

УДК 621.31
Шифр специальности ВАК 2.4.3.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ И ГЕНЕРАЦИИ В ЗАДАЧАХ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассматривается применение данных синхронизированных векторных измерений для определения характера нагрузки и генерации в узлах электроэнергетической системы с целью повышения эффективности противоаварийного управления. Предложен подход к классификации узлов энергосистемы на основе анализа напряжения, тока, активной и реактивной мощности, фазовых углов, частотных характеристик, скорости изменения частоты и коэффициента гармонических искажений. Показано, что использование устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволяет уточнять параметры режима в реальном времени, выявлять особенности поведения нагрузки и генерации, а также формировать более точные управляющие воздействия. Рассмотрены перспективы развития алгоритма, включая применение виртуальной инерции, предиктивной аналитики и динамической оптимизации объема разгрузки.

АВТОРЫ:
Ю.А. Зинькевич, аспирант,
ORCID 0009-0001-2801-5269,
yurizinkevich@mail.ru,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, Россия
А.В. Широков,
ФГБОУ ВО НГТУ,
Новосибирск, Россия
М.И. Кушнир,
Филиал ПАО «РусГидро» —
«Саяно-Шушенская ГЭС
им. П.С. Непорожного»,
Саяногорск, Республика Хакасия,
Россия

Научный руководитель:
Домышев А.В., к. т. н.,
научный сотрудник Института
систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#синхронизированные векторные
измерения; #противоаварийное
управление; #адаптивные
алгоритмы; #распределенная
генерация; #возобновляемые
источники энергии

↓ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Зинькевич Ю.А. Использование синхронизированных векторных измерений для идентификации характера нагрузки и генерации в задачах противоаварийного управления // Энергия единой сети. 2026. № 2 (81). С. 44–48.



Источник: фотобанк ПАО «Россети»



ВВЕДЕНИЕ

Современные электроэнергетические системы находят-ся на этапе масштабной трансформации, обусловлен-ной ростом доли распределенной генерации (включая возобновляемые источники энергии), увеличением количества активных потребителей и внедрением цифровых технологий. Эти процессы усложняют структуру энергосистемы, способствуют отягощению переходных режимов и увеличивают вероятность возникновения аварийных ситуаций. В таких условиях возрастает потребность в постоянном мониторинге состояния сети и оперативном определении характера потребления и генерации в каждом узле энергосистемы, а также в более точных и динамически адаптируемых алгоритмах противоаварийного управления [1,4]. Это необходимо для повышения устойчивости системы, корректной настройки противоаварийной автоматики и эффективного диспетчерского управления. Ведущую роль в решении данной задачи играют устройства синхронизированных векторных измерений (СВИ), которые с высокой точностью регистрируют токи, напряже-ния, частоту и фазовые углы в различных точках сети с привязкой к единой шкале времени [3].

Практическая значимость такой идентификации заключается в том, что выбор воздействия противо-аварийного управления должен учитывать не только величину аварийного отклонения, но и ожидаемую реакцию конкретного узла сети. Например, отключение части электродвигательной нагрузки может одновре-менно снижать и активную, и реактивную составляющие потребления, что влияет на восстановление напряжения иначе, чем отключение преимущественно статической нагрузки.

При оценке частотной устойчивости важно учитывать наличие значительной доли инверторной генерации, поскольку такие источники, как правило, не вносят есте-ственной электромеханической инерции в том же виде, что и синхронные машины. Нелинейные электроприем-ники и компенсирующие устройства, в свою очередь, могут изменять гармонический состав токов и влиять на достоверность режимных признаков, используемых в логике автоматики. Поэтому классификация характера нагрузки и генерации рассматривается не как самостоя-тельная диагностическая задача, а как информационная основа для выбора объема разгрузки, корректировки уставок и приоритета управляющих воздействий.

В рамках настоящей статьи рассматриваются в первую очередь узлы электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения, в которых размещение устройств СВИ технически и экономически оправдано для мониторинга устойчивости и противоаварийного управления. К таким объектам могут относиться центры питания, узлы присоединения крупной нагрузки, элек-тростанции, подстанции выдачи мощности ВИЭ, а также узлы связи распределенной генерации с магистральной или распределительной сетью. Для сетей более низ-ких классов напряжения предложенный подход может использоваться в укрупненной форме — через агрегиро-ванное представление района нагрузки или генерации.

ПЕРЕЧЕНЬ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ И КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ

Для определения характера нагрузки и генерации исполь-зуются данные, поступающие от СВИ в режиме реального времени. К ключевым измеряемым параметрам отно-сятся: мгновенные и действующие значения напряжения и тока, активная и реактивная мощности, фазовый угол между током и напряжением, скорость изменения частоты, содержание высших гармоник и коэффициент искаже-ний (THD) [5]. Измерения синхронизируются по сигналам глобальной навигационной системы, что обеспечивает согласованность данных во всех узлах системы и делает возможным пространственно-временной анализ. Такая согласованность критически важна для своевременного выявления нарушений синхронизма, появления недопу-стимых режимов, оценки устойчивости и корректного функционирования систем противоаварийного управле-ния. На основании этих величин формируются вторичные признаки, которые характеризуют тип узла: потребля-ющий он или генерирующий, является ли генерация синхронной или инверторной, стабильно ли поведение нагрузки и насколько она подвержена флуктуациям. Эти параметры позволяют с высокой точностью классифи-цировать узлы по типам: пассивная нагрузка, активная нагрузка, централизованная генерация, инверторная гене-рация, гибридные структуры и др.

Предлагаемый подход не предусматривает отказа от заранее известных сведений о составе генерирующего оборудования, схемах выдачи мощности, статических характеристиках узлов нагрузки и действующих уставках устройств противоаварийной автоматики. Эти данные должны использоваться как априорные при построении алгоритма. Роль СВИ в данном подходе заключается не в замене расчетной модели энергосистемы, а в ее оперативном уточнении по фактическому режиму. Это особенно важно для узлов, в которых состав нагрузки и генерации изменяется во времени: подключаются или отключаются преобразовательные установки, меняется выработка ВИЭ, изменяется направление перетоков мощ-ности, появляются локальные колебания напряжения, частоты и фазовых углов. В таких условиях заранее задан-ная характеристика узла может не полностью отражать его текущее состояние, а данные СВИ позволяют уточнять его поведение непосредственно в процессе работы энер-госистемы.

Таким образом, преимущество предлагаемого подхода состоит в переходе от статически заданной настройки ПАУ к адаптивной логике, в которой априорные сведения о сети дополняются текущими измерительными признаками. Это позволяет уточнять принадлежность узла к тому или иному типу нагрузки или генерации, оценивать его чувстви-тельность к управляющему воздействию и снижать риск избыточной либо недостаточной разгрузки.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ

Анализ характера нагрузки основывается на соотношении между током и напряжением, которое

определяет фазовый угол и, соответственно, соотношение между активной и реактивной мощностями [3,4]. Коэффициент мощности $\cos\varphi$ рассчитывается по формуле:

$$\cos\varphi = \frac{\vec{U} \cdot \vec{I}}{|\vec{U}||\vec{I}|}, \quad (1)$$

где $\vec{U}$ и $\vec{I}$ — векторные представления (фазоры) напряжения и тока соответственно.

Дополнительно анализируется гармоническое искажение тока, характеризуемое коэффициентом THD (Total Harmonic Distortion):

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} (I_1^n)^2}, \quad (2)$$

где I_n — амплитуда гармоники порядка n ; I_1 — амплитуда основной гармоники.

На основе вышеперечисленных параметров формируется вектор признаков, характеризующий нагрузку:

$$X = \left[P, Q, \cos\varphi, THD, \frac{dP}{dt}, \frac{dQ}{dt} \right]. \quad (3)$$

Анализ этих параметров позволяет определить характер нагрузки в узле энергосистемы, опираясь на фундаментальные электрофизические соотношения и наблюдаемые временные зависимости. В первую очередь коэффициент мощности $\cos\varphi$ позволяет оценить, какая часть нагрузки связана с активной, а какая — с реактивной составляющей. Чем ближе его значение к единице, тем больше нагрузка по своему характеру приближается к активной. При снижении $\cos\varphi$ возрастает доля реактивной мощности, что обычно связано с индуктивными или емкостными элементами.

Например, если $\cos\varphi$ меньше 0,7, можно предположить присутствие значительной индуктивной нагрузки. К таким потребителям относятся асинхронные электродвигатели и другое подобное оборудование. В этом случае, как правило, фиксируется положительное значение реактивной мощности, что дополнительно указывает на индуктивный характер нагрузки. Если же реактивная мощность имеет отрицательное значение, это свидетельствует о преобладании емкостной составляющей. Такая ситуация может быть связана как с работой устройств компенсации реактивной мощности (например, батарей статических конденсаторов), так и с наличием нелинейных нагрузок с коррекцией коэффициента мощности, включая активные фильтры.

Еще одной важной диагностической характеристикой является коэффициент гармонических искажений THD. Он показывает, в какой степени форма тока или напряжения отличается от синусоидальной, то есть позволяет судить о степени нелинейности нагрузки. Для линейных потребителей значение THD обычно близко к нулю. Однако при подключении преобразовательной техники — импуль-

сных источников питания, частотных преобразователей, тиристорных выпрямителей — в спектре тока появляются высшие гармоники, которые приводят к повышению THD. Это не следует рассматривать как однозначный признак мощной нелинейной нагрузки. В ряде случаев значительные искажения тока в присоединении могут быть обусловлены работой батарей статических конденсаторов, фильтрокомпенсирующих устройств и активных фильтров, а также резонансными явлениями в сети. Поэтому в предлагаемом подходе THD используется не как самостоятельный классификационный критерий, а как один из признаков, который должен анализироваться совместно с направлением потоков активной и реактивной мощности, знаком и динамикой реактивной мощности, изменением спектрального состава тока во времени, а также известной информацией о наличии компенсирующих устройств в рассматриваемом узле.

Если в узле установлены БСК или фильтрокомпенсирующие устройства, алгоритм должен использовать специальный режим интерпретации гармонических признаков. В этом случае повышение THD не приведет к автоматической классификации узла как содержащего нелинейную нагрузку. Сначала проверяется соответствие искажений режиму работы компенсирующего оборудования: анализируются изменения реактивной мощности, появление характерных гармонических составляющих, корреляция искажений с коммутацией секций БСК или изменением режима фильтра. Только при отсутствии такой связи и при одновременном наличии признаков преобразовательной нагрузки — резких изменений тока, характерного спектра гармоник и изменения коэффициента мощности — узел классифицируется как содержащий выраженную нелинейную нагрузку.

Кроме статических характеристик, важную роль играет динамика изменения мощности. Быстрые изменения активной и реактивной составляющих могут свидетельствовать о прерывистой или циклической нагрузке.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ГЕНЕРАЦИИ

Аналогично нагрузке, характер генерации в узле может быть определен на основе анализа частотных характеристик и фазовых углов. Первым диагностическим признаком является поведение частоты:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad \frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}, \quad (4)$$

где θ — фазовый угол напряжения.

У синхронных генераторов изменение частоты происходит с определенной инерцией [7]. Для инверторных источников (солнечные панели, ветрогенераторы) характерно резкое изменение частоты и фазового угла, что может быть использовано в целях их идентификации [6]. Резкое увеличение фазовой разности между соседними узлами может свидетельствовать о потере синхронизма или переходе генератора в автономный режим работы. Для классификации генерации вводится вектор признаков:

$$Y = \left[P_G, Q_G, \cos\varphi, \Delta\theta, \frac{dP_G}{dt}, \frac{dQ_G}{dt} \right]. \quad (5)$$

Синхронные генераторы (гидро- и тепловые турбины, подключенные через синхронные машины) обладают значительной электромеханической инерцией, что делает их стабильным источником в энергосистеме. К отличительным особенностям относятся небольшие значения df/dt , поскольку генератор физически сопротивляется резким изменениям частоты, а также плавное изменение dP_G/dt .

К инверторной генерации относятся фотоэлектрические установки, ветрогенераторы с полным преобразованием мощности и накопители энергии с инверторами. Эти источники не обладают физической инерцией, а частота и угол напряжения формируются управляющим алгоритмом. Признаками такого типа генерации являются:

- повышенные значения df/dt , в первую очередь в переходных режимах, поскольку инвертор не стабилизирует частоту «механически»;
- резкие изменения мощности, особенно при колебаниях солнечного излучения или скорости ветра;
- возможность неустойчивого фазового угла $\Delta\theta$, прежде всего при слабой связи с синхронной частью сети;
- широкий диапазон регулирования $\cos\varphi$.

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ПАУ

Предлагаемый алгоритм может быть представлен как последовательность этапов, связывающих измерительные признаки с выбором параметров противоаварийного управления. На первом этапе выполняется сбор синхронизированных векторных измерений в контролируемых узлах сети: напряжения, тока, активной и реактивной мощности, фазовых углов, частоты, скорости изменения частоты и гармонического состава тока. На втором этапе проводится предварительная обработка данных, включающая фильтрацию выбросов, проверку достоверности измерений и сопоставление текущего режима с априорными сведениями о составе оборудования узла.

На третьем этапе формируются классификационные признаки нагрузки и генерации. Для нагрузки учитываются коэффициент мощности, знак и величина реактивной мощности, уровень гармонических искажений, динамика изменения активной и реактивной мощности, а также наличие компенсирующих устройств. Для генерации анализируются направление перетока активной мощности, изменение фазового угла, скорость изменения частоты и характер реакции узла на возмущение.

На четвертом этапе выполняется классификация узла:

- узел со статической нагрузкой;
- узел с электродвигательной нагрузкой;
- узел с выраженной нелинейной составляющей;
- узел синхронной генерации;
- узел инверторной генерации;
- смешанный узел.

Результат классификации используется не как окончательное управляющее воздействие, а как входной параметр для логики ПАУ.

На пятом этапе осуществляется адаптация управляющих воздействий. В зависимости от типа узла могут корректироваться объем разгрузки, приоритет отключения присоединений, допустимые уставки по частоте и напряжению, а также необходимость привлечения быстродействующего резерва активной мощности от инверторных источников. Например, для узлов с высокой долей электродвигательной нагрузки приоритет может отдаваться действиям, направленным на восстановление напряжения, а для районов с высокой долей инверторной генерации — мероприятиям, ограничивающим скорость изменения частоты и фазовых углов.

Таким образом, сущность алгоритма состоит в использовании данных СВИ для оперативного уточнения фактического типа узла и последующей корректировки логики ПАУ с учетом ожидаемой реакции этого узла на управляющее воздействие.

Итоговый алгоритм в виде блок-схемы представлен на рисунке 1.

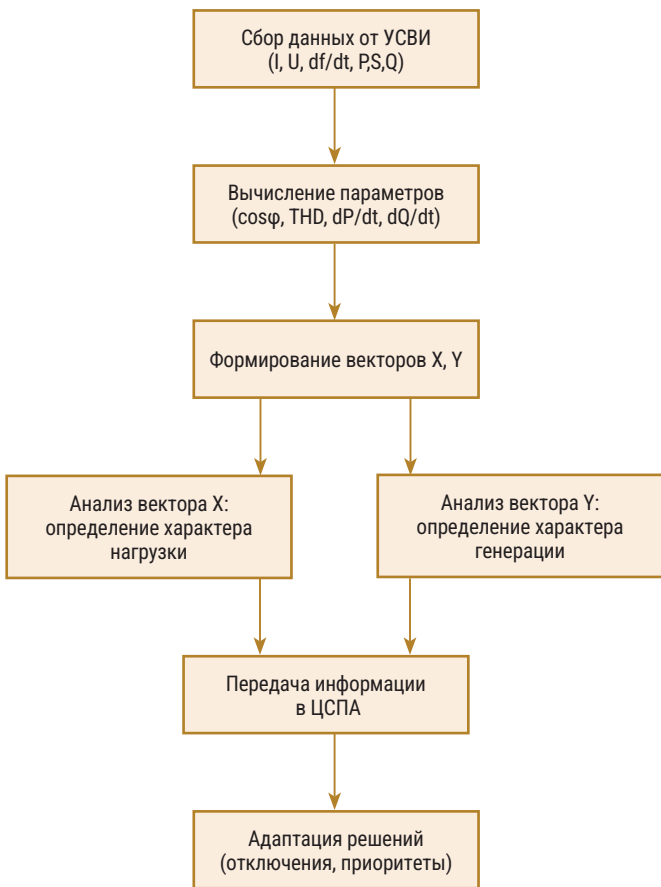


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Дальнейшее развитие предложенного подхода может быть связано с расширением его функциональности за счет интеграции функций виртуальной инерции ВИЭ. В этом случае инверторам СЭС и ВЭС будут автоматически передаваться команды на кратковременное изменение активной мощности (FastFrequency Response, FFR), что позволит не только отключать нагрузку, но и добавлять дополнительную инерцию, удерживая частоту без лишних разгрузок. Дополнением к этому станет предиктивная аналитика на базе моделей машинного обучения, построенных на архивах СВИ [8]: такой модуль сможет заблаговременно оценивать вероятность потери синхронизма либо генерации и переводить алгоритм от реактивного управления к превентивному, заранее корректируя уставки или активируя резервы. Завершающим элементом данной концепции является динамическая оптимизация объема разгрузки. Она предполагает решение задачи минимизации ущерба в реальном времени с учетом нескольких факторов: тарифной значимости потребителей, топологических ограничений электрической сети и ожидаемой реакции источников на основе ВИЭ. Такой подход позволяет формировать управляющие воздействия более адресно, избегая избыточных отключений и обеспечивая экономически обоснованный выбор объема разгрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие и внедрение алгоритмов противоаварийного управления, использующих данные синхронных векторных измерений, можно рассматривать как один из значимых этапов повышения надежности и устойчивости энергосистем. Главное преимущество такого подхода — более точная и достоверная оценка текущего состояния отдельных узлов сети. В отличие от традиционных решений, которые часто опираются на заранее заданные пороги или упрощенные статические модели, рассматриваемый алгоритм анализирует набор параметров в режиме, близком к реальному времени. В их число входят векторные значения напряжения и тока, фазовые соотношения между ними, коэффициент мощности, уровень гармонических искажений, а также изменение частотных характеристик. За счет такого набора признаков появляется возможность как фиксировать отклонения, так и более точно определять характер нагрузки и генерации в конкретном узле энергосистемы. Алгоритм позволяет различать пассивные, активные, инверторные и гибридные объекты, после чего действия систем противоаварийного управления могут корректироваться с учетом фактической ситуации в сети. Это делает управляющие воздействия более своевременными и обоснованными.

Рисунки к статье предоставлены автором.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1.

Мокеев А.В. Повышение надежности и эффективности работы энергосистем на основе технологии синхронизированных векторных измерений // Электричество. 2018. № 3. С. 4–10. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-3-4-10.

2.

Применение технологии синхронизированных векторных измерений для управления, защиты и автоматики / А.В. Мокеев, В.Н. Бовыкин, Е.И. Хромцов, А.В. Миклашевич, А.И. Попов, А.В. Родионов, Д.Н. Ульянов // Релейщик. 2019. № 3 (35). С. 32–37.

3.

Artsishevsky Y. L. Development of the Theory of Vector Measurements Applied in Relay Protection and Automation / Y.L. Artsishevsky, T.G. Klimova, A.I. Rashcheplyaev // Power Technology and Engineering. 2024. Vol. 57. P. 930–939. DOI: 10.1007/s10749-024-01760-8.

4.

Usman M. U. Applications of synchrophasor technologies in power systems / M.U. Usman, M.O. Faruque // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. Vol. 7. P. 211–226. DOI: 10.1007/s40565-018-0455-8.

5.

IEEE Std 519-2022. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.

6.

IEEE Std 2800-2022. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.

7.

Denholm P. Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin / P. Denholm, T. Mai, R.W. Kenyon, B. Kroposki, M. O'Malley. Golden : National Renewable Energy Laboratory, 2020. 48 p. NREL/TP-6A20-73856. DOI: 10.2172/1659820.

8.

Zhang S. A Critical Review of Data-Driven Transient Stability Assessment of Power Systems: Principles, Prospects and Challenges / S. Zhang, Z. Zhu, Y. Li // Energies. 2021. Vol. 14. № 21. Article 7238. DOI: 10.3390/en14217238.



ВАКУУМНЫЕ И ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н.
ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ, 2024. 220 С.

Рассмотрены переходные процессы генераторных, конденсаторных, гибридных выключателей переменного тока в коммутационных и аварийных режимах. Приведены результаты моделирования, управляемой и синхронной коммутации. Описаны методики коммутационных испытаний и испытательные стенды указанных выключателей. Выполнены исследования приводов с использованием полупроводниковых приборов. Сравниваются схемотехника и испытательные стенды выключателей постоянного тока.

Для студентов и специалистов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по курсу «Специальные вопросы электрической части электроустановок».



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н., ЛАБУТИН А.А.
ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ, 2024. 136 С.

Исследованы динамика, особенности и методы испытаний быстроходных электрических машин. Разработан геометрический метод расчета и их моделирования. Предлагаются новые материалы и технологии изготовления электрических машин. Рассмотрены вопросы выбора изоляции, диагностики и испытаний. Предлагаются решения по выбору систем управления электрических машин.

Для студентов по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для слушателей профессиональной переподготовки.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ШУЛЬГА Р.Н., ЛАБУТИН А.А.
ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ, 2024. 156 С.

Исследованы динамика, особенности и методы испытаний быстроходных электрических машин. Разработан геометрический метод расчета и моделирования указанных машин. Предлагаются новые материалы и технологии изготовления электрических машин. Рассмотрены вопросы выбора изоляции, диагностики и испытаний. Предлагаются решения по выбору систем управления электрических машин.

Для студентов по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для слушателей профессиональной переподготовки.