

УДК 621.548.4

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕГУЛИРОВОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ В РЕЖИМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ВЕТРОВОЙ ТУРБИНЫ СРЕДСТВАМИ ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С.Н. Удалов, В.З. Манусов, А.А. Ачитаев

Новосибирский государственный технический университет  
E-mail: ac-an-alec@mail.ru

Необходимость повышения запаса регулировочной способности в режиме ограничения мощности ветроэнергетической установки позволяет создать благоприятные условия эксплуатационной надёжности. Существует два традиционных метода контроля скорости ветроколеса и выходной мощности генератора: контроль скорости с помощью управления углом атаки лопастей и обеспечение регулирования скорости с помощью профиля лопастей со срывом воздушного потока. В настоящее время развиваются иные средства эффективного управления турбиной ветроэнергетической установки, такие как плазменные приводы. В связи с этим использование плазменной технологии для расширения диапазона регулирования ветроэнергетической установки с применением технологии создания поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасти имеет адекватный интерес. С учётом этого необходимо провести математическое моделирование, которое даст представление о величине диапазона регулирования в рассматриваемой модели.

### Ключевые слова:

Ветроэнергетическая установка, плазменный привод, подъёмная сила, моделирование лопасти, метод конечных элементов.

Ветроэнергетика является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей современной энергетики. Разработка новых технических средств и решений в области повышения регулировочной способности ветроэнергетических установок (ВЭУ) имеет широкий интерес. В работе, представленной ранее Лукутиным Б.В., Муравлевым А.И., Шандаровой Е.Б., рассмотрен вопрос перехода ветротурбины в режим ограничения мощности посредством изменения коэффициента использования энергии ветра  $C$  и числа модулей ветродвигателя  $Z$  [1]. Это связано с повышением требований, предъявляемых к установкам. Важно отметить, что необходимость повышения регулировочной способности ВЭУ определяет её эксплуатационную надёжность. На рис. 1 изображён график, иллюстрирующий поведение подъёмной силы в условиях изменения аэродинамических свойств лопасти ВЭУ. На рис. 2 приведена зависимость, при которой наблюдается отличие в запасе по регулировочной способности ВЭУ при изменении угла атаки лопасти в сравнении основного режима с режимом повышения запаса регулирования.

Одним из технических направлений, которое имеет экспериментальное подтверждение возможности повышения регулировочной способности турбины ВЭУ, является технология плазменного привода, основанная на применении ионизации воздуха на поверхности лопасти. Поверхностные нетермические плазменные приводы создают электрическое поле между двумя электродами, анодом и катодом. При подаче большой разницы напряжений между электродами формируется электрическое поле и индуцируется электрический ветер или ионический ветер близко к поверхности. Электрический ветер формируется столкновением между дрейфующими ионами и нейтральными частица-

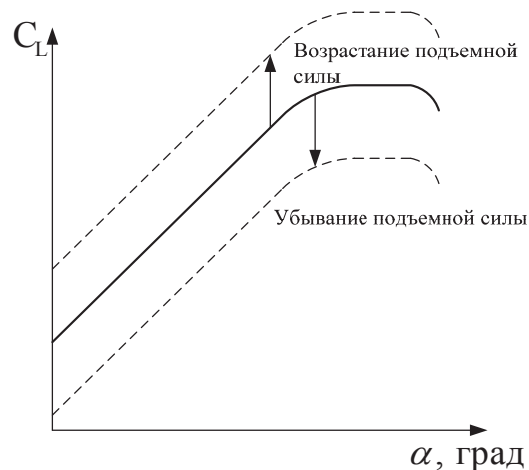


Рис. 1. График зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки в условиях изменения структуры аэродинамики лопасти

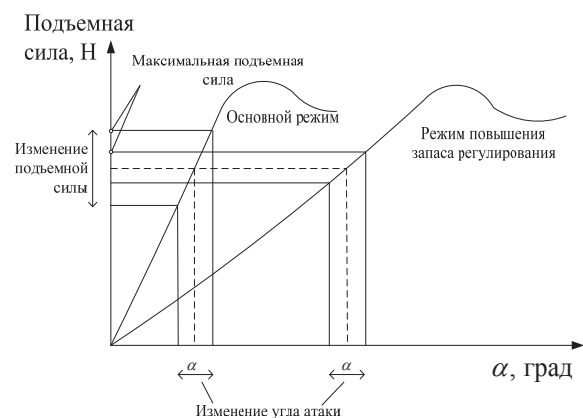


Рис. 2. График зависимости подъемной силы от угла атаки в условиях повышения регулировочной способности

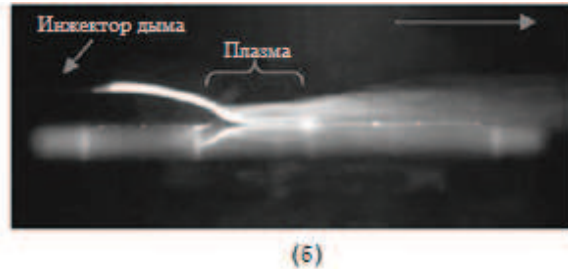
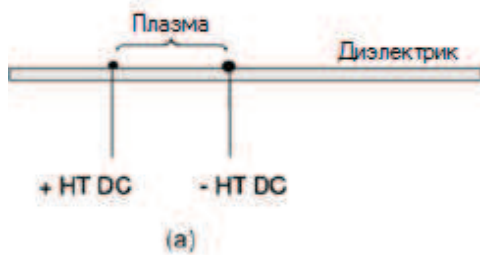


Рис. 3. Плазменный привод: а) схема расположения привода коронного разряда постоянного тока на поверхности лопасти; б) 2D визуализация управляемого воздушного потока вдоль плоской пластины

ми в области межэлектродного пространства. Индуцированный ветер действует как массовая сила и возбуждает ближайшую среду, создавая струю с потоком массы нулевой свободности, модифицируя пограничный слой потока воздуха вдоль профиля. На сегодняшний день существует много различных конфигураций, которые классифицируются как плазменные приводы. Это четыре вида плазменных приводов: 1) поверхностный коронный разряд постоянного тока, 2) поверхностный диэлектрический барьерный разряд переменного тока, 3) скользящий разряд и 4) граничная струя. Характеристики этих устройств более подробно описали E. Moreau, N. Benard, M. Jolibois и G. Touchard [2].

В работе рассматривается первый вариант устройства. Привод поверхностного коронного разряда постоянного тока состоит из двух широких электродов, установленных ровно на поверхности диэлектрического профиля (рис. 3, а). Когда прикладывается высокое напряжение постоянного тока (>10 кВ), формируется корона вокруг проводника небольшого диаметра (обычно анода) и создаётся электрический ветер тангенциально к поверхности между двумя электродами. Электрический ветер способен изменить пограничный слой воздушного потока профиля. Рис. 3, б демонстрирует визуализацию низкоскоростного воздушного потока вдоль плоской пластинки. Если привод выключен, дым остаётся вертикальным. Когда привод активен, поток выше анода захватывается по направлению к поверхности от наружного слоя, вызывая притяжение дыма к поверхности и затем ускоряясь в область разряда. Преимущество этого устройства в том, что оно требует простого электроснабжения, однако дизайн ограничивается скоростью электрического ветра.

На рис. 4 показано сечение аэродинамического профиля. При обтекании профиля потоком на него действует аэродинамическая сила, которую можно разделить на две составляющие: подъёмную и силу сопротивления. Подъёмная сила действует на профиль перпендикулярно направлению скорости натекания потока  $v$ . Сила сопротивления совпадает с направлением вектора скорости натекающего потока. Эти силы обозначаются  $F_L$  и  $F_D$  соответственно. Угол между направлением скорости натекающего потока и хордой профиля называется углом атаки  $\alpha$ .

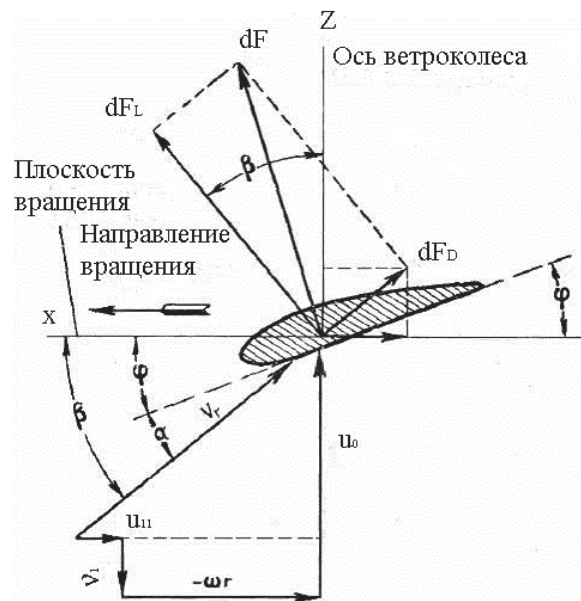


Рис. 4. Векторная диаграмма сил и скоростей воздушного потока при набегаии его на элемент лопасти

Рассматриваемые давления соотносятся со значением динамического давления, поэтому можно выделить коэффициент пропорциональности  $C_L$  (коэффициент подъёмной силы) [3]:

$$P_L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха  $1,223 \text{ кг/м}^3$ ;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $C_L$  – коэффициент подъёмной силы.

Средствами программного пакета ElCut был представлен расчёт влияния поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасть ВЭУ [4].

На рис. 5 изображён результат расчёта электростатического поля, по которому видна область высокой концентрации силовых линий, сосредоточенная на поверхности, вызывающая коронный разряд.

Ионизированный газ создаёт дополнительное давление и в свою очередь оказывает влияние на подъёмную силу. Разница создаваемого давления между воздухом и ионизированным газом описывается уравнением идеального газа Менделеева-Клапейрона:

$$\Delta p = RT \left( \frac{\rho_1}{\mu_1} - \frac{\rho_2}{\mu_2} \right), \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К);  $\mu_1, \mu_2$  – молярные массы воздуха и озона соответственно;  $T$  – температура воздуха, К;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности воздуха и озона соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Расчёт механических деформаций проведён в пакете ElCut. На рис. 6 представлен результат полевого расчёта механических деформаций, оказывающих влияние на лопасть при взаимодействии с ветропотокком.

На рис. 7 изображены результаты расчётов зависимости подъёмной силы лопасти от угла атаки,

где проиллюстрирован эффект повышения регулировочной способности подъёмной силы лопасти ВЭУ при использовании поверхностного коронного разряда постоянного тока по его поверхности.

### Выводы

Была создана математическая модель коронного разряда по выявлению влияния на подъёмную силу лопасти, имеющая экспериментальные подтверждения, проведённые в США. На основании математической модели применение поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасти ВЭУ позволит увеличить по сравнению с обычным вариантом запас регулирования по изменению угла атаки, что обеспечивает надёжность

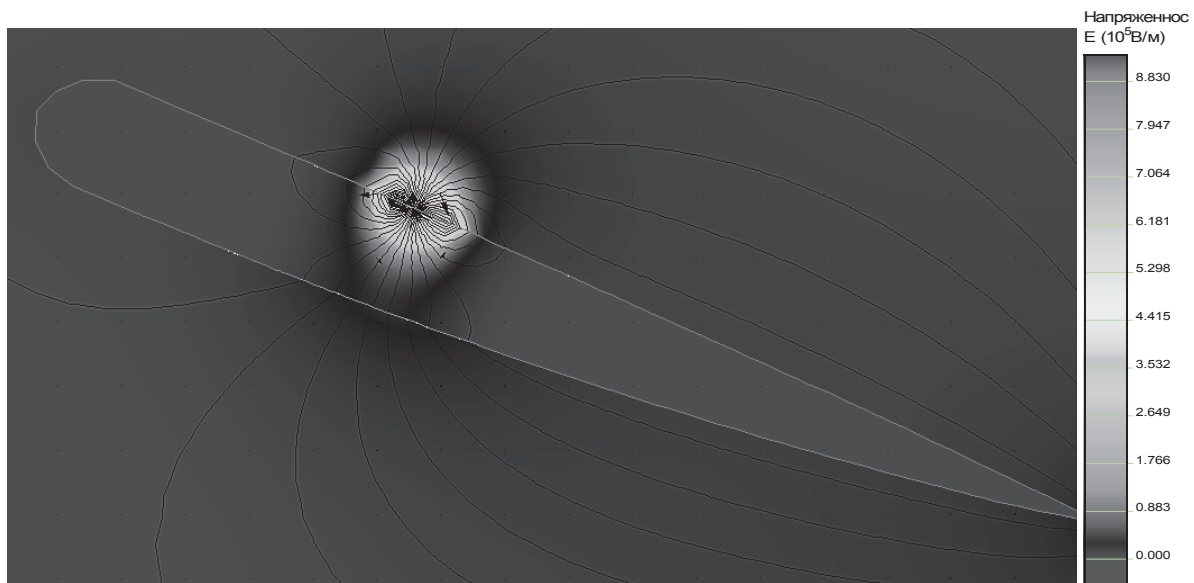


Рис. 5. Результат расчёта распределения напряжённости электрического поля по поверхности лопасти при действии поверхностного коронного разряда постоянного тока

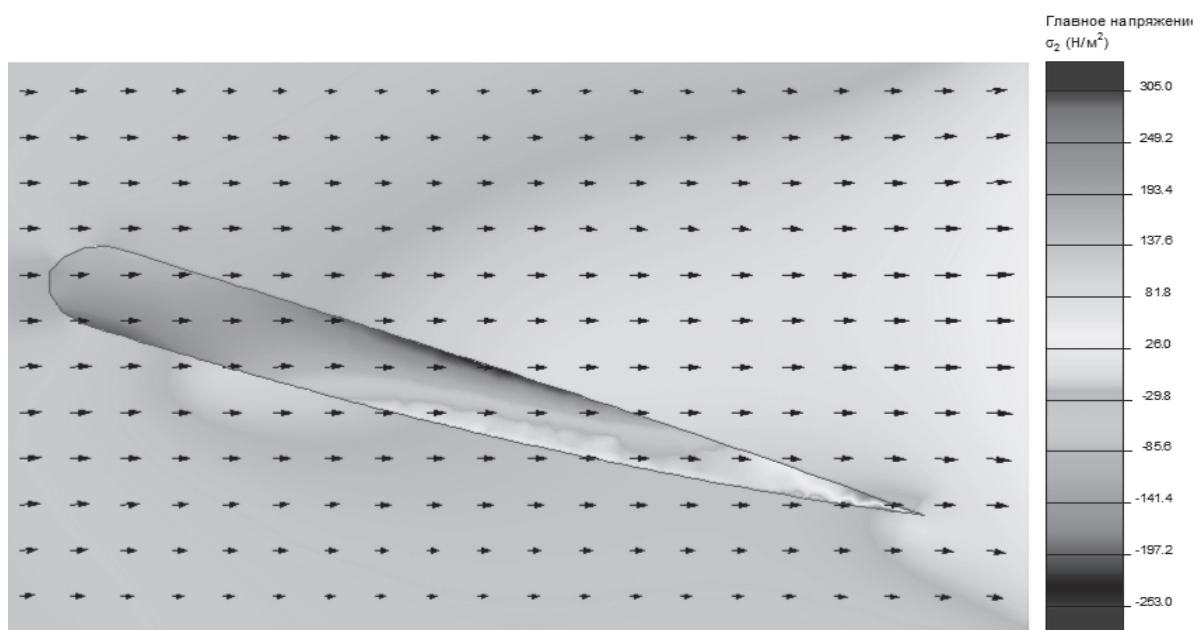


Рис. 6. Результат расчёта распределения механической напряжённости

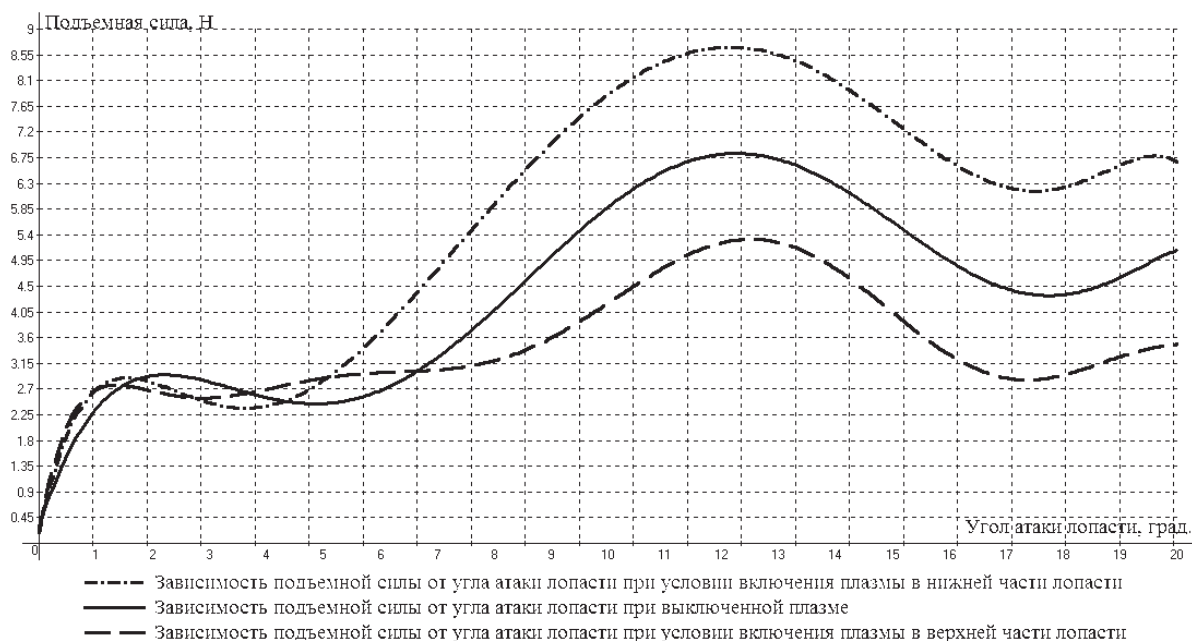


Рис. 7. Сравнительная характеристика зависимости подъемной силы лопасти ВЭУ от угла атаки

функционирования ветроэнергетической установки в условиях повышенных ветровых нагрузок. При работе ВЭУ в режиме ограничения мощности наличие плазменного привода позволит добиться

неизменности угла атаки. В режиме набора мощности технология коронного разряда позволит обеспечить выход на номинальную мощность ВЭУ за меньшее время.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лукутин Б.В., Муравлев А.И., Шандарова Е.Б. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 128–130.
2. Scott J. Johnson, C.P. van Dam, D.E. Berg. Active Load Control Techniques for Wind Turbines // Sandia Corporation, a Lockheed Martin Company, report SAND2008-4809, 2008. – P. 125–140.

3. Альдо В. да Роза. Возобновляемые источники энергии физико-технические основы. – М.: Изд. дом «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
4. Официальный сайт программы ElCut. URL: <http://www.el-cut.ru> (дата обращения: 05.01.2013).

Поступила 16.01.2013 г.

UDC 621.548.4

**THE TECHNIQUE FOR INCREASING LIFT FORCE CONTROL CAPACITANCE UNDER WIND TURBINE POWER LIMITING CONDITIONS BY PLASMA TECHNOLOGY**

S.N. Udalov, V.Z. Manusov, A.A. Achitaev

Novosibirsk State Technical University

*The need to increase the control capacitance margin under wind turbine power limiting conditions allows developing favorable conditions of operational reliability. There are two traditional methods of controlling windwheel and generator output capacity: speed control by adjusting blade angle of attack and by blade profile with airflow breakdown. Currently such means of efficient control of wind turbine as plasma drives are developed. The use of plasma technology for extending the range of controlling the wind turbine applying the technique of developing surface dc corona discharge on a blade is of appropriate interest. Taking into account this fact it is necessary to carry out the mathematical modeling which gives an idea of the controlling range value of the studied model.*

**Key words:**

Wind turbine, plasma drive, lift force, blade simulation, finite elements method.

## REFERENCES

1. Lukutin B.V., Muravlev A.I., Shandarova E.B. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university*, 2008. 312, 4, pp. 128–130.
5. Scott J. Johnson, C.P. van Dam, D.E. Berg. Active Load Control Techniques for Wind Turbines. *Sandia Corporation, a Lockheed Martin Company, report SAND2008-4809*, 2008. pp. 125–140.
6. Aldo V. da Roza. *Vozobnovlyayemye istochniki energii. Fiziko-tekhnicheskie osnovy* (Renewable energy sources. Physicotechnical bases). Moscow, Intellect, 2010. 704 p.
7. *ElCut*. Available at: <http://www.elcut.ru> (accessed 05 January 2013).

УДК 621.31:658.58

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОГО МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕГО РАБОТЫ

Н.И. Хорошев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
E-mail: horoshev@msa.pstu.ru

*От надёжности работы оборудования и сетей в целом зависит бесперебойность и качество обеспечения потребителей электрической энергией, безопасность производственных процессов и их эффективность. Одними из наиболее ответственных узлов систем электроснабжения являются силовые маслонаполненные трансформаторы средней мощности. По этой причине в статье рассмотрены аспекты оценки технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования без его отключения на основе формализации ключевых диагностических параметров (признаков), характеризующих работу оборудования. Показана необходимость учета параметра, отражающего динамику термического износа изоляции трансформаторов на основе интегральной математической функции. Предложены механизм оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов средней мощности и модель поддержки принятия решений, которые положены в основу построения стратегии эффективного обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию. Установлено, что применение предложенного в статье подхода позволяет повысить эффективность принимаемых в производстве решений.*

**Ключевые слова:**

*Электротехническое оборудование, техническое состояние, диагностическая функция, поддержка принятия решений.*

Высоковольтное силовое электротехническое оборудование (ЭО) представляет собой ответственные звенья систем электроснабжения, от надёжности работы которых зависит бесперебойность электроснабжения потребителей, безопасность производственных процессов и их энергетическая эффективность. При этом важным аспектом является необходимость оценки технического состояния (ТС) оборудования без его отключения от питающей сети и формирования перечня профилактических работ согласно складывающейся ситуации, обеспечивающих снижение денежных, трудовых и материальных затрат предприятия [1–3].

Основными характерными свойствами процессов эксплуатации ЭО, которые необходимо учитывать при выработке обоснованных управляющих воздействий как со стороны автоматики, так и со стороны человека (человеко-машинных систем), является их разнородность, взаимозависимость, многопараметричность, иерархичность, а также территориальная распределённость.

Следует отметить, что одним из значимых направлений при формировании стратегии обслуживания ЭО по фактическому техническому состоянию [2] является задача проработки механизма параметрической оценки его ТС с учётом основных свойств процессов эксплуатации и накопленной базы знаний, позволяющей учесть опыт человека

на уровне принятия решений. Рассматриваемая задача обуславливает необходимость построения системы поддержки принятия оперативных управленческих решений (СППР), которая позволит определять моменты времени проведения диагностики, технического обслуживания (ТО) или ремонтов оборудования на основе непрерывно поступающей или дискретной информации о его ТС при различных режимах работы [4].

В качестве объекта исследования в статье рассматривались процессы эксплуатации высоковольтных силовых маслонаполненных трансформаторов (СМТ) класса напряжения 35/6 кВ. При этом методы исследований базировались на использовании положений теории надёжности, теории оптимизации, а также методов математического моделирования.

Трансформатор высокого напряжения с масло-содержащей изоляцией состоит из большого числа конструктивных элементов, основными из которых являются: магнитная система (магнитопровод), обмотки, выводы обмоток, изоляция, бак, охлаждающее устройство, механизм регулирования напряжения, различные защитные и измерительные устройства. Каждый трансформатор в зависимости от его исполнения комплектуется необходимыми устройствами контроля, защиты и охлаждения [5–7], техническое состояние которых необходимо