

---

УДК 621.019

**Э. М. Фархадзаде**, д-р техн. наук,  
**А. З. Мурадалиев, Т. К. Рафиева**, кандидаты техн. наук,  
**С. М. Исмаилова**, аспирантка  
Азербайджанский научно-исследовательский  
и проектно-изыскательский ин-т энергетики  
(Азербайджанская Республика, Az 1012 Баку, пр. Зардаби, 94,  
тел (+99412) 431-64-07, E-mail: fem1939@rambler.ru)

## **Технология компьютерной оценки показателей долговечности трансформаторов электроэнергетических систем в автоматизированных информационных системах**

Рассмотрена технология компьютерной оценки показателей долговечности трансформаторов энергосистемы. Разработан метод оценки предельно-допустимых значений скорости изменения диагностических показателей по заданным разновидностям признаков, характеризующих индивидуальность трансформатора.

Розглянуто технологію комп'ютерної оцінки показників довговічності трансформаторів енергосистеми. Розроблено метод оцінки гранично-припустимих значень швидкості змінювання діагностичних показників по заданим різновидностям ознак, що характеризують індивідуальність трансформатора.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* *техническое состояние, долговечность, диагностические показатели, разновидности признаков.*

Совершенствование системы информационного обеспечения персонала, ответственного за организацию технического обслуживания и ремонта основного оборудования энергосистем становится все более актуальным и значимым. Это, прежде всего, объясняется систематическим старением оборудования, превышением для значительной его части нормативного срока службы вследствие недостатка финансовых средств для своевременной замены. Принятие решения о замене оборудования, проведении капитального ремонта (КР) и модернизации, снижении нагрузки и изменении режима работы требует привлечения систематизированных и обработанных ретроспективных данных о нерабочих, в том числе аварийных, состояниях, сведений об испытаниях и восстановлении износа, условиях эксплуатации и внешних факторах, непрерывно и дискретно воздействующих на оборудование, увеличивая его износ.

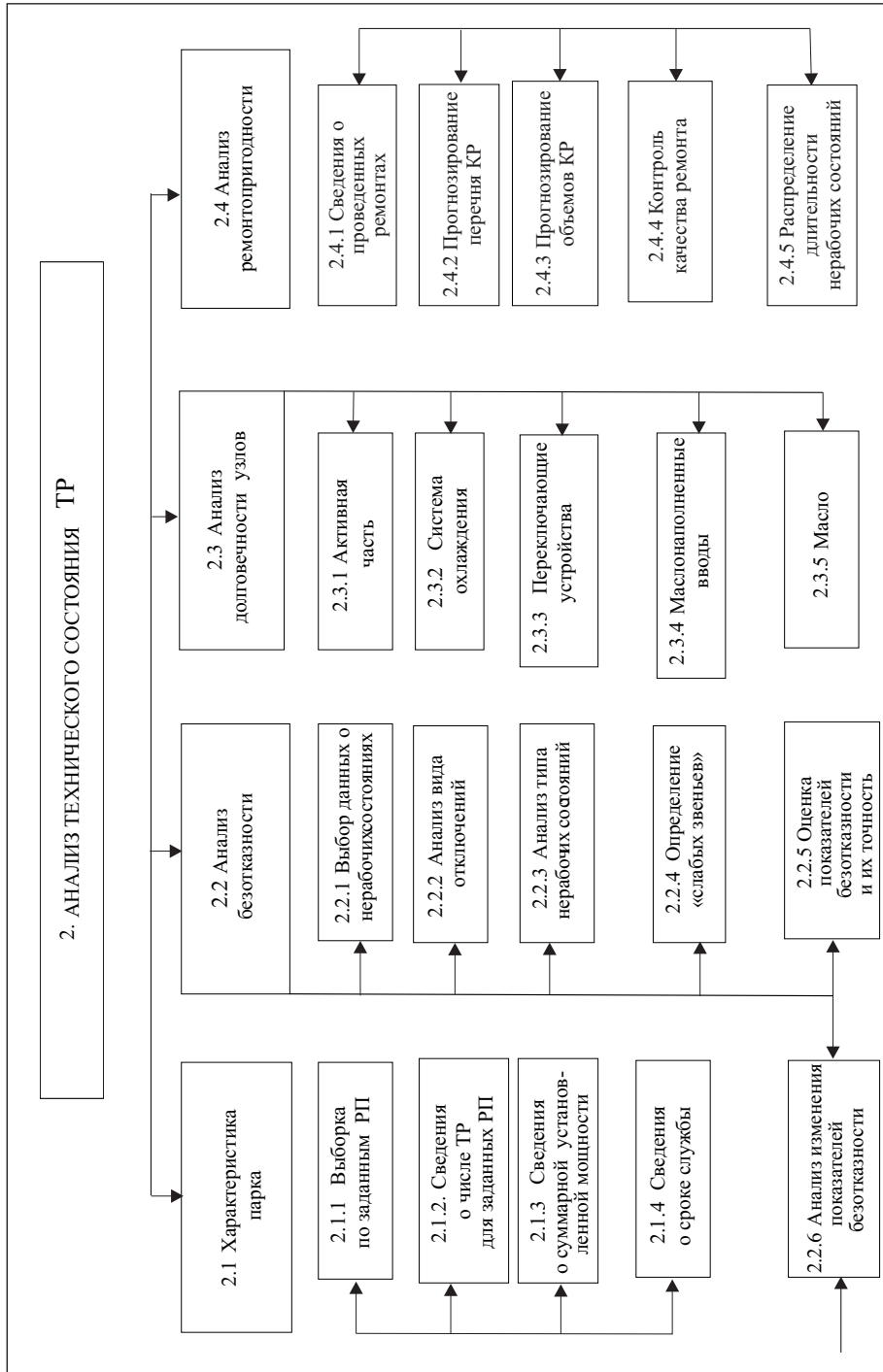


Рис.1

**Постановка задачи.** Подготовку множества данных требуется выполнить оперативно и безошибочно. Одним из основных типов оборудования энергосистем являются силовые трансформаторы и автотрансформаторы (далее — трансформаторы (ТР)). Проблеме повышения достоверности анализа технического состояния ТР посвящены многочисленные публикации, свидетельствующие о высокой эффективности автоматизированных информационных систем (АИС) анализа технического состояния ТР [1]. Разработанная система АИС ТР первоначально развивалась как подсистема АИС для энергоблоков ТЭС [2], а в дальнейшем стала самостоятельной АИС ТР энергосистемы. Укрупненная блок-схема алгоритма функционирования этой АИС может быть представлена тремя блоками: база данных, анализ технического состояния и методическое обеспечение персонала современной нормативно-технической документацией по организации технического обслуживания и ремонта ТР.

Основные особенности АИС ТР следующие:

1. Применение разработанных и апробированных методов [2]:

- расчет точечных оценок показателей безотказности и оценок закономерностей изменения этих показателей для заданных разновидностей признаков (РП) с учетом случайного характера этих оценок;
- расчет показателей долговечности ТР по данным измерения диагностических показателей;
- прогнозирование целесообразности выполнения КР ТР в условиях дефицита финансовых средств путем ранжирования ТР по интегральному показателю, отражающему значимость воздействующих на износ факторов, техническое состояние ТР и значимость последствий аварийного отключения ТР;
- защита базы данных от ошибок при вводе данных, их корректировке и воздействии внешних факторов.

2. При анализе технического состояния ТР предоставление персоналу «истории жизни» ТР в течение наработки после КР, включающей, наряду с техническими данными и паспортом условий эксплуатации, сведения о нерабочих состояниях, о выявленных при осмотрах и испытаниях дефектах, данные об объеме восстановления износа.

3. Возможность оперативного обращения к современной нормативно-технической документации по организации технического обслуживания и ремонта ТР, подтверждающей целесообразность рекомендаций АИС ТР.

На рис. 1 приведена укрупненная блок-схема алгоритма анализа технического состояния ТР, демонстрирующая возможности АИС ТР. Рассмотрим технологию компьютерной оценки показателей долговечности ТР и некоторые результаты расчетов.

**Показатели долговечности. Метод оценки.** В [3] указаны следующие показатели долговечности: гамма-процентный ресурс, средний ресурс, назначенный ресурс и средний срок службы. В основе определения этих показателей находится понятие ресурса как наработки от начала эксплуатации до наступления предельного состояния. В работе [4] упомянуто об отсутствии экспериментальных статистических оценок показателей долговечности и обоснованных методов их расчета.

Анализ возможности контроля технического состояния ТР по данным измерения диагностических показателей (ДП) позволил сделать следующие заключения:

- 1) число ДП велико, они имеют, как правило, различную размерность и характеризуют различные свойства элементов ТР;
- 2) соответствие предъявляемых требований к одному и тому же свойству материалов элементов может контролироваться несколькими ДП;
- 3) различная размерность ДП не позволяет сопоставить степень ухудшения отдельных свойств элементов оборудования, оценить значимость ДП;
- 4) сравнение ДП с нормированными предельно-допустимыми значениями позволяет выявить дефекты, которые случайно не привели к отказу оборудования, а их наличие свидетельствует, прежде всего, о несовершенстве методологии планирования объема ремонтных работ на ТР.

Повышение эффективности контроля технического состояния может быть достигнуто переходом от системы контроля возможного превышения ДП допустимых значений к системе количественной оценки показателей долговечности, позволяющих ответить на вопрос, насколько полно соответствует техническое состояние электрооборудования предъявляемым требованиям.

В работе [5] предложены следующие показатели:

И з н о с. Количественно оценивается по формуле

$$I_z(t) = \frac{P(t) - P_0}{P_{пр} - P_0}, \quad (1)$$

где  $P(t)$ ,  $P_0$  и  $P_{пр}$  — соответственно текущее, исходное и предельно-допустимое значения диагностического параметра.

Поскольку  $P(t)$ , характеризует одно из свойств материала узлов оборудования, физически  $I_z(t)$ , следует рассматривать как степень расхода резервных возможностей. Большим преимуществом показателя  $I_z^*(t)$  является возможность сопоставления изменения различных свойств материала (электрических, тепловых, механических и др.). Величина  $I_z^*(t)$  отличается от относительного значения диагностического параметра  $\delta P(t) = P(t)/P_{пр}$ .

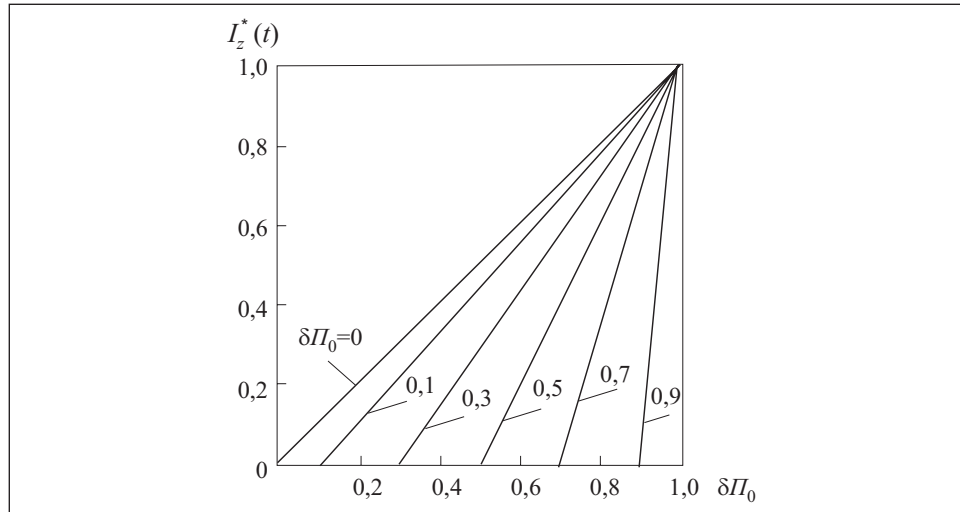


Рис. 2

На рис. 2 приведены зависимости  $I_z^*(t) = f(\delta\Pi_0)$ , где  $\delta\Pi_0 = \Pi_0 / \Pi_{\text{пр}}$ . Как следует из рис. 2, чем больше значение  $\delta\Pi_0$ , тем больше отличие значения  $\delta\Pi(t)$  от  $I_z^*(\Pi, t)$ . Например, при исходном значении влагосодержания трансформаторного масла  $\Pi_0 = 20\%$ , предельном значении  $\Pi_{\text{пр}} = 30\%$  и текущем значении  $\Pi(t) = 28\%$  будет  $\delta\Pi(t) = 0,933$ , а  $I_z^*(\Pi(t)) = 0,80$ , остаточный ресурс соответственно  $(1 - 0,933) = 0,067$  и  $\text{Re}(\Pi(t)) = 1 - I_z(\Pi(t)) = 0,2$ , или  $20\%$ . Расхождение в оценках остаточного ресурса составляет приблизительно  $67\%$ . Величина  $\text{Re}(\Pi(t))$  характеризует степень использования вложенных резервов, компенсирующих естественный износ материала узлов ТР в процессе эксплуатации.

Согласно [6] контроль соответствия технического состояния электрооборудования предъявляемым требованиям проводится одним из следующих способов:

- сравнением результатов измерения ДП  $\Pi(t)$  с нормированным предельно-допустимым его значением  $\Pi_{\text{пр}}$ ;

- сравнением относительного изменения ДП  $\delta\Pi(t)$  с нормированным предельно-допустимым изменением  $\delta\Pi_{\text{пр}}$ ;

- сравнением с результатами измерения одноименного ДП на одноименных узлах оборудования.

Следует заметить, что величина ДП относительно исходного значения по мере увеличения срока службы может монотонно возрастать или уменьшаться. Например, сопротивление изоляции обмоток ТР со временем уменьшается, а сопротивление обмоток постоянному току возрастает. Простые

вычисления свидетельствуют об универсальности формулы (1) и независимости величины  $Iz^*(\Pi, t)$  как от способа контроля соответствия технического состояния оборудования предъявляемым требованиям, так и от характера изменения ДП.

Для уточнения технического состояния ТР в АИС ТР учтена качественная классификация соотношения текущего и предельно-допустимого значения ДП. Так, при физико-химическом анализе трансформаторного масла введено понятие «зоны риска», а влагосодержание твердой изоляции ТР рекомендуется оценивать по четырем уровням: сухой, нормальный, увлажненный и влажный [6]. В случаях, когда экспериментально обоснованная классификация измеряемых значений ДП отсутствует, рекомендуется (на основе анализа существующих дискретных значений степеней различия ДП) считать состояние оцениваемого свойства при изменении величины износа  $Iz(\Pi, t)$  в интервале  $[0; 0,2]$  хорошим, в интервале  $[0,2; 0,8]$  — удовлетворительным, в интервале  $[0,8; 1,0]$  — находящимся в зоне риска, а при  $Iz(\Pi, t) > 0,1$  — неудовлетворительным.

Остаточная наработка до отказа вычисляется по формуле

$$\Delta T(\Pi) = \frac{[1 - Iz(\Pi, t)]}{\vartheta [Iz(\Pi, t)]},$$

где  $\vartheta [Iz(\Pi, t)]$  — скорость изменения износа,

$$\vartheta [Iz(\Pi, t)] = \left| \frac{Iz(\Pi, t_2) - Iz(\Pi, t_1)}{t_2 - t_1} \right| = \frac{\Delta Iz(\Pi, t)}{t_2 - t_1}. \quad (2)$$

В (2) учтена возможность монотонного уменьшения  $\Pi(t)$  при возрастании  $t$ . Величина  $\vartheta [Iz(\Pi, t)]$  зависит от множества равнозначных факторов и может рассматриваться как случайная величина, что позволяет существенно упростить задачу анализа скорости изменения износа и оценку его предельно-допустимого значения.

Среднее значение  $r$  реализаций  $\vartheta_i [Iz(\Pi, t)]$ ,  $i = 1, r$ , вычисляем по формуле

$$M^* \{ \vartheta [Iz(\Pi, t)] \} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \vartheta_i [Iz(\Pi, t)] = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{Iz(\Pi, t_2) - Iz(\Pi, t_1)}{(t_{2,i} - t_{1,i})}. \quad (3)$$

Верхнее граничное значение доверительного интервала  $\bar{\vartheta} [Iz(\Pi, t)]$  в предположении о соответствии функции распределения  $F \{ \vartheta [Iz(\Pi, t)] \}$  нормальному закону может быть вычислено по известной формуле

$$\bar{\vartheta}^* [Iz(\Pi, t)] = M^* \{ \vartheta [Iz(\Pi, t)] \} + t_{R,(r-1)} \frac{\sigma^* \{ \vartheta [Iz(\Pi, t)] \}}{\sqrt{r}}, \quad (4)$$

где оценка среднего квадратического отклонения имеет вид

$$\sigma^* \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r \{ \vartheta_i [Iz (\Pi, t)] - M^* \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \} \}^2}{r-1}}. \quad (5)$$

Расчеты по формулам (2)—(5) выполняем в предположении, что на интервале изменения износа  $[0, 1]$  скорость этого изменения, будучи подвержена флуктуациям в среднем постоянна, а в интервале  $(t_2 - t_1)$  объект исследования находится в рабочем состоянии, т.е. не отключен, где  $t_1$  и  $t_2$  — смежные моменты испытания.

Поскольку предельное значение ДП предшествует процессу критического износа, когда скорость износа нелинейно возрастает, первое предположение объективно. Однако второе предположение не всегда выполняется. В частности, блочные ТР простаивают при нерабочих состояниях энергоблоков (аварийные или плановые ремонты, резерв и др.). В большей части нерабочих состояний ТР проводится определенное восстановление износа, что может сказаться на точности оценки скорости изменения ДП. Поэтому необходимо использовать в формуле (2) лишь такие значения  $Iz (\Pi, t)$ , для которых ТР в интервале  $(t_2 - t_1)$  находился в рабочем состоянии.

Предположение о соответствии распределения  $F \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \}$  нормальному закону также не всегда объективно, так как закономерность изменения  $F \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \}$  зависит от значимости определяющих изменение износа факторов.

Рассмотрим разработанный метод и алгоритм расчета предельных значений скорости изменения ДП. Предельное значение ДП определяется как квантиль распределения  $F \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \}$ , соответствующий вероятности  $R = 0,95(0,9)$ . Поскольку истинный тип распределения  $F \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \}$  неизвестен, величина  $\bar{\vartheta} [Iz (\Pi, t)]$  вычисляется по статистической функции распределения  $F^* \{ \vartheta [Iz (\Pi, t)] \}$ . Однако для ТР, техническое состояние которого анализируется, построить эту функцию практически невозможно. Число реализаций скорости изменения ДП в лучшем случае не превышает пяти. Если использовать данные о  $\vartheta [Iz (\Pi, t)]$  для всех ТР энергосистемы (в математической статистике эти данные названы конечной совокупностью (КС)), то, учитывая зависимость изменения ДП от значимости ряда факторов, расчетное значение  $\bar{\vartheta}^* [Iz (\Pi, t)]$  может отражать техническое состояние как надежных ТР, так и ТР, техническое состояние которых не удовлетворяет предъявляемым требованиям. В обоих случаях погрешность расчета недопустима.

Предлагаемый метод сводится к классификации КС данных о реализациях скорости изменения ДП  $\{ \vartheta_i [Iz (\Pi_j, t)] \}$ ,  $i=1, M$  (где  $M$  — число

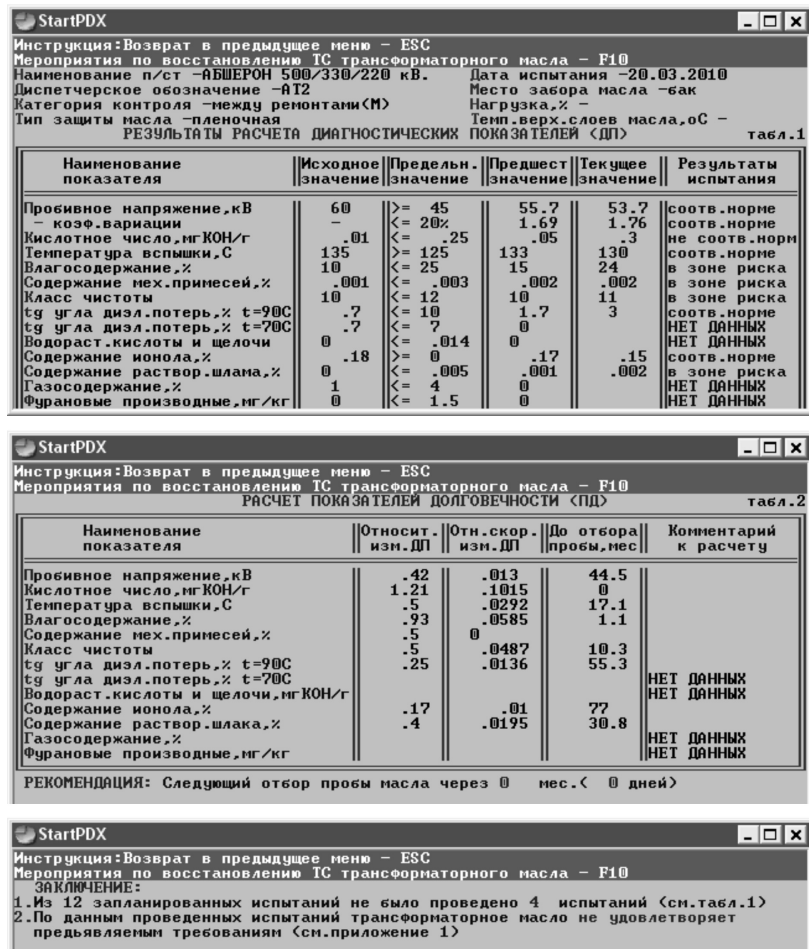


Рис. 3

элементов КС;  $P_j$  —  $j$ -й ДП,  $j = 1, n_n$ ;  $n_n$  — число ДП) по заданным разновидностям признаков с проверкой гипотезы о характере расхождения статистических функций распределения, построенных по данным КС и выборки. Этот метод позволяет оценить величину  $\bar{\vartheta}^* [Iz (II, t)]$  с оптимальной точностью (шириной доверительной области) и достоверностью (минимальное значение суммы ошибок первого и второго рода).

Принципиальная возможность такой оценки вытекает из известных закономерностей: с увеличением числа признаков классификации статистических данных точность оценки  $F^* \{ \bar{\vartheta} [Iz (II, t)] \}$  снижается, а ее информативность возрастает.



Случайный характер скорости изменения износа обуславливает соответствующие изменения величины  $\Delta T(II)$ , среднее значение которой вычисляем по формуле

$$M^* [\Delta T(II)] = \frac{[1 - I_z(II, t)]}{M^* \{ \mathfrak{G} [I_z(II, t)] \}}.$$

Методом прямой подстановки можно вычислить оценку нижнего граничного значения доверительного интервала:

$$\underline{\Delta T(II)} = \frac{[1 - I_z(II, t)]}{\mathfrak{G} [I_z(II, t)]}.$$

На рис. 3 приведены результаты расчета показателей долговечности по данным измерения ДП при физико-химическом анализе трансформаторного масла (см. рис. 1, блок 2.3.5).

## Выводы

1. При анализе надежности ТР энергосистемы, одной из основных характеристик надежности является долговечность. Непосредственная оценка гарантированных значений показателей долговечности ввиду малочисленности однотипных статистических данных невозможна.

2. Для характеристики долговечности оборудования энергосистем предложены показатели долговечности, метод и алгоритм их оценки по ретроспективным данным измерения ДП.

3. Целесообразна пятиуровневая классификация оценок состояния свойств материалов узлов оборудования, а именно: хорошее, допустимое, зона риска, дефектное и катастрофический износ. На последних трех уровнях возможно в той или иной степени восстановление износа конструктивных материалов.

4. Разработанный метод оценки предельно-допустимых значений скорости изменения диагностических показателей по заданным РП, характеризующим индивидуальность ТР, основан на использовании ретроспективных данных испытания оборудования, применении имитационного моделирования выборок реализаций численных значений ДП и результатах проверок гипотезы об отсутствии взаимосвязи ДП и РП и может быть применен для контроля объективности предельно-допустимых значений ДП.

The authors consider the procedure of computer estimation of longevity indices of power system transformers. A method has been developed for estimating maximum admissible values of velocity of changes in diagnosis indices from preset varieties of features characterizing the transformer individuality.

1. *Иорш В. И., Крюков И. З., Антоненко И. Н.* Управление инфраструктурой и надежностью производственных систем//Management. — 2009. — № 1. — С. 72—73.
2. *Фархадзаде Э. М., Сафарова Т. Х., Мурадалиев А. З. и др.* Автоматизированная система анализа индивидуальной надежности и эффективности энергоблоков ГРЭС// Электрические станции. — 2005. — № 11. — С. 38—46.
3. *Надежность систем энергетики. Терминология. Сб.рекомендуемых терминов.* — М.: Наука, 1980. — С.14.
4. *Руденко Ю. Н., Чельцов М. Б.* Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Методы исследования. — Новосибирск: Наука, 1974. — 264 с.
5. *Никджу А. Д., Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З.* Некоторые вопросы долговечности стареющего оборудования ТЭС// Теплоэнергетика. — 2003. — № 10. — С. 72—77.
6. *Объем и нормы испытания электрооборудования.* 6-е изд. — М.: НЦ ЭНАС, 1998. — 256 с.

Поступила 22.11.10

*ФАРХАДЗАДЕ Эльмар Мехти оглу, д-р техн. наук, профессор, руководитель отдела «Надежность энергетического оборудования» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского ин-та (АзНИПИИ) энергетики (г. Баку). В 1961 г. окончил энергетический факультет Азербайджанского ин-та нефти и химии. Область научных исследований — надежность и эффективность электроэнергетических систем.*

*МУРАДАЛИЕВ Айдын Зураб оглу, канд. техн. наук, гл. специалист лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АзНИПИИ энергетики (г. Баку). В 1982 г. окончил энергетический факультет Азербайджанского ин-та нефти и химии. Область научных исследований — количественная оценка индивидуальной надежности оборудования и устройств электроэнергетических систем.*

*РАФИЕВА Тамара Каировна, канд. техн. наук, гл. специалист лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АзНИПИИ энергетики (г. Баку). В 1973 г. окончила энергетический факультет Азербайджанского ин-та нефти и химии. Область научных исследований — количественная оценка технического состояния оборудования и устройств электроэнергетических систем.*

*Исмаилова Симузар Мовлан кызы, аспирантка, вед. инженер лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АзНИПИИ энергетики (г. Баку). В 1985 г. окончила энергетический факультет Азербайджанского ин-та нефти и химии. Область научных исследований — количественная оценка технического состояния силовых трансформаторов.*