

2. Основы построения промышленных электрических сетей / Г. М. Каялов [и др.]. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.
3. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
4. Праховник, А. В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А. В. Праховник, В. П. Розен, В. В. Дегтярев. – М.: Недра, 1985. – 232 с.
5. Гордеев, В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
6. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 464 с.
7. Багиев, Г. Л. Экономические и организационные вопросы регулирования нагрузки на промышленном предприятии / Г. Л. Багиев, В. В. Шленов // Повышение надежности и качества электро- и теплоснабжения г. Москвы. – М.: МДНТП, 1983. – С. 31–36.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 12.02.2009

УДК 621.311

ЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

Опыт проектирования и сооружения протяженных электропередач, в частности электропередачи 500 кВ Самара – Москва [1], показал, что большие трудности в обеспечении необходимой пропускной способности систем передачи представляла динамическая устойчивость по сравнению со статической устойчивостью. Создание и внедрение в эксплуатацию энергосистем автоматических систем регулирования возбуждения без зоны нечувствительности, применение продольной и поперечной компенсации параметров линий, использование расщепленных проводов в значительной мере смягчили проблему статической устойчивости систем электропередачи. Пропускная способность систем передачи по условиям динамической устойчивости меньше, чем по условиям статической устойчивости [2, 3].

Таким образом, появляется необходимость повышения динамической устойчивости систем электропередачи до уровня их статической устойчивости. Проблема динамической устойчивости для удовлетворительного решения задачи – обеспечения пропускной способности систем передачи – требует применения специальных средств ее повышения.

В соответствии с поставленной задачей построим логическую классификацию средств повышения динамической устойчивости на основе дифференциального уравнения движения ротора, приняв обычные допущения. Не будем учитывать влияние изменения скорости агрегатов на величины

вращающих и тормозных моментов. Примем постоянным вращающий момент первичного двигателя, пренебрежем демпфирующим действием контуров ротора. Динамическую синхронную устойчивость будем рассматривать при полном использовании площадки торможения для наиболее тяжелого случая – трехфазного короткого замыкания в начале линии электропередачи, работающей на шины постоянного напряжения и частоты (рис. 1): 1 – характеристика нормального режима; 2 – то же послеаварийного режима. Пренебрегая активными сопротивлениями и проводимостями системы передачи, полагая, что проводимость линии скомпенсирована, дифференциальное уравнение движения ротора синхронного генератора запишем

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - \frac{EU}{x} \sin \delta, \quad (1)$$

где M – постоянная инерции генераторов передающей станции, отнесенная к номинальной мощности генераторов; δ – угол расхождения вектора ЭДС генераторов передающей станции за переходным сопротивлением и напряжения шин бесконечной мощности; остальные величины указаны на рис. 1.

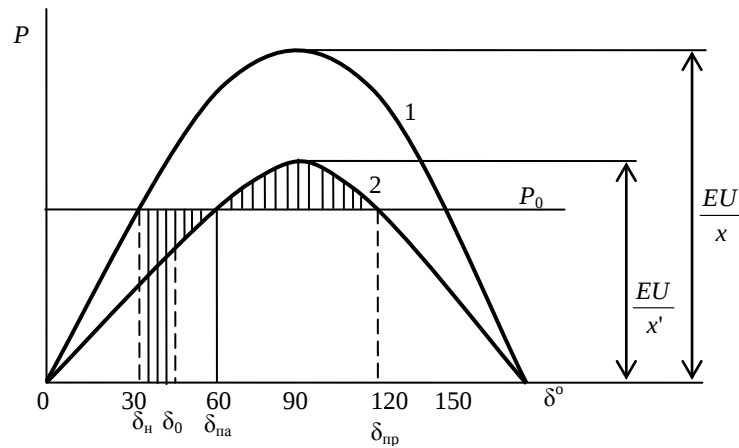


Рис. 1. Нагрузочно-угловые характеристики нормального и послеаварийного режимов системы электропередачи

Для случая трехполюсного короткого замыкания уравнение (1) будет иметь вид

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - \frac{EU}{x'} \sin \delta, \quad (2)$$

где

$$\frac{EU}{x'} \sin \delta = P. \quad (3)$$

Проинтегрируем (2). Пределы интегрирования определяются условиями полного использования площадки торможения (рис. 1), что соответствует приравнению нулю первого интеграла уравнения (2):

$$\int_{\delta_n}^{\delta_0} \frac{EU}{x} \sin \delta_n d\delta + \int_{\sigma_0}^{\delta_{np}} \left(\frac{EU}{x} \sin \delta_n - \frac{EU}{x'} \sin \delta \right) d\delta = 0 \quad (4)$$

или

$$\frac{EU}{x} \sin \delta_n (\delta_0 - \delta_n) + \frac{EU}{x} \sin \sigma_n (\delta_{np} - \delta_0) + \frac{EU}{x'} \cos \delta_{np} - \frac{EU}{x'} \cos \delta = 0, \quad (5)$$

где x и x' – эквивалентные реактивные сопротивления системы электропередачи в нормальном и послеаварийном режимах; δ_n – угол δ в нормальном режиме; δ_0 – угол δ в момент отключения короткого замыкания; δ_{np} – предельный угол отклонения ротора, при котором сохраняется устойчивость.

Если угол отклонения ротора в установившемся послеаварийном режиме $\delta_{па}$, то запишем

$$\delta_{np} = \pi - \delta_{па}.$$

Представим динамически устойчиво передаваемую мощность в долях $\frac{EU}{x}$. Тогда

$$p = \sin \delta_n. \quad (6)$$

Введем понятие относительного эквивалентного реактивного сопротивления послеаварийного режима

$$\chi = \frac{x'}{x},$$

представляющего собой отношение эквивалентного реактивного сопротивления послеаварийного режима к аналогичному сопротивлению нормального режима. Тогда уравнение (5) можно представить в виде

$$\chi(\pi - \delta_{па} - \arcsin p)p - \cos \delta_{па} - \cos \delta_0 = 0. \quad (7)$$

Однако уравнения (7) недостаточно для оценки средств повышения динамической устойчивости. Обратимся еще раз к дифференциальному уравнению (1) и решим его относительно угла отклонения ротора в момент отключения короткого замыкания δ . В случае трехполюсного короткого замыкания в начале линии и пренебрежения активными сопротивлениями активная мощность, выдаваемая генераторами удаленной станции:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0, \quad (8)$$

где P_0 – механическая мощность первичного двигателя.

Проинтегрируем (8) дважды, получим

$$\delta_0 = \delta_i + \frac{P_0 t_0^2}{2M}, \quad (9)$$

где t_0 – время отключения короткого замыкания.

В уравнении (9) t_0 и M выражены в радианах. Если t_0 и M представить в секундах и M отнести к номинальной мощности генераторов, то уравнение (9) примет вид

$$\delta_0 = \delta_n + \frac{\pi f t_0 P}{M P_r},$$

где P_r – номинальная мощность передающей станции.

Используя выражение (6), получим

$$\delta_0 = \arcsin p + \frac{\pi f t_0^2 P}{M P_r}. \quad (10)$$

Для установившихся нормального и послеаварийного режимов при условии неизменности механической мощности первичного двигателя на основании (1) можно записать

$$P_0 = \frac{EU}{X} \sin \delta_0 = \frac{EU}{X'} \sin \delta_{na}.$$

Откуда

$$\sin \delta_{na} = \frac{X'}{X} \sin \delta_n = \chi p. \quad (11)$$

Следовательно, при заданных параметрах электропередачи и генераторов динамически устойчиво передаваемую мощность вполне определяют (7), (10) и (11):

$$\begin{cases} \chi(\pi - \delta_{na} - \arcsin p)P - \cos \delta_{na} - \cos \delta_0 = 0; \\ \delta_0 = \arcsin p + \frac{\pi f t_0^2 P}{M P_r}; \\ \sin \delta_{na} = \chi p. \end{cases}$$

Эти уравнения определяют динамически устойчиво передаваемую мощность. При заданных параметрах электропередачи и генераторов [5, 6] из них наиболее логично и четко следуют средства повышения динамической устойчивости систем электропередачи, которые в соответствии с этими уравнениями указаны на рис. 2. К первой группе отнесены средства повышения динамической устойчивости, обусловленные уменьшением относительного эквивалентного реактивного сопротивления системы передачи послеаварийного режима χ .

Вторая группа средств повышения динамической синхронной устойчивости основывается на уменьшении угла отключения короткого замыкания δ_0 .

Третья группа средств повышения динамической устойчивости объединяет средства, позволяющие регулировать мощности в аварийном режиме.

Уменьшение относительного эквивалентного реактивного сопротивления системы передачи может быть достигнуто применением переключательных пунктов, включением последовательной послеаварийной конденсаторной компенсации и использованием емкостного эффекта линии. Каждое из этих средств может применяться самостоятельно или в совместном сочетании.

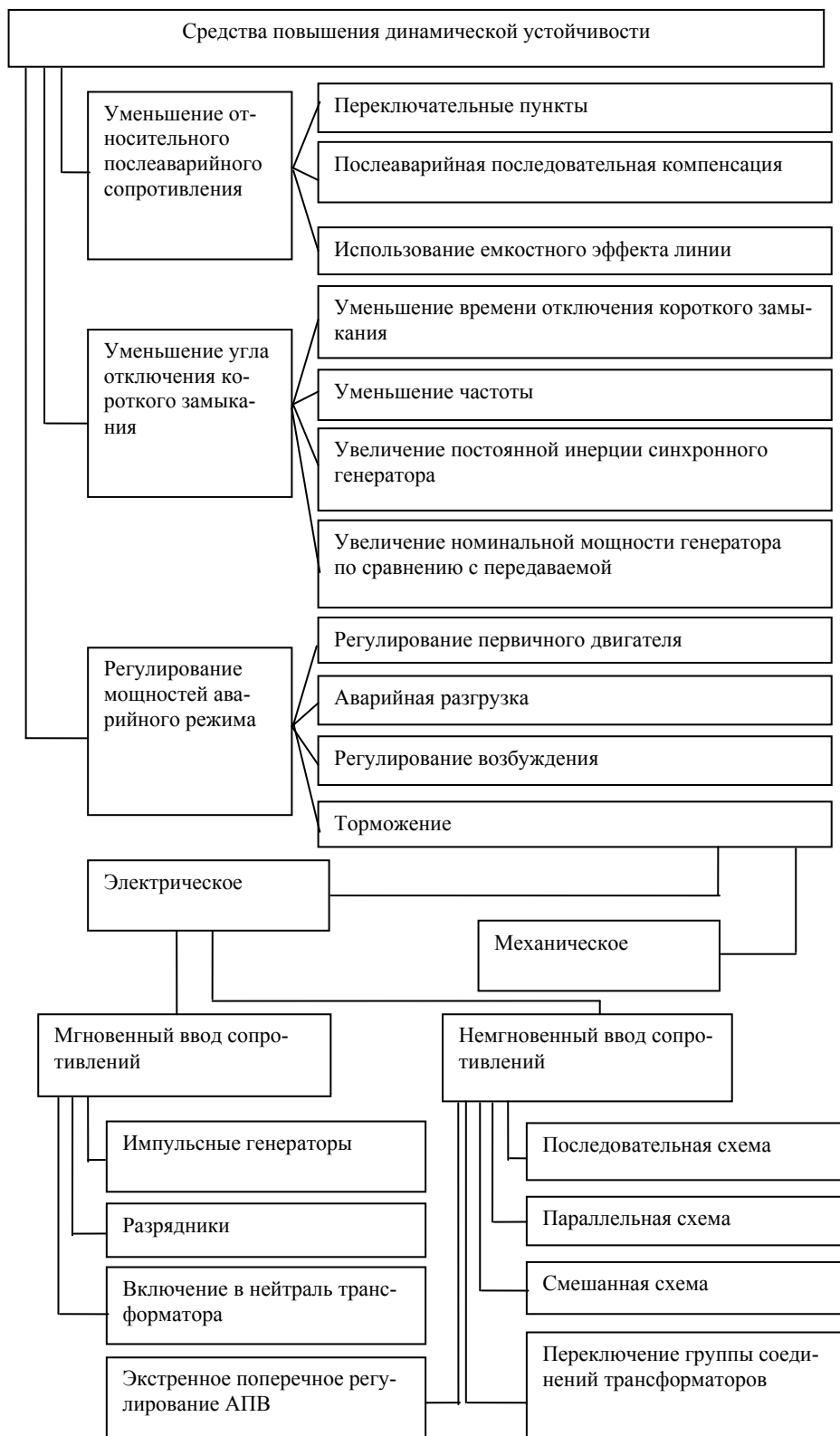


Рис. 2. Классификация средств повышения динамической устойчивости электрических систем

Одна из возможных схем послеаварийной последовательной конденсаторной компенсации показана на рис. 3; конденсаторная установка в нормальном режиме шунтирована выключателем В и вводится в действие при коротком замыкании.

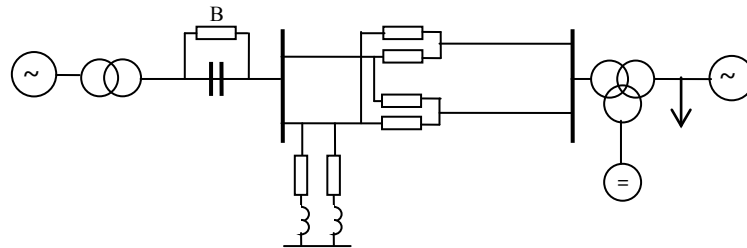


Рис. 3. Система передачи с противоаварийной продольной компенсацией

На основе (7), (10) и (11) может быть определено наибольшее значение угла расхождения векторов ЭДС генератора передающей станции за переходным сопротивлением и вектора напряжения приемных шин, при котором система еще сохраняет динамическую синхронную устойчивость. А по найденному углу можно определить динамически устойчиво передаваемую мощность. Таким путем рассчитаны и построены на рис. 4 зависимости угла δ_n и динамически устойчиво передаваемой мощности P от эквивалентного реактивного сопротивления системы передачи в послеаварийном режиме χ (рис. 3); были приняты обычные параметры генераторов и трансформаторов, время отключения короткого замыкания в начале электропередачи – 0,1 с. Из рис. 4 следует, что динамически устойчиво передаваемая мощность существенно зависит от относительного эквивалентного сопротивления системы передачи в послеаварийном режиме. На величину этого сопротивления может оказывать влияние емкостный эффект линии; уменьшение значения эквивалентного реактивного сопротивления послеаварийного режима χ дает отключение части шунтирующих реакторов в начале линии. Этого также можно достичь, применяя управляемый шунтирующий реактор или статический тиристорный компенсатор (СТК).

Возможность повышения динамической устойчивости за счет уменьшения угла отключения короткого замыкания δ_0 видна из (7), (10), (11) и зависимостей (рис. 5), рассчитанных и построенных по этим уравнениям для трех значений относительного эквивалентного реактивного сопротивления послеаварийного режима χ . Из (10) видно, что уменьшения угла отключения короткого замыкания можно достигнуть снижением времени отключения короткого замыкания t_0 , уменьшения частоты f , увеличения постоянной инерции генераторов M – повышением номинальной мощности генераторов по сравнению с передаваемой. Как и в первой группе, целесообразно применение одновременного сочетания нескольких средств повышения устойчивости. Сравнительная технико-экономическая оценка раз-

личных средств повышения динамической устойчивости системы электропередачи дана в [6].

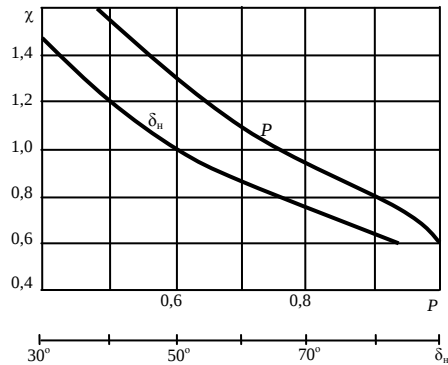


Рис. 4. Зависимости передаваемой мощности и угла нормального режима δ_n от относительного эквивалентного реактивного сопротивления системы передачи

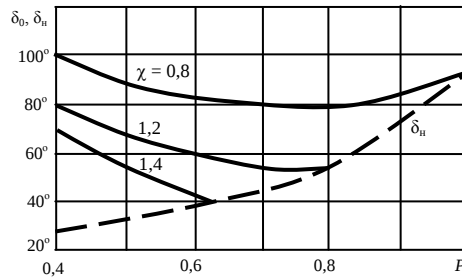


Рис. 5. Зависимости динамической устойчивости передаваемой мощности от угла отключения короткого замыкания для различных значений χ — относительного сопротивления послеаварийного режима системы электропередачи

К третьей группе средств повышения динамической устойчивости относятся средства, позволяющие регулировать мощности в аварийном режиме: аварийная разгрузка, регулирование первичного двигателя и возбуждения генераторов, электрическое и механическое торможение. Эти средства достаточно полно освещены в учебной литературе [2, 7 и др.]. Остановимся на электрическом торможении. В зависимости от способа ввода тормозящего сопротивления следует различать «мгновенное» и «немгновенное» электрическое торможение [2, 7]. Там же описано включение «мгновенного» тормозящего сопротивления в нейтраль трансформатора. К схемам с «мгновенным» включением тормозного сопротивления относятся схемы (рис. 3, 6).

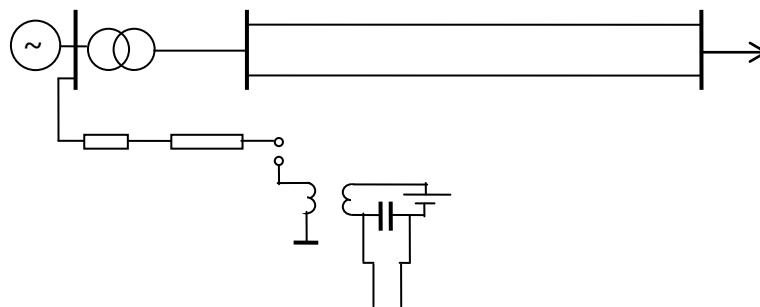


Рис. 6. Схема системы электропередачи с «мгновенным» электрическим торможением генераторов на основе импульсного генератора напряжения

В электропередачах с последовательной конденсаторной компенсацией (рис. 3) активное тормозящее сопротивление включается последовательно с разрядником, защищающим конденсаторную установку и вступающим в действие практически одновременно с началом короткого замыкания; эффективность такой схемы показали исследования [5, 8]. В электропере-

дачах без конденсаторных компенсирующих установок «мгновенное» включение тормозящего активного сопротивления можно осуществить на основе схемы генератора импульсов напряжения (рис. 6). Схема использования для «мгновенного» включения тормозящего сопротивления подробно обследована [9] и показана ее эффективность.

Исследования [2–6 и др.] показали, что за счет применения рассмотренных средств повышения динамическая устойчивость систем передачи может быть доведена до уровня статической устойчивости. При этом отметим, что в западноевропейских и американских нормативах регламентируется необходимость обеспечения устойчивости в расчетных аварийных режимах без применения противоаварийной автоматики [10]. В отечественной практике основу нормативов составляют запасы статической устойчивости. Однако [11] предусматривает регламентацию условий устойчивости в переходных процессах.

ВЫВОДЫ

1. Из системы уравнений (7), (10), (11) следует логическая структура средств повышения динамической устойчивости систем электропередачи. Предложенная согласно этим уравнениям классификация средств повышения динамической устойчивости способствует выявлению их эффективности. Все возможные средства повышения динамической устойчивости согласно этой классификации разделены на три основные группы. К первой группе относятся средства, обусловленные уменьшением относительного эквивалентного реактивного сопротивления систем передачи в послеаварийном режиме. Вторая группа основывается на уменьшении угла отключения короткого замыкания. Третья группа средств повышения динамической устойчивости объединяет средства, позволяющие регулировать мощности в аварийном режиме.

2. В первую группу входят послеаварийная емкостная компенсация, переключательные пункты и использование емкостного эффекта линии передачи. Во вторую группу – уменьшение времени отключения короткого замыкания, увеличение постоянной инерции генераторов, снижение рабочей частоты, повышение номинальной мощности генераторов. В третью группу – регулирование первичного двигателя, аварийная разгрузка, регулирование возбуждения, электрическое и механическое торможение.

3. Средствами, позволяющими повысить динамическую устойчивость системы электропередачи до уровня ее статической устойчивости, являются послеаварийная продольная компенсация и торможение генераторов активным сопротивлением, вступающая в действие почти в момент короткого замыкания.

ЛИТЕРАТУРА

1. О т м е л к и х изолированных электростанций до Единой энергосистемы Европейской части СССР. Дальние электропередачи 750 кВ. – М.: Энергия, 1974. – Ч. I.
2. В е н и к о в, В. А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М.; Л.: ГЭИ, 1968.
3. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.

4. Ф е д о р о в а, И. А. Техничко-экономическое сравнение основных средств повышения динамической устойчивости электропередачи / И. А. Федорова // Труды Института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1955. – Вып. 8. – С. 62–85.
5. П о с п е л о в, Г. Е. О повышении динамической устойчивости дальних электропередач / Г. Е. Поспелов // Электричество. – 1953. – № 6.
6. Ф е д о р о в а, И. А. Эффективность средств повышения динамической устойчивости систем электропередач / И. А. Федорова, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 7.
7. К а л е н т и о н о к, Е. В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008.
8. П о с п е л о в, Г. Е. Некоторые технические вопросы применения последовательной статической компенсации в дальней мощной электропередаче / Г. Е. Поспелов // Труды института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1953. – Вып. 7. – С. 28–69.
9. Г р е х о в, А. В. Повышение динамической устойчивости электрических систем включением нагрузочных сопротивлений / А. В. Грехов // Труды Института энергетики АН Узбекской ССР. – Ташкент, 1958. – Вып. 11. – С. 127–155.
10. К о щ е е в, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошечев, В. А. Шлайфштейн // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 30–38.
11. М е т о д и ч е с к и е указания по устойчивости энергосистем: утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 10.06.2003.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 12.02.2009

УДК 621.317.63

МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Докт. техн. наук БРАНОВИЦКИЙ И. И., МАЦКЕВИЧ П. Д., СКУРТУ И. Т.

Институт прикладной физики НАН Беларуси

По оценкам специалистов, средняя выработка ресурса электроэнергетического оборудования, эксплуатируемого в различных отраслях народного хозяйства Беларуси, как и других стран СНГ, составляет 60–70 % и более. Нарушение нормального режима работы, обусловленного, например, появлением дефектов в магнитопроводах или обмотках изделия, приводит к ухудшению его технических характеристик, а при неконтролируемом развитии событий оборудование может выйти из строя с серьезными последствиями. В такой ситуации первостепенное значение приобретает обеспечение надежной работы указанного оборудования, важнейшим элементом которой является его эффективное диагностирование. Например, на стратегически важных силовых трансформаторах целесообразно использование системы контроля и наблюдения в режиме реального времени [1, 2]. Однако из-за высокой себестоимости такие системы оправданы, как сказано выше, лишь на наиболее ответственном оборудовании. Для диагностирования более широкого класса силовых трансформаторов более реальным является проведение их периодических оперативных испытаний по разработанным методикам в условиях эксплуатации. Создаваемые при