

*О. В. ШУТЕНКО*, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»;  
*Д. Н. БАКЛАЙ*, ассистент, НТУ «ХПИ»

## **ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОКИСЛЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ МНОЖЕСТВЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ**

Розроблена та навчена модель множинної нелінійної регресії для оцінки ступеню окислювання трансформаторних масел по комплексу ознак. Доведена адекватність моделі. Виконана перевірка моделі на незалежній вибірці продемонструвала її високу ефективність. Запропоновано алгоритм оцінку ступеню окислювання масел за допомогою моделі множинної нелінійної регресії.

The model of plural nonlinear regress, for an estimation of a degree of oxidation of transformer oils, on a complex of diagnostic attributes is developed and trained. Adequacy of model is proved. The executed check of model on independent sample has shown its high efficiency. The algorithm of an estimation of a degree of oxidation of oils, with the help of model of plural nonlinear regress is offered.

**Введение.** В настоящее время за рубежом [1] обсуждаются две группы стратегий технического обслуживания и ремонта высоковольтного электроэнергетического оборудования (ТО и Р), акцентированные либо на поддержании рабочего состояния конкретного оборудования, либо на сохранении надежности энергосистемы с учетом возможных отказов оборудования, чреватых потерей или резким снижением этой надежности. Имеющийся зарубежный опыт можно сформулировать в четырех пунктах:

1. Стратегия планового ТО и Р забыта почти повсеместно.
2. Стратегия ТО и Р по техническому состоянию принята почти повсюду.
3. Осуществляется переход к стратегии ТО и Р по прогнозируемому техническому состоянию оборудования. При этом технические эксперты разрабатывают сценарий ТО и Р на основе прогноза, менеджеры корректируют его на основе управления рисками.
4. Применительно к коммутационному оборудованию опробована стратегия полного отказа от ТО и Р с предварительной заменой и автоматизированным мониторингом некоторых видов старого оборудования (так называемая корректирующая стратегия ТО и Р).

Опыт нескольких компаний, принявших эту стратегию в 2000–2004 гг., показал экономию затрат в 14 % [2]. Однако в Украине переход на ТО и Р по техническому состоянию находится на начальном этапе, и обслуживание эксплуатируемого оборудования продолжает осуществляться по плану. Одной из основных причин, препятствующих к переходу на обслуживания оборудования по состоянию, является отсутствие методов для оценки и прогнозирования технического состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования. В связи с этим разработка таких методов является актуальной.

**Анализ публикаций.** Использование регрессионных моделей для оценки степени старения трансформаторных масел предложено в [3]. В работах [4, 5,

б) проведено усовершенствование методов для обработки результатов периодического контроля и подходов к обучению модели. В данных работах использовались линейные модели, основным недостатком которых, является отсутствие учета особенностей дрейфа показателей масел, в процессе длительной эксплуатации, что естественно снижает достоверность получаемых результатов.

**Цель статьи.** В статье, предложена модель множественной, нелинейной регрессии для оценки степени окисления трансформаторных масел.

**Принципы построения регрессионной модели.** В процессе длительной эксплуатации трансформаторное масло находится под воздействием сильных электрических полей, температуры и влиянием химически агрессивных сред. В результате этих воздействий происходит изменение химической структуры масел и ухудшение их изоляционных свойств – старение масел. Для трансформаторов напряжением 110 кВ, наиболее характерным процессом старения являются окислительные реакции, то есть взаимодействие молекул углеводородов масел с кислородом. Особенностью окисления является достаточно длительная продолжительность химических реакций, которая во многом зависит от режимов работы трансформаторов. В работах [7, 8] установлена значимая корреляционная связь между продолжительностью эксплуатации и показателями качества трансформаторных масел, характеризующих степень их окисления. Полученные в [9] значения тесноты статистической связи между показателями качества трансформаторных масел позволили установить, что наиболее статистически зависимыми являются следующие показатели качества масел: содержание в масле органических кислот (кислотное число) – содержание в масле водорастворимых кислот (реакция водной вытяжки) – цвет масел – тангенс угла диэлектрических потерь – влагосодержание масла. Это те показатели, которые характеризуют процесс окисления масел. Поэтому для описания процессов окисления масел целесообразно использовать регрессионную модель вида [3, 4]:

$$\hat{t} = \sum_{i=1}^p f(x_i). \quad (1)$$

где  $\hat{t}$  – длительность эксплуатации трансформаторных масел, определяемая по регрессионной модели;  $p$  – количество показателей качества масел (регрессоров);  $f(x_i)$  – зависимости длительности эксплуатации масел от значений показателей качества масел.

При выборе вида функциональной зависимости  $t = f(x_i)$  возникают существенные трудности. Зависимости показателей качества трансформаторных масел от длительности эксплуатации имеют сложный, нелинейный характер [8, 10]. Кроме того в [10] показано, что в зависимости от условий эксплуатации, сорта и качества масел характер дрейфа одного и того же физико-химического показателя может значительно отличаться. Выполненный анализ показал, что наибольшую достоверность аппроксимации для анализируемых

зависимостей можно получить, используя квадратичный полином вида:

$$\hat{t} = b_0 + b_1 \cdot p_i + b_2 \cdot p_i^2. \quad (2)$$

где  $\hat{t}$  – длительность эксплуатации трансформаторных масел, определяемая по регрессионной модели;  $p_i$  – показатель качества масла;  $b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты регрессионной модели, подлежащие определению.

**Обучение регрессионной модели.** Для обучения регрессионной модели были использованы результаты периодического контроля состояния трансформаторных масел по четырем трансформаторам Луганской, Сумской и Донецкой областей. Объем выборки составил 117 выборочных значений, которые характеризуют изменение показателей качества масел на интервале 35 лет. Данные трансформаторы имели среднее значение загрузки – 67 % и одинаковые значения показателей на момент заливки масла. Данное обстоятельство обеспечило высокую степень однородности временных рядов, о которой можно судить по значениям коэффициентов парной корреляции и корреляционных отношений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов парной корреляции и прямого и обратного корреляционных отношений между показателями качества обучающей выборки и продолжительностью эксплуатации

Показатели масла	N	Значения коэффициента парной корреляции	Корреляционное отношение	
		$\rho_{p-t}$	$\eta_{t-p}$	$\eta_{p-t}$
Кислотное число	117	0,992	0,998	0,995
Реакция водной вытяжки	117	0,768	0,815	0,795
Цвет масел	117	0,985	0,992	0,988
Тангенс угла диэлектрических потерь масел	117	0,957	0,975	0,960
Влагосодержание масел	117	0,649	0,725	0,688

Как видно из табл. 1 данные используемые для обучения имеют достаточно высокую степень статистической однородности. Это позволило отказаться от процедуры квантования данных, которая широко использовалась раньше [3, 4], и тем самым учесть особенности дрейфа показателей качества масел на длительных интервалах эксплуатации. Из табл. 1 видно, что значения корреляционных отношений явно превосходят значения коэффициентов парной корреляции для всех анализируемых показателей качества масел, что свидетельствует о значимом отклонении анализируемых зависимостей от линейных.

На основе данных табл. 1 был сформирован порядок подстановки регрессоров в регрессионную модель (1). В отличие от [3, 4], где регрессоры подставлялись в уравнение по мере убывания значения информативности показателей (для расчета которых использовалась линейная модель), предложено подставлять регрессоры по мере убывания значения обратного корреляционного отношения  $\eta_{p-t}$ . Таким образом, показатели качества масел подставлялись

в регрессионную модель в следующем порядке:

1. содержание в маслах органических кислот (кислотное число);
2. цвет масел;
3. тангенс угла диэлектрических потерь;
4. содержание в маслах водорастворимых кислот (реакция водной вытяжки);
5. влагосодержание масел.

Обучение регрессионной модели заключалось в последовательной подстановке регрессоров в регрессионное уравнение (1). После чего выполнялось прогнозирование времени  $t$  по одной и той же контрольной выборке с вычислением количественного значения выбранной заранее меры согласия. Оптимальным считался набор показателей (регрессоров), обеспечивающий глобальный экстремум меры согласия.

В качестве меры согласия [4] предложена модификация коэффициента  $R^2$ , учитывающая, с одной стороны, количество задаваемых для прогноза контрольных значений времени  $t$ , а с другой, число  $p$  используемых в модели (1) регрессоров:

$$\bar{R}_p^2 = 1 - (1 - R_p^2) \left( \frac{n}{n - p} \right), \quad (3)$$

где  $R_p^2$  – мера согласия регрессионной модели, которая рассчитывается как:

$$R_p^2 = \frac{Q_1}{Q},$$

где  $Q_1$  – дисперсия частных средних, представляет собой средний квадрат отклонений эмпирической линии регрессии от линии генеральной средней;  $Q$  – сумма квадратов отклонений  $y_{ji}$  от среднего значения  $\bar{y}_j$ .

После нахождения глобального максимума  $\bar{R}_p^2$  выполнялась оценка точности регрессионной модели (1) по статистическим характеристикам остатков  $\{\varepsilon_i\}$ : значения математического ожидания остатков  $M_\Delta$ , значения коэффициентов асимметрии  $\gamma_a$  и эксцесса  $\gamma_s$ , (должны быть близки к нулю), а плотность распределения вероятности – к нормальному закону:  $f(\varepsilon_i) \approx N(0, \sigma_{\text{ост}}^2)$ . Точность оценки степени окисления трансформаторных масел, можно оценить по значению ошибок прогноза, которые определяются как:

$$\sigma_{\text{прог}} = \sqrt{\delta_{\text{ост}}},$$

где  $\delta_{\text{ост}}$  – значение остаточной дисперсии регрессионной модели:

$$\delta_{\text{ост}} = \frac{1}{(n-1) - p} \cdot \sum_{i=1}^n \left( t_i - \hat{t}_i \right)^2.$$

Значения коэффициентов регрессии и результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2

Как видно из табл. 2, значение меры согласия  $\bar{R}_p^2$  имеет четко выражен-

ный максимум 0,9980, который приходится на третий член регрессионной модели. После этого с увеличением числа регрессоров значение  $\bar{R}_p^2$  слабо снижается. Функциональная регулярность кривой  $\bar{R}_p^2$  указывает на высокую эффективность процедур статистической обработки данных с последующей процедурой выделения однородных временных рядов, что повышает достоверность и однородность исходных данных и снижает уровень неконтролируемых случайных факторов.

Таблица 2 – Значения коэффициентов регрессии и результаты регрессионного анализа

Характеристики регрессионной модели	Регрессор				
	1	2	3	4	5
$b_0$	-1,452	-3,489	-4,559	-4,596	-4,583
$b_{11}$	+225,398· $p_1$	+298,526· $p_1$	+240,952· $p_1$	+244,460· $p_1$	+241,963· $p_1$
$b_{12}$	+347,023· $p_1^2$	-1093,852· $p_1^2$	-1456,033· $p_1^2$	-1469,045· $p_1^2$	-1454,37· $p_1^2$
$b_{21}$		+0,799· $p_2$	+2,467· $p_2$	+2,485· $p_2$	+2,517· $p_2$
$b_{22}$		+0,391 $p_2^2$	-0,264 $p_2^2$	-0,268 $p_2^2$	-0,278 $p_2^2$
$b_{31}$			+5,472· $p_3$	+5,292· $p_3$	+5,354· $p_3$
$b_{32}$			-0,0456 $p_3^2$	-0,00735 $p_3^2$	-0,0132 $p_3^2$
$b_{41}$				-122,359· $p_4$	-112,431· $p_4$
$b_{42}$				+7927,002 $p_4^2$	+5991,9 $p_4^2$
$b_{51}$					+0,0193· $p_5$
$b_{52}$					-0,000328 $p_5^2$
Результаты регрессионного анализа					
$Q_1$	9965,21	10022,7	10076,5	10076,6	10076,8
$Q_2$	130,137	72,603	18,8828	18,7327	18,5
$Q$	10095,3	10095,3	10095,3	10095,3	10095,3
$R^2$	0,987	0,992	0,9981	0,9981	0,9981
$\bar{R}_p^2$	0,986	0,992	0,9980	0,9979	0,9971
$F_{рас}$	8729,5	15461,4	58699,5	58094,8	57143,4
$\sigma_{ост}^2$	1,141	0,648	0,171	0,173	0,174
$\sigma_{прог}$	1,068	0,805	0,414	0,416	0,417
$M_\epsilon$	-4,251 $10^{-15}$	2,125 $10^{-16}$	8,714 $10^{-15}$	-5,108 $10^{-15}$	-3,476 $10^{-15}$
$j_a$	0,238	0,0561	-0,0858	-0,108	-0,103
$j_s$	-0,688	-0,311	-0,591	-0,556	-0,552

**Анализ адекватности модели.** Адекватность регрессии для каждого из вариантов расчета проверялась с помощью параметрического теста на значи-

мость регрессии, с помощью  $F$ -критерия по следующей схеме:

1. Нулевая гипотеза  $H_0$ : угловые коэффициенты регрессии равны нулю ( $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$ ).

2. Критериальная статистика:

$$F = \frac{R^2/(p-1)}{(1-R^2)/(n-p)} \approx F_{(p-1),(n-p)}.$$

3. Статистика сравнения:

$$F_{кр} = F_{(p-1),(n-p), 0,95}.$$

4. Решение: регрессия значима, если  $F > F_{кр}$  (гипотеза  $H_0$  отвергается).

Как видно из табл. 2 максимальное значение  $F$ -критерия приходится на 3 член регрессионного уравнения и составляет 58699,5, что намного превышает табличное значение  $F$ -критерия, при заданном уровне доверительной вероятности  $p = 0,95$  и соответствующем значении степеней свободы. Таким образом гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Для проверки адекватности полученной модели также был выполнен анализ остатков. С этой целью проверена их независимость и оценены числовые характеристики. Числовые характеристики остатков приведены в табл. 2. Зависимость остатков от времени прогноза приведена на рис. 1.

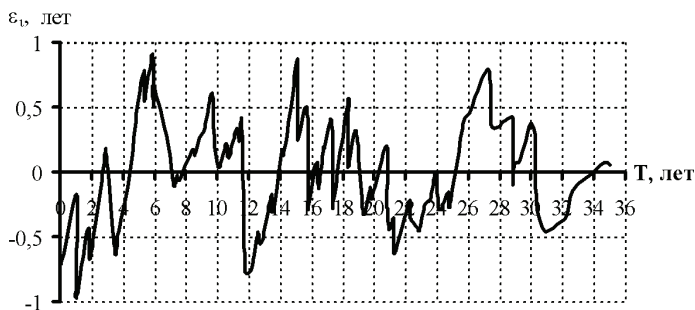


Рисунок 1 – Зависимость остатков от времени прогноза

Судя по рисунку, а также по значениям  $M_\varepsilon$  и  $\gamma_a$  и  $\gamma_b$  плотность распределения  $f(\varepsilon_i)$  симметрична с нулевым средним значением и учитывая независимость остатков, что свидетельствует об адекватности регрессионной модели в рамках проведенного статистического анализа.

**Проверка модели старения на независимой выборке.** Более объективную оценку точности исследуемых моделей можно получить, применяя независимую, контрольную выборку (не использовавшуюся при синтезе анализируемых моделей). В качестве модели старения для проверки возьмем регрессионное уравнение, имеющие максимум  $\bar{R}_p^2$ , и ограничимся количеством регрессоров, определяющих максимальное значение меры согласия, то есть три

регрессора. Регрессионная модель старения имеет вид:

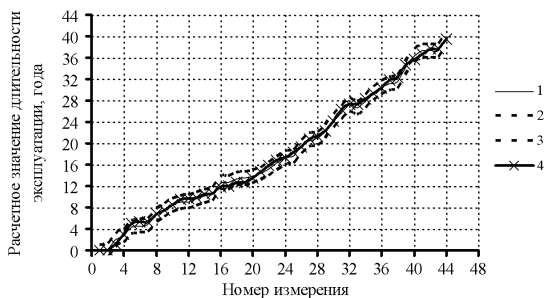
$$t = -4,559 + 240,952 p_1 - 1456,033 p_1^2 + 2,467 p_2 - 0,264 p_2^2 + 5,472 p_3 - 0,0456 p_3^2, \quad (4)$$

где  $t$  – расчетное время старения;  $p_1$  – текущее значение кислотного числа масла;  $p_2$  – текущее значение цвета масла;  $p_3$  – текущее значение тангенса угла диэлектрических потерь масла при 90 °С.

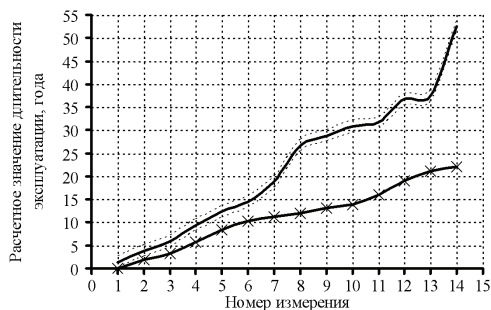
В качестве контрольной выборки были взяты результаты периодического контроля состояния трансформаторных масел для 3-х силовых трансформаторов номинальным напряжением 110 кВ. Подставив значения показателей качества масел в уравнение (4), были получены три массива расчетной длительности эксплуатации. Эти значения представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, *а* для трансформатора ПС «Чистяково» Т-2 наблюдается практически полное совпадение между действительной и расчетной длительностью старения масел. На всем промежутке действительные значения длительности находятся внутри доверительного интервала (рассчитывался как  $t_i \pm 3\sigma_{\text{прог}}$ ), что свидетельствует о том, что процесс старения трансформаторного масла протекает со скоростью характерной для заданной загрузки. Кроме этого следует отметить достаточно высокую точность прогноза предложенной модели. Ведь максимальная длительность старения у обучающей выборки составила 35 лет, а модель практически точно спрогнозировала значения длительности на интервале до 40 лет. Для трансформатора ПС «Постниково» Т-1 (рис. 2, *б*) расчетное значение длительности старения намного превышает действительные. Это свидетельствует о том, что значения показателей качества трансформаторного масла, данного трансформатора, соответствуют большим значениям длительности эксплуатации с загрузкой 67 %. Другими словами скорость старения масла в трансформаторе ПС «Постниково» Т-1 намного превышает скорость старения масла в трансформаторе ПС «Чистяково» Т-2. Скорость старения масла в трансформаторе ПС «Красная звезда» Т-2, намного меньше чем скорость старения масла в трансформаторе ПС «Чистяково» Т-2 (см. рис. 2, *в*). Расчетное значение длительности старения намного меньше действительной.

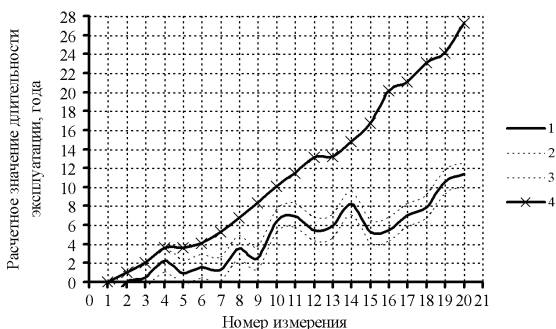
Для объяснения полученных результатов были проанализированы значения средней загрузки данных трансформаторов за анализируемый период эксплуатации. Оказалось, что средняя загрузка трансформатора «Чистяково» Т-2, практически совпадает с средней загрузкой обучающей выборки – 67 %. Трансформатор «Постниково» Т-1, эксплуатировался со значительной перегрузкой 78 %. Загрузка третьего трансформатора «Красная звезда» Т-2, составила 26 %. Такое различие в загрузке трансформаторов и обусловило различную скорость дрейфа показателей качества трансформаторных масел. Таким образом, разработанная модель позволяет распознавать трансформаторы с различной интенсивностью окисления трансформаторных масел, которая обусловлена различными режимами эксплуатации трансформаторов.



а



б



в

- 1 – расчетная длительность старения;
- 2 – верхняя граница доверительного интервала;
- 3 – нижняя граница доверительного интервала;
- 4 – действительная длительность старения.

а – трансформатор ПС «Чистяково» Т-2;

б – трансформатор ПС «Постниково» Т-1;

в – трансформатор ПС «Красная звезда» Т-2.

Рисунок 2 – Графическая иллюстрация оценки интенсивности старения масел в трансформаторах из независимой выборки



На основании приведенных примеров можно сформулировать следующую процедуру для оценки степени окисления трансформаторных масел с помощью модели множественной нелинейной регрессии:

1. Сравнению должны подлежать только трансформаторы с одинаковым значением загрузки (в данном случае 65 – 70 %);

2. Если значения действительной длительности старения находятся в пределах доверительного интервала рассчитанного с помощью регрессионной модели, то следует признать, что старение проходит с нормальной скоростью и трансформатор не нуждается в замене масла;

3. Если значения действительной длительности старения меньше нижней границы доверительного интервала рассчитанного с помощью регрессионной модели, то старение протекает с аномальной скоростью – необходимо оперативное вмешательство персонала;

4. Если значения действительной длительности старения превышают верхнюю границу доверительного интервала рассчитанного с помощью регрессионной модели, то старение протекает с замедленной скоростью – необходимо выяснить не были ли допущены нарушения при отборе, транспортировке, хранении проб масла и при проведении испытаний.

## **Выводы**

1. Впервые разработана и обучена модель множественной нелинейной регрессии, для оценки степени окисления трансформаторных масел;

2. Выполненный регрессионный анализ показал, что гипотеза об адекватности разработанной модели не отвергается. При этом максимальное значение меры согласия  $\bar{R}_p^2 = 0,998$  и минимальное значение ошибки прогноза  $\sigma_{\text{прог}} = 0,414$  (года), достигнуто на третьем регрессоре, (в то время как для линейных моделей оптимум наблюдается на 4-5 регрессорах), что позволяет оптимизировать объем выполняемых испытаний;

3. Выполненная проверка разработанной модели на независимой выборке показала ее высокую эффективность и способность распознавать трансформаторы с аномальной интенсивностью окислительных процессов;

4. Предложен алгоритм оценки степени окисления масел, с помощью модели множественной нелинейной регрессии.

Повышение точности и достоверности результатов оценки степени окисления трансформаторных масел, возможно за счет определения более точных зависимостей показателей масел от длительности эксплуатации. Для оценки степени окисления трансформаторных масел для всех трансформаторов находящихся в эксплуатации необходимо разработать множество регрессионных моделей, соответствующих различным значениям нагрузок трансформаторов.

**Список литературы:** 1. *M. Marketz Maintenance Strategies for Distribution Networks / Marketz M., Polster J., Muhr M. // Proc. 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing. – 2005. – Paper F-55.* 2. *J.J. Smith Trends in PD-diagnostics for Asset Management of Aging HV Infrastructures*

Smith J.J. // Proc. 14th International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing. – 2005. – Paper K-05. **3. В.Е. Бондаренко** Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла для технического эксплуатационного контроля маслонеполненного энергетического оборудования / *В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко* // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УДАЗТ. – 2003. – № 2. – С. 46–50. **4. В.Е. Бондаренко** Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел : монография / *В.Е. Бондаренко, П.Ф. Цапов, О.В. Шутенко*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с. **5. В.Е. Бондаренко** Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов / *В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко* // Технічна електродинаміка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2006. – № 5, тем. вип. – С. 88-93. **6. Бондаренко В.Е.** Сравнительный анализ эффективности традиционной и вероятностной систем оценки состояния жидкой изоляции высоковольтных трансформаторов на примере действующего оборудования / *В.Е. Бондаренко, О.В. Шутенко, В.В. Черкашина* // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 28. – С. 7–18. **7. Шутенко О.В.** Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний / *О.В. Шутенко* // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 4. – С. 42–50; **8. Шутенко О.В.** Особенности дрейфа показателей качества трансформаторного масла в течении длительной эксплуатации / *О.В. Шутенко* // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – № 4. – С. 26-30. **9. Шутенко О.В.** Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла / *О.В. Шутенко* // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2008. – № 45. – С. 156-167. **10. Шутенко О.В.** Исследование особенностей старения трансформаторных масел в условиях длительной эксплуатации / *О.В. Шутенко* // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2010. – № 36. – С. 131-141.



**Шутенко Олег Владимирович** закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1992 г. по специальности «Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника». В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслонеполненного оборудования. В настоящее время работает доцентом кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПИ».



**Баклај Дмитрій Николаевич** закончил электроэнергетический факультет Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» в 2010 г. по специальности «Электрические системы и сети». Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслонеполненного оборудования. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Передача электрической энергии», НТУ «ХПИ».

*Поступила в редколлегию 01.04.2011.*