе метода электротепловой аналогии. В отличие от традиционных одномерных тепловых моделей, новая модель дополнена тепловыми взаимосвязями между кристаллами.

Параметры тепловых взаимосвязей определялись с помощью исследования трёхмерной модели силового модуля в среде ANSYS. Предложенная модель предназначена повысить качество прогнозирования температуры кристаллов силового модуля за счёт учёта теплового взаимовлияния кристаллов.

*Ключевые слова:* IGBT модуль, тепловая модель, электротепловая аналогия, метод конечных элементов, надёжность.

An improved approach to the development of the thermal model of a power IGBT module based on the method of electrothermal analogy is described. Unlike traditional one-dimensional thermal models, the new model is supplemented by thermal interrelations between crystals. The parameters of the thermal interrelations were determined by studying the three-dimensional model of the power module in the ANSYS. The proposed model is intended to improve the quality of predicting the temperature of the crystals of the power module by taking into account the thermal mutual influence of the crystals.

*Key words:* IGBT module, thermal model, electrothermal analogy, finite element method, reliability.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 13-18*

## МОДЕЛЬНЫЕ НЕСИММЕТРИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**Кзаков Ю.Б., Морозов А.Н., Гуляев И.В.**

Отказ мощных синхронных машин ведёт к значительным финансовым потерям. Особенно это важно для синхронных генераторов, которые работают на мощные электрические сети и влияют на множество потребителей. Внезапный выход из строя мощного генератора влечёт за собой большие затраты на штрафные санкции и ремонт, сбой в работе энергосистем и потребителей электрической энергии. Диагностика состояния машин осложнена большим количеством взаимосвязанных причин. Широко применяемый для асинхронных двигателей метод фиксации внешних электромагнитных полей (ВЭМП) практически не применяется для синхронных машин. Установка датчиков поля внутри синхронной машины не всегда возможна, а измерение внешних полей имеет слабую методическую и фактологическую базу. Моделирование синхронной машины позволяет установить связь конкретного дефекта с искажением внешнего электромагнитного поля машины. Натурные эксперименты показывают реальную возможность измерения магнитных полей вне корпуса синхронного генератора. Исследование связей внешнего электромагнитного поля с конкретными дефектами машины, разработка методов измерения поля и обработка результатов измерения, выявление диагностических

признаков, характеризующих состояние работающей синхронной машины и дающих возможность принятия необходимого решения, является актуальной научно-технической задачей.

*Ключевые слова:* синхронная машина, внешние электромагнитные поля, потери от аварий, моделирование внешнего поля, диагностический признак, датчик Холла.

Failure of powerful synchronous motors leads to significant financial losses. This is especially important for synchronous generators that operate on powerful electrical networks. The sudden failure of a powerful generator entails high costs of fines and repair, malfunction of power systems. Diagnosis of the condition of machines is complicated by many interrelated causes. Widely used for induction motors, the method of measuring external electromagnetic fields (VEMP) for synchronous machines is practically not used. The installation of field sensors inside a synchronous machine is not always possible, and the measurement of external fields has a weak methodological and factual basis. Simulation of the synchronous machine allows you to establish the relationship of a particular defect with the distortion of the external electromagnetic field of the machine. Natural experiments show a real possibility of measuring magnetic fields outside the case of a synchronous generator. Investigation of the external electromagnetic field links with specific machine defects, the development of methods for measuring the field and processing the measurement results, identifying the diagnostic features that characterize the state of the operating synchronous machine and making it possible to make the necessary decision is an actual scientific and technical task.

*Keywords:* synchronous machine, external electromagnetic fields, the cost of the damage, external field modeling, diagnostic feature, Hall sensor.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 19-23*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЁМКОСТИ ЗАЩИТНЫХ СНАББЕРНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В СИЛОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Капитонов С.С., Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Гуляев И.В.**

Рассмотрен подход к оптимизации ёмкости снабберных конденсаторов силового преобразователя на основе группового последовательного соединения силовых полупроводниковых приборов (СПП) за счёт подбора их параметров. Исследования параметров СПП в состоянии высокой проводимости показали, что их значения имеют

большой разброс. Это приводит к тому, что температуры их полупроводниковых структур могут значительно различаться. Для уменьшения амплитуды перенапряжений на приборах и оптимизации параметров защитных снабберных цепей нужно обеспечить наиболее близкие друг к другу тепловые режимы работы СПП последовательной группы. Исследование тепловых процессов в СПП проведено с помощью электротепловой модели, которая отличается от ранее разработанных моделей, созданных в среде Multisim, тем, что исходными являются данные, полученные при испытании приборов. Результаты исследования показали, что благодаря подбору электрических и тепловых параметров можно на порядок уменьшить ёмкость снабберных конденсаторов. Это позволит значительно снизить потери в полупроводниковой структуре СПП при их переключении из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости и минимизировать массогабаритные показатели вентиляных блоков.

*Ключевые слова:* силовой преобразователь, силовой полупроводниковый прибор, снабберный конденсатор, оптимизация, тепловые и электрические параметры.

The approach to optimizing of capacitance value of snubber capacitors of power converter based on the group series connection of power semiconductor devices (PSD) due to implementation of their selection according to parameters is considered in the article. The results of study of values of the PSD parameters in a state of high conductivity have shown, that the values of these parameters have a considerable scatter. This leads to the fact, that temperature values of their semiconductor structures can vary significantly. It is necessary to provide the closest thermal modes for operation of serial group to reduce the amplitude of overvoltage on the instruments and to optimize values of parameters of the protective snubber circuits. The study of thermal processes in PSD was carried out with the help of an electrothermal model, the main feature of which is that, in contrast to the previously developed models created in the environment Multisim, the data obtained during the testing of instruments are initial ones. The results of conducted research showed that due to the choice of devices based on electrical and thermal parameters, it is possible to reduce the capacitance of the snubber capacitor by an order of magnitude. This will significantly reduce losses in the semiconductor structure of the PSD, when they are switched from a low conductivity state to a high conductivity state and minimize the mass-dimensional parameters of the valve blocks.

*Key words:* power converter, power semiconductor device, snubber capacitor, optimization, thermal and electrical parameters.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 24-28*

## АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УЛУЧШЕННОМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ АЛГОРИТМЕ УПРАВЛЕНИЯ

**Попова В.А., Попов А.А., Гуляев И.В.**

Большинство энергоэффективных алгоритмов управления снижают динамику системы управления (СУ). Наиболее распространенный из них – метод минимума статорных токов (метод МТРА – Maximum Torque Per Ampere). Малое энергопотребление электропривода достигается за счет снижения уровня потокосцепления ротора. Использование усовершенствованных алгоритмов позволяет улучшить динамические характеристики СУ, не снижая их эффективности. Рассматриваются три возможных подхода, обеспечивающих высокую динамику системы управления: сохранение значения тока по оси  $q$ , сохранение значения момента на валу двигателя, а также преобразование команды момента из ступенчатой функции в наклонную прямую. Представлена методика оценки допустимых токов статора в условиях ограничения по напряжению, а также ее возможная реализация в улучшенном алгоритме энергоэффективного управления. Полученные результаты позволяют использовать предложенный алгоритм для СУ асинхронным двигателем в системах с повышенными требованиями к динамике.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, моделирование, MatLab, ограничения по току и напряжению.

In general, all the efficient control algorithms reduce the dynamics of the control system. The most common of these is the МТРА – Maximum Torque Per Ampere. Low power consumption of the electric drive is achieved by reducing the level of the rotor flux. The advanced algorithms allow you to improve the dynamic characteristics of control system, without reducing their efficiency. The three methods are considered: constant  $q$ -axis current, constant torque value, and transform step-like torque command to ramp-like. The paper presents a method for estimating the available stator currents under voltage constraints, as well as its implementation in an improved energy-efficient control algorithm. The obtained algorithm can be used in control system of an induction motor in applications with high dynamic.

*Key words:* induction machine, modeling, MatLab, current and voltage constraints.

## ДИНАМИКА ПОЛЕОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО МИНИМУМУ ТОКОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Попов А.А., Попова В.А., Гуляев И.В.**

Для улучшения энергоэффективности электропривода (ЭП) в машинах, работающих при малых нагрузках в течение длительного времени, снижают уровень потока ротора. Одним из наиболее распространенных методов является метод минимума токов статора (МТРА – Maximum Torque Per Ampere). Динамика такой системы будет зависеть от скорости намагничивания ротора, зависящей от постоянной времени ротора, которая может быть достаточно большой. Предложенный метод улучшения динамики асинхронного двигателя при полеориентированном управлении основывается на использовании максимума доступного тока инвертора с учетом его ограничений для форсирования намагничивания ротора двигателя. Предложено заменить ступенчатую команду момента на профилированную команду в виде наклонной прямой, что позволяет достичь приемлемого быстродействия привода и при этом снизить нагрузку на его механическую часть. Для определения траектории, соответствующей наибольшей динамике момента и с учетом принятых ограничений были применены аналитические и численные методы. Показано, что предложенным методом можно добиться высокой динамики энергоэффективного управления по сравнению с традиционными методами.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, полеориентрованное управление, моделирование, MatLab.

To improve an efficiency of the electric drive operating at low loads during long period using field-weakening methods, one of the common method is Maximum Torque Per Ampere (МТРА). The dynamics of such system will be depending on the magnetization speed of the rotor, which in turn depends on the rotor time constant which magnitude could be large. The proposed method of improving the dynamics of induction motor with field-oriented control is based on using the maximum available current of the inverter, taking into account current limitations, to force the magnetization of the rotor. The article also proposed to replace the torque step-like command to the profiled command like a ramp, which allows achieve an acceptable dynamic of the drive an at the same time reduce the load on its mechanical part. Analytical and numerical methods were used to determine the trajectory of the corresponding highest dynamic of the torque taking into account the current limitations. The results of the research showed that the proposed method can achieve high dynamics of energy-efficient control

compared to traditional methods.

*Key words:* asynchronous motor, field-oriented control, simulation, MatLab.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 32-32*

АВТОРЫ ОПУБЛИКОВАННЫХ СТАТЕЙ

*Электротехника, 2019, №1, стр. 33-37*

О СИНТЕЗЕ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
С МНОГОСЕКЦИОННЫМ АВТОНОМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

**Мозжечков В.А.**

Для электроприводов, реализующих назначенное программное движение, предложен метод синтеза законов управления, обеспечивающих минимизацию потребной емкости автономного источника питания электропривода, основой которого являются электроаккумуляторы и/или суперконденсаторы. Закон управления реализует возможность отключения и подключения к магистрали питания привода одной из секций источника питания. Сокращение потребного запаса энергии в источнике питания достигается в результате более полного использования части его секций на участках движения с низким уровнем запрашиваемого напряжения и сбережения высокого потенциала для предстоящих участков движения только в одной секции или некоторой части секций. Сформулирована математическая постановка задачи и предложен численный метод её решения. Рассмотрен пример реализации предлагаемого метода. Показано, что использование предложенного метода позволяет существенно сократить потребную ёмкость, и как следствие – габариты, массу и стоимость автономных источников питания электроприводов.

*Ключевые слова:* электропривод, автономный источник питания, закон управления, аккумулятор, суперконденсатор.

For electric drives implementing the assigned motion, a method for synthesizing control laws is proposed that minimizes the required capacity of an autonomous power supply of an electric

drive, based on accumulators / ultracapacitors. The control law implements the ability to disconnect and connect to the power supply line of the drive of one of the power supply sections. Reduction of the required supply of energy in the power supply is achieved as a result of more complete emptying of a part of its sections in traffic areas with a low level of requested voltage and saving high potential for the forthcoming traffic areas in only one section or some part of the sections. A mathematical formulation of the problem is presented and a numerical method for solving it is proposed. An example of the implementation of the proposed method is considered. It is shown that the use of the proposed method allows to significantly reduce the required capacity, and as a result – the dimensions, mass and cost of autonomous power supplies of electric drives.

*Key words:* electric drive, autonomous power supply, control law, accumulator, ultracapacitor.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 38-41*

#### ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЦЕНТРОВ ЗАХВАТА НА ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

**Новиков Г.К., Федчишин В.В., Ещенко Д.А., Кукштель Л.Е.**

Измерены спектры токов термостимулированной деполяризации и зависимостей электретной разности потенциалов от времени в полимерах, облученных мягким рентгеновским излучением электрического газового разряда. Результаты измерений использованы для определения подвижности электронов и дырок в полимерных кабельных и конденсаторных диэлектриках, имеющих различающиеся значения плотности и концентрации электрически активных центров захвата.

*Ключевые слова:* полимерные диэлектрики, носители заряда, центры захвата, плотность, концентрация.

The spectra of the thermally stimulated depolarization currents and the time dependence of the electric potential difference were measured in polymers irradiated with soft x-ray emission of an electric gas discharge. The results of measurements are used to determine the mobility of electrons and holes in polymer cable and capacitor dielectrics having different values of density and concentration of electrically active centers of capture.

*Key words:* polymeric dielectrics, the charge carriers, capture, density, concentration.



## ЭРОЗИЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОММУТАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**Баранов М.И.**

Предложен инженерный подход для приближенного расчета тепловой энергии, выделяющейся в плазменном канале искры и на массивных металлических электродах воздушного сильноточного коммутатора (СК) атмосферного давления, а также электрической эрозии электродов СК, входящего в состав высоковольтной электрофизической установки (ВЭФУ) с мощным емкостным накопителем энергии (ЕНЭ). Отличительной особенностью данного подхода является то, что для определения энергосодержания и эрозии электродов в воздушном СК необходимы лишь данные об электро- и теплофизических характеристиках металла его электродов, удельной электропроводности низкотемпературной плазмы в канале искры и амплитудно-временных параметрах импульсного тока в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ. Введено и математически определено понятие эквивалентного активного сопротивления плазменного канала сильноточной искры, постоянного в течение всего времени разряда мощного ЕНЭ на электрическую нагрузку. В приближенном виде рассмотрен электрофизический процесс переноса в плазменном канале ионизированных атомов расплавленного металла электрода коммутатора на катод исследуемого СК. Предложенный подход позволяет оперативно выполнять расчетную оценку баланса электрической энергии в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ с учетом ее тепловых потерь в коммутаторе. Эксперименты подтверждают достоверность полученных расчетных соотношений для оценки энергосодержания и эрозии металлических электродов в воздушном коммутаторе.

*Ключевые слова:* емкостный накопитель энергии, воздушный коммутатор, плазменный канал искры, эрозия электродов; баланс электрической энергии.

New engineering approach is offered for the close calculation of the selected thermal energy in the plasma channel of spark and on the massive metallic electrodes of air heavy-current switchboard (HCS) of atmospheric pressure, and also electric erosion of electrodes of HCS, entering in the complement of the high-voltage electrophysics setting (HVES) with the powerful capacity store of energy (CSE). The distinctive feature of this approach is that for determination of selection energy and erosion of electrodes in air HCS information is needed only about

electro- and thermophysical descriptions of metal of his electrodes, to specific conductivity of low temperature plasma in the channel of spark and peak-temporal parameters of impulsive current in the bit chain of HVES with CSE. It is entered and the new concept of equivalent active resistance of channel of spark is mathematically certain, permanent during all of time discharge of CSE on the electric loading. In a close kind the electrophysics process of transfer in the plasma channel of the ionized atoms is considered molten of metal of this electrode of switchboard on the cathode of probed of HCS. Offered approach allows operatively to execute the calculation estimation of balance of electric energy in the bit chain of HVES with CSE taking into account its thermal losses in a switchboard. Experiments validify row of the got calculation correlations for the estimation of selection energy and erosion of metallic electrodes in the air switchboard.

*Key words:* powerful capacity store of energy, air switchboard, plasma channel of spark, erosion of electrodes, balance of electric energy.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 49-59*

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТЫ ОТ БОКСОВАНИЯ И ЮЗА КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Бороненко Ю.П., Ромен Ю.С., Викулов И.П., Изварин М.Ю., Андреев В.Е.**

Современный электроподвижной состав оборудован микропроцессорной системой управления тяговым электроприводом и плавным бесконтактным регулированием напряжения на тяговых электродвигателях, что позволяет реализовывать гибкие алгоритмы защиты от процессов боксования (юза). Несвоевременное обнаружение и локализация процессов боксования (юза) приводит к снижению тяговых (тормозных) усилий, повреждению колесно-моторного блока, повышенному износу колес и рельсов. Разработана имитационная модель электроподвижного состава с коллекторным тяговым электроприводом и плавным зонно-фазовым регулированием напряжения на тяговых электродвигателях, при помощи которой проведено исследование алгоритмов защиты от процессов боксования (юза) в режиме тяги и рекуперативного торможения. Модель содержит блоки системы Matlab и пакета расширения Simulink: блок тягового трансформатора, блоки тяговых двигателей, блок элементов цифровой системы автоматического управления тяговым электроприводом, блоки датчиков токов и напряжений, блоки вывода результатов моделирования. Рассмотрены алгоритмы защиты от процессов боксования (юза), локализация которых происходит за счет снижения токов

якорей тяговых двигателей боксующей (юзующей) колесной пары. В режиме тяги снижение токов якорей осуществляется путем воздействия на регулятор тока якорей тяговых электродвигателей, в режиме рекуперативного торможения – на регулятор тока возбуждения группы тяговых электродвигателей с юзующей колесной парой.

Рассмотренные алгоритмы защиты позволяют эффективно локализовать процессы боксования (юза) с минимальной потерей тяговых (тормозных усилий).

*Ключевые слова:* электрический подвижной состав, коллекторный тяговый двигатель, система автоматического управления, зонно-фазовое регулирование напряжения, боксование и юз, алгоритмы защиты, имитационное моделирование.

Modern electric rolling stock is equipped with a microprocessor control system of traction electric drive and smooth contactless voltage regulation on traction motors, which allows to implement flexible skidding (wheel-locking) protection algorithms. Untimely detection and localization of skidding (wheel-locking) processes leads to decrease traction (brake) forces, damage wheel-motor unit, increase wear of wheels and rails. The simulation model of electric rolling stock with dc-motor electric drive and smooth zone-phase voltage regulation is developed, on which skidding (wheel-locking) protection algorithms in the mode of traction and regenerative braking is conducted research. The model contains MATLAB and Simulink extension package blocks: traction transformer, DC traction motors, digital automatic control system of traction electric drive, current and voltage sensors, unit of simulation results output. Skidding (wheel-locking) protection algorithms is discussed. The localization of this processes is due to the anchors current reduction of traction motors with skidding (wheel-locking) wheel set. In the traction mode the anchors current reduction is due to impact on the anchors current regulator of traction motors and in the regenerative braking mode is due to impact on the exciting current regulator of traction motors group with wheel-locking wheel set. The considered protection algorithms allow to effectively localize the processes of skidding (wheel-locking) with a minimum decrease traction (braking) forces.

*Key word:* electric rolling stock, dc motor, automatic control system, zone-phase voltage regulation, skidding and wheel-locking, protection algorithm, model of traction electric drive, simulation model.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ  
АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИН ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Лоханин Е.К., Гараев Ю.Н., Россовский Е.Л., Глаголев В.А.**

В статье развиваются методы математического моделирования синхронных и асинхронизированных машин продольно-поперечного возбуждения при расчетах установившихся и переходных режимов. Существующие синхронные машины продольного возбуждения (СМ ПВ) и продольно-поперечного возбуждения (СМ ППВ) не всегда позволяют в полной мере обеспечить устойчивость и надежность энергосистем в установившихся и переходных режимах. Эти машины способны работать лишь в ограниченной области потребления реактивной мощности, что связано с нарушением их устойчивой работы. Значительно лучшими техническими характеристиками обладают асинхронизированные синхронные машины (АСМ), особенно в режимах потребления реактивной мощности. Динамическая устойчивость АСМ мало зависит от их режима работы и существенно выше, чем у СМ ППВ и тем более у СМ ПВ. Асинхронизированные синхронные машины позволяют при определенных законах автоматического регулирования возбуждения обеспечить независимое регулирование электромагнитного момента и напряжения статора. В статье рассмотрены существующая классификация СМ ППВ и АСМ и основные отличия СМ ППВ от АСМ. Выполнен анализ сопоставительных расчетов переходных процессов в генераторах с продольно-поперечным и продольным регулированием. Показано, что АСМ обладают значительно бóльшей устойчивостью по сравнению с СМ ППВ, особенно в режимах, связанных с изменениями частоты в энергосистемах.

*Ключевые слова:* энергетические системы, синхронные и асинхронизированные машины, продольно-поперечное возбуждение, системы автоматического регулирования возбуждения.

The article develops methods of mathematical modeling of synchronous and asynchronous machines of longitudinal-transverse excitation in the calculation of steady-state and transient modes. The existing synchronous machines of longitudinal excitation (SM LE) and longitudinal-transverse excitation (SM LTE) do not always allow to ensure the stability and reliability of power systems in steady-state and transient modes. These machines are able to operate only in a limited area of reactive power consumption, which is associated with a violation of their stable

operation. Much better technical characteristics have asynchronous synchronous machines (ASM), especially in the modes of reactive power consumption. The dynamic stability of ASM depends little on their mode of operation and is significantly higher than that of SM LTE and the more so in SM LE. Asynchronous synchronous machines allow for independent control of the electromagnetic torque and the stator voltage under certain laws of automatic excitation control. The article considers the existing classification of SM LTE and ASM and the main differences of SM LTE from ASM. The analysis of comparative calculations of transients in generators with longitudinal-transverse and longitudinal regulation is carried out. It is shown that ASM have much greater stability in comparison with SM LTE, especially in the modes associated with changes in frequency in power systems.

**Key words:** energy systems, synchronous and asynchronous machines, longitudinal-transverse excitation, automatic excitation control systems.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 67-76*

## СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА АВТОТРАНСФОРМАТОРА С ОТОБРАЖЕНИЕМ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ

**Шакиров М.А.**

Представлена универсальная двухтрансформаторная схема замещения автотрансформатора с явным отображением его главного свойства – транспортировать энергию двумя параллельными путями: электрическим и электромагнитным. Одновременно на схеме отображаются магнитные потоки в участках окна и в отдельных частях магнитопровода, а также в областях между ним и баком при насыщении стали. Аналогичной полнотой в представлении потоков мощности и магнитных потоков характеризуется векторная диаграмма рабочего режима автотрансформатора. С ее помощью достигнута высокая степень наглядности в объяснении перевозбуждения отдельных частей магнитопровода в короткозамкнутом автотрансформаторе и выводе формул для определения в них сверх- и антисверхпотоков (в сравнении с потоками холостого хода) в этом режиме. Представленная схема замещения пригодна для повышающего и понижающего автотрансформаторов и применима для исследования и установившихся, и переходных процессов.

**Ключевые слова:** автотрансформатор, схема замещения, магнитный поток, первичная и вторичная обмотки, короткое замыкание, холостой ход, векторная диаграмма.

The universal two-transformer equivalent circuit of autotransformer with a clear display of its main properties – to transport the energy along two parallel paths: electrical and electromagnetic – is suggested. At the same time on this circuit magnetic fluxes in the sites window, and in parts of the magnetic circuit and in fields between it and the tank in the event of saturation of the steel are represented. A similar completeness in the representation of power flows and magnetic fluxes is characterized by a vector diagram of the autotransformer operating mode. With her help, achieved a high degree of clarity in explaining of the overstimulation in certain parts of the magnetic circuit of the short-circuited autotransformer and the derivation of the formula for determination of supper- and antfluxes (in compared with fluxes when idle) in this mode. Presented equivalent circuit serves at the same time as boosting and step-down autotransformers, and applicable to study the steady-state and transient processes.

*Key words:* autotransformer, equivalent circuit, magnetic flux, primary and secondary windings, short circuited, idling, vector diagram.

*Электротехника, 2019, №1, стр. 77-77*

**АЛЕКСАНДР ИОСИФОВИЧ ЛУРЬЕ (НЕКРОЛОГ)**