

## МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНТРОЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА РЕАЛЬНЫЙ РЕСУРС СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**В. В. Василевский**

*Запорожский национальный технический университет*

**Аннотация.** Рассмотрен технологический процесс производства силового трансформатора с точки зрения влияния проведения технологических и контрольных операций на распределение ресурса трансформатора. Предложены модели для оценки влияния этапа производства на назначенный ресурс, которые отличаются учетом несовершенства средств контроля и стохастичности процесса изменения ресурса в ходе технологического процесса.

**Ключевые слова:** технологический процесс, технологическая операция, контрольная операция, силовой трансформатор, ресурс силового трансформатора, нечеткое число.

### Введение

Силовой трансформатор - один из важнейших элементов систем электроснабжения. Стандартом в области эксплуатации трансформаторного оборудования [1] нормальный срок службы трансформатора определяется как некоторая условная величина, принимаемая для непрерывной постоянной нагрузки при нормальной температуре охлаждающей среды и номинальный условиях эксплуатации. В ряде работ отмечается, что наиболее сложно заменяемым и подверженным старению элементом, определяющим срок службы является ресурс изоляции обмоток трансформатора. Критическое состояние изоляции связывается с определенной степенью полимеризации целлюлозы - материала изоляции.

Расход ресурса изоляции характеризуется интегралом старения [2]:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left( \frac{K}{K_{БАЗ}} \right)^{2,05} \times \left( \frac{W}{W_{БАЗ}} \right)^{1,493} \cdot \exp \left[ \ln 2 \cdot \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta} \right] dt \quad (1)$$

где  $L(t_0, t_0 + T)$  - износ изоляции в интервале времени, который начинается в момент  $t_0$  и имеет длительность  $T$ ;  $K, K_{БАЗ}$  - текущий и базовый показатель кислотности масла, соответственно;  $W, W_{БАЗ}$  - текущий и базовый показатель влагосодержания масла, соответственно;  $\theta_h$  - температура наиболее нагретой точки изоляции, °С;  $\Delta$  - интервал температур  $\theta_h$ , на котором происходит, при прочих равных условиях, удвоение износа изоляции,  $\Delta = 6^\circ\text{C}$ .

Для выбора стратегии эксплуатации транс-

форматора важно знать остаточный ресурс, который определяется как разность заложенного и израсходованного ресурса. Вместе с тем методика оценки заложенного ресурса практически отсутствует. Вместо заложенного ресурса используется назначенный ресурс, практика определения которого базируется на статистике отказов изоляции и поэтому не соответствует требованиям к точности.

Оценка назначенного и остаточного ресурса активной части силового трансформатора на разных этапах его жизненного является актуальной научно - технической задачей.

### 1. Анализ исследований и публикаций

В работе [3,4] приведен анализ влияния фаз жизненного цикла силового трансформатора, таких как проектирования, производство, эксплуатация и утилизация на формирование, распределение и расход ресурса трансформатора, но данные работы не детализируют влияние на формирование ресурса этапа производства.

В работе [5] приведена модель расхода ресурса во взаимосвязи с этапом проектирования, однако нет учета влияния на назначенный ресурс этапа производства трансформатора.

Существует ряд методов [6,7,8] оценки остаточного ресурса силового трансформатора на стадии эксплуатации и моделей [2] расхода ресурса, но все они также в недостаточной мере учитывают влияние на ресурс предыдущих фаз жизненного цикла трансформатора.

### 2. Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методики оценки влияния качества изготовления силового трансформатора на его назначенный ресурс. Для достижения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Рассмотреть технологический процесс изготовления силового трансформатора и отдельных его узлов как с точки зрения внесения дефектов, так и с точки зрения влияния технологических и контрольных операций на изменение назначенного ресурса изделия;

2. Разработать метод оценки влияния технологических и контрольных операций на изменение ресурса силового трансформатора и отдельных его узлов.

### 3. Основная часть

Жизненный цикл трансформатора можно разделить на следующие фазы: проектирование, изготовление, эксплуатация и утилизация.

Примем, что в ходе фазы проектирования происходит формирование потенциального ресурса силового трансформатора. Проектируемый ресурс ограничивается решениями относительно конструкции и технологии изготовления, которые принимает проектант. В результате проектирования получают некоторое начальное значение ресурса (назначенный ресурс).

Фаза изготовления характеризуется внесением явных и скрытых дефектов в ходе технологических операций (формообразующих, сборочно-монтажных и др.) и коррекцию качества изделия в ходе контрольных операций.

В результате фазы изготовления получаем реальный ресурс, с которым силовой трансформатор переходит в фазу эксплуатации.

Представим варианты технологического процесса в виде направленного графа (рис.1).

Вершины графа соответствуют этапам, а дуги - вариантам технологических операций технологического процесса с точки зрения влияния операций на внесение, выявление, устранение дефектов и изменение реального ресурса отдельных узлов трансформатора.

Каждая вершина графа, за исключением конечной, представляет состояние технологического процесса, то есть степень готовности изделия и величину ресурса изделия к данному этапу технологического процесса.

Конкретный  $i$ -й, ( $i \in 1, M$ ) технологический процесс представляет собой путь  $\mu$  в графе (рис. 1) от начальной вершины  $S_0$  к конечной  $S_k$  через множество вершин  $S_i$ .

Например,  $S_0$  - исходное состояние материалов либо комплектующих, в котором они поступают на этап входного контроля,  $S_{11}$  - состояние материалов либо комплектующих после входного автоматизированного контроля,  $S_{12}$  - состояние материалов либо комплектующих после входного ручного контроля и т.д.

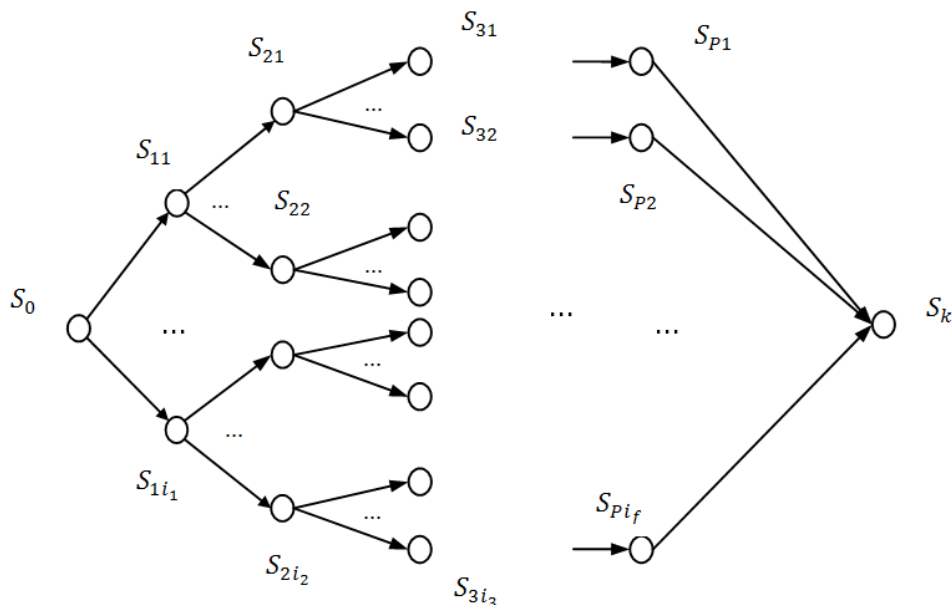


Рис. 1. Граф вариантов технологического процесса

Конечная вершина  $S_k$  представляет состояние в пределах технологического процесса, в котором обнаружены и устранены производственные дефекты и сформирован реальный ресурс изделия.

Оценим влияние отдельной операции на состояние технологического процесса с точки

зрения внесения дефектов. Для оценки степени влияния технологических и контрольных операций на качество изделия воспользуемся моделями этих операций, предложенными в [9]. Так для технологической операции инцидентной верши-

нам  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  графа вариантов технологического процесса:

$$Q_m^\beta(l_m) = \sum_{l_m=0}^{l_m=L_m} (Q_m^\alpha(l'_m) \cdot U_{mi}(l_m - l'_m)), \quad (2)$$

$$l_m = \overline{0, L_m}$$

где  $Q_m^\alpha(l_m)$ ,  $Q_m^\beta(l'_m)$  - вероятность наличия ровно  $l$  дефектов  $m$ -го вида в изделии до и после технологической операции, соответственно;  $U_{mi}$  - вероятность внесения в изделие в ходе  $j$ -той технологической операции ровно  $l_m$  дефектов  $m$ -го вида;  $L_m$  - максимальное количество дефектов  $m$ -го вида в изделии.

$$P_{F_i}^\beta = P_{F_i}^\alpha, \quad (3)$$

где  $P_{F_i}^\beta$  - вероятность годности изделия после технологической операции,  $P_{F_i}^\alpha$  - вероятность годности изделия до технологической операции.

Формула (3) учитывает тот факт, что браковка изделия в ходе технологической операции не выполняется.

Для контрольной операции инцидентной вершинам  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  графа вариантов технологического процесса:

$$Q_m^\beta(l_m) = \begin{cases} Q_m^\alpha(0) + (1 - P_{nm}) \sum_{l_m=1}^{L_m} Q_m^\alpha(l_m), \\ Q_m^\alpha(l_m) \cdot P_{nm}, 0 < l_m < L_m \end{cases} \quad (4)$$

где  $Q_m^\alpha(l_m)$ ,  $Q_m^\beta(l'_m)$  - вероятность наличия ровно  $l$  дефектов  $m$ -го вида в изделии до и после контрольной операции, соответственно;  $P_{nm}$  - вероятность необнаружения дефекта  $m$ -го вида в ходе контрольной операции.

$$P_{F_i}^\beta = P_{F_i}^\alpha \cdot P_{Fi}. \quad (5)$$

где  $P_{Fi}$  - вероятность того, что изделия, поступившие на контроль будут признаны годными (допущенными к следующей операции).

Приведенные модели позволяют описывать динамику распределений дефектов в ходе технологической и контрольной операций изготовления. Рассмотрим технологический процесс изготовления с точки зрения влияния на ресурс.

Процесс формирования реального ресурса силового трансформатора в ходе технологического процесса его изготовления может носить как детерминированный, так и стохастический характер.

Оценим влияние отдельных технологической и контрольной операций на ресурс узла силового трансформатора:

$$L'_{TOj} = L_{TOj} - \Delta L_{ij} \cdot (1 - P_{nijm}) \quad (6)$$

где  $L'_{TOj}$  - значение ресурса после выполнения  $j$ -ой технологической операции;  $L_{TOj}$  - величина ресурса перед выполнением  $j$ -ой технологической операции;  $\Delta L_{ij}$  - уменьшение значение назначенного ресурса в ходе  $j$ -ой технологической операции в  $i$ -м варианте технологического процесса;  $p_{ijm}$  - эффективность средств контроля, т.е. вероятность необнаружения ими дефектов в ходе  $j$ -ой технологической операции в  $i$ -м варианте технологического процесса по  $m$ -й характеристике изделия.

Изменение ресурса в ходе технологического процесса по пути  $\mu$  предлагается описать следующей формулой:

$$L_{RE\mu} = L_{SET} - \sum_{j=1}^{S_j} \Delta L_{ij} \times (1 - p_{nijm}) \quad (7)$$

где  $L_{RE\mu}$  - реальный ресурс, лет;  $L_{SET}$  - назначенный ресурс, лет.

В качестве примера рассмотрим фрагмент технологического процесса резки пластин магнитопровода из рулонной электротехнической стали.

Предложенные формулы учитывают эффективность средств контроля (вероятность необнаружения ими дефектов).

Дефекты, вносимые при изготовлении пластин магнитопровода могут привести к повышенному нагреву, что в свою очередь негативно отразится на скорости старения бумажно-масляной изоляции силового трансформатора. Описываемый технологический процесс включает в себя следующие технологические и контрольные операции:

КО1 - входной контроль рулонной стали;

ТО1 - резка стали;

КО2 - контроль качества резки пластин;

ТО3 - перенос и хранение разрезанных пластин в многоярусном накопителе;

КО4 - контроль пластин на неплоскостность.

Допустим, что рулон стали, прошедший входной контроль имеет ресурс  $L_{TOj}$  равный 100%, резка (ТО1) приведет к уменьшению ресурса на 0,5%. Контроль качества резки (КО2) производится по трем характеристикам, средства контроля имеют эффективность  $p_{n1}=0,05$ ,  $p_{n2}=0,1$ ,  $p_{n3}=0,15$ . Это значит, что по одной характеристике изделия может быть не обнаружено

5% дефектов, по второй - 10% дефектов и 15% по третьей.

Тогда изменение ресурса в ходе выполнения технологической операции резки с применением (6) будет равно:

$$L'_{TO_n} = 100\% - 0,5\% \times (1 - (0,05 + 0,1 + 0,15)) = 99,65\%$$

Далее допустим, что в результате переноса и хранения пластин в накопителе (ТОЗ) механические воздействия на пластины могут оказывать влияние на электромагнитные характеристики стали, что приведет к уменьшению  $L_{TO_n}$  узла на 0,7%.

Контроль пластин на неплоскостность (КО4) производится по трем характеристикам, средства контроля имеют эффективность  $p_{n1}=0,1$ ,  $p_{n2}=0,15$ ,  $p_{n3}=0,15$ . Тогда изменение ресурса в результате выполнения всего технологического процесса резки с применением (7):

$$L'_{TO_n} = 100\% - ((0,5\% \times (1 - (0,05 + 0,1 + 0,15))) + (0,7\% \times (1 - (0,1 + 0,15 + 0,15)))) = 99,23\%$$

В случае стохастического изменения ресурса силового трансформатора применяем аппарат алгебры нечетких чисел [10]. Так, ресурс до выполнения технологической операции  $L_{TO_j}$ , величина уменьшения ресурса в ходе выполнения технологической операции  $\Delta L_{ij}$ , значение ресурса после выполнения технологической операции  $L'_{TO_j}$  и эффективность средств контроля  $p_{ijm}$  могут быть представлены нечеткими числами L-R типа:

$$\tilde{L}_{TO_j} \{L_{TO_j}, L_{TO_jL}, L_{TO_jR}\}, \Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\} \\ \tilde{L}'_{TO_j} \{L'_{TO_j}, L'_{TO_jL}, L'_{TO_jR}\}, \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}$$

Выполнение операций с нечеткими числами L-R типа описано в [8]. Тогда изменение ресурса в ходе выполнения технологической операции получим из выражения:

$$\tilde{L}'_{TO_j} \{L'_{TO_j}, L'_{TO_jL}, L'_{TO_jR}\} = \tilde{L}_{TO_j} \{L_{TO_j}, L_{TO_jL}, L_{TO_jR}\} - \\ - (\Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\}) \times \\ \times (1 - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}) \quad (8)$$

$$\text{где } (1 - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}) = \\ = \{1 - p_{ijm}; 0 + p_{ijmL}; 0 + p_{ijmR}\};$$

$$\tilde{L}_{TO} \{L_{TO}, L_{TO_L}, L_{TO_R}\} \times \\ \times \{1 - p_{ijm}; 0 + p_{ijmL}; 0 + p_{ijmR}\} = \\ \{L_{TO} \times (1 - p_{ijm}); L_{TO} \times p_{ijmL}; + \\ + (1 - p_{ijm}) \times L_{TO_L} - L_{TO_L} \times p_{ijmL}; \\ L_{TO} \times p_{ijmR}\} + (1 - p_{ijm}) \times L_{TO_R} + \\ + L_{TO_R} \times p_{ijmR}$$

Изменение ресурса в ходе всего технологического процесса находим из выражения:

$$\tilde{L}_{RE\mu} \{L_{RE\mu}, L_{RE\mu L}, L_{RE\mu R}\} = \\ = \tilde{L}_{SET} \{L_{SET}, L_{SETL}, L_{SETR}\} - \\ - \sum_{j=1}^{S_i} \Delta \tilde{L}_{ij} \{L_{ij}, L_{ijL}, L_{ijR}\} \times (1 - \\ - \tilde{p}_{ijm} \{p_{ijm}, p_{ijmL}, p_{ijmR}\}) \quad (9)$$

Допустим, что рулон стали после входного контроля имеет ресурс примерно равный 97% от первоначального ресурса, определенный нечетким числом вида  $\tilde{L}_{TO_j} \{97; 95; 99\}$ . Это означает, что четкое значение нечеткого числа равно 97 а его левое и правое расширение равны, соответственно 95 и 99.

Величина, на которую изменится ресурс изделия после проведения резки равна примерно 0,5% и определяется нечетким числом  $\Delta \tilde{L}_{ij} \{0,5; 0,3; 0,7\}$ , а эффективность средств контроля равна 0,1 и определяется нечетким числом  $\tilde{p}_{ijm} \{0,1; 0,08; 0,12\}$ . Тогда изменение ресурса в ходе выполнения технологической операции резки будет равно (рис. 2):

$$\tilde{L}'_{TO_j} \{L'_{TO_j}, L'_{TO_jL}, L'_{TO_jR}\} = \tilde{L}_{TO_j} \{97; 95; 99\} - \\ - (\Delta \tilde{L}_{ij} \{0,5; 0,3; 0,7\} \times (1 - \tilde{p}_{ijm} \{0,1; 0,08; 0,12\})) = \\ = \{97; 95; 99\} - \{0,45; 0,294; 0,726\} = \\ = \{96,55; 95,726; 99,294\}$$

Также ресурс изделия до и после выполнения технологической операции, а также изменение ресурса в результате выполнения операции могут быть заданы нечеткими числами с функцией принадлежности (например, функцией принадлежности Гаусса):

$$\mu_{L_{TO_j}}(z) = e^{-\frac{(x-c) L_{TO_j}}{2\sigma L_{TO_j}}^2}$$

$$\mu_{LTOj}'(y) = e^{-\frac{(y-c_{LTOj}')^2}{2\sigma_{LTOj}'^2}},$$

$$\mu_{\Delta Lij}(x) = e^{-\frac{(x-c_{\Delta Lij})^2}{2\sigma_{\Delta Lij}^2}}$$

где  $c_{LTOj}$ ,  $c_{LTOj}'$ ,  $c_{\Delta Lij}$  - координата максимума функций принадлежности  $\mu_{LTOj}$ ,  $\mu_{LTOj}'$  и  $\mu_{\Delta Li}$  соответственно;  $\sigma_{LTOj}$ ,  $\sigma_{LTOj}'$ ,  $\sigma_{\Delta Lij}$  - коэффициент концентрации функций принадлежности  $\mu_{LTOj}$ ,  $\mu_{LTOj}'$  и  $\mu_{\Delta Li}$  соответственно.

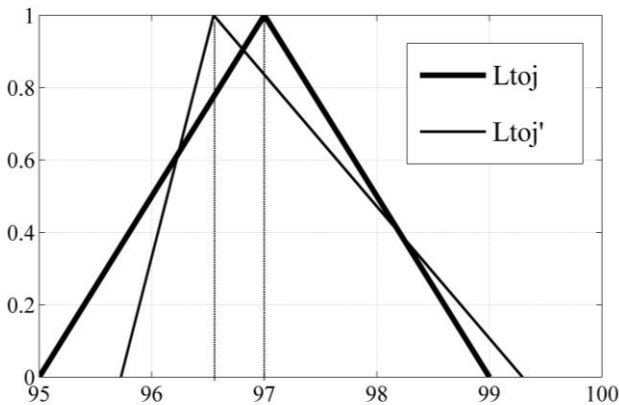


Рис. 2. Ресурс узла до и после выполнения ТО1 по (8)

Тогда изменение ресурса в результате выполнения технологической операции получим с использованием правил арифметических операций над нечеткими числами из выражения [8]:

$$\mu_{LTOj}'(y) = \sup_{LTOj=LTOj-L\Delta Lij} \{ \min\{\mu_A(z), \mu_B(x)\} \} \quad (10)$$

Пусть ресурс узла перед выполнением операции резки  $LTOj$  определен нечетким числом со следующей функцией принадлежности:

$$\mu_{LTOj}(y) = e^{-\frac{(x-1)^2}{2 \cdot 9 \cdot 5^2}},$$

Изменение ресурса в ходе технологической операции:

$$\mu_{\Delta Lij}(y) = e^{-\frac{(x-0,1)^2}{2 \cdot 0,5^2}}.$$

Вычисление  $\mu_{LTOj}'$  производим в программе MATLAB с помощью функции fuzzyith [11], которая выполняет нечеткие арифметические опе-

рации. Результат расчета с использованием (10) приведен на рис 3.

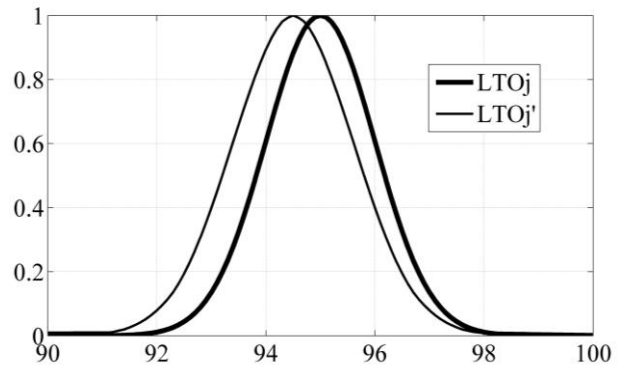


Рис. 3. Ресурс узла до и после выполнения ТО1 по (10)

### Выводы

Технологический процесс изготовления узлов силовых трансформаторов рассмотрен с точки зрения влияния выполнения технологических и контрольных операций производства на назначенный ресурс.

Предложены модели для оценки влияния этапа производства на назначенный ресурс, которые отличаются учетом несовершенства средств контроля и стохастичности процесса изменения ресурса в ходе технологического процесса.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку компьютерной модели взаимного влияния этапов жизненного цикла силового трансформатора на расход его ресурса.

### Список использованной литературы

1. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers - Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers - vol. 14/512/FDIS.
2. Конограй, С. П. Применение модели старения твердой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации [Текст] / С. П. Конограй // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 1. – С. 43-45.
3. Василевский, В. В. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора [Текст] / В.В. Василевский, М.А. Поляков // Электротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 3. – С.33 – 36.
4. Vasilevskij, V. V. Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation [Text] / Vasilevskij V. V., Polyakov M. A. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С.65 – 67.
5. Комков, Е. Ю. Разработка проектно-диагностического комплекса для оптимизации

жизненного цикла силовых трансформаторов с принудительным охлаждением [Текст]: автореф. дис. кан - та тех. наук.: 05.13.12/ ИГЭУ. — Ивано-ново., 2008. — 24с.

6. Мордкович, А. Г. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО [Текст] / А. Г. Мордкович, В. А. Туркот // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2007. — № 6. — С. 23–28.

7. Васин, В. П., Долин, А. П. К задаче оценки остаточного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов [Текст]/ В. П. Васин, А. П. Долин// Новое в российской электроэнергетике. — 2008. — № 3. — С. 42–55.

8. Васин, В. П., Долин, А. П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов [Текст] / В. П. Васин, А. П. Долин // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность - 2008. . — № 3. — С. 12–17.

9. Василевский, В. В. Оптимизация технологического процесса монтажа электрорадиоэлементов на основе вероятностных и технико-экономических моделей контрольных операций [Текст] / В. В. Василевский, М. А. Поляков // Радиоелектроніка, інформатика, управління. — 2013. — № 2. — С.17 – 20.

10. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст]. — СПб.: БХВ - Петербург, 2005. — 736 с.

11. Sumathi S., Surekha P. Computational Intelligence Paradigms: Theory & Applications Using MATLAB [Text] / Sumathi S., Surekha P. // — CRC Press, 2010. — 835 p.

### References

1. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers - Part 1: Loading guide for oil-immersed power transformers - vol. 14/512/FDIS.

2. Konograj, S. P. (2010), Application of the aging model of solid insulation of power oil-filled transformers for their diagnostics in operation mode [Primenenie modeli stareniya tverdoj izolyacii silovykh maslonapolnennykh transformatorov dlya ix diagnostiki v rezhime e'kspluatacii] Elektrotehnika i elektromekhanika, Kharkiv, Ukraine, No.1, pp. 43–45.

3. Vasilevskij, V. V. (2014), Evaluation of the insulations residual life based on accounting of life cycle individual characteristics for power transformer [Ocenka ostatochnogo resursa izolyacii na osnove ucheta individual'nykh osobennostej zhiznennogo cikla silovogo transformatora] Elektrotehnika i el-

ektromekhanika, Kharkiv, Ukraine, No.3, pp. 33–36.

4. Polyakov, M. A., Vasilevskij, V. V. (2014), Prognosis of wearing out of power transformer winding insulation. Tekhnichna elektrodynamika, Kyjiv, Ukraine, No.5, pp. 65–67.

5. Komkov, E. Yu. (2008), Development of a design and diagnostic complex for optimization of the life cycle of power transformers with forced cooling [Razrabotka proektno-diagnosticheskogo kompleksa dlya optimizacii zhiznennogo cikla silovykh transformatorov s prinuditel'nyim oxlazhdeniem], Abstract of the PhD diss., Ivanovo State Power Engineering University, 24 p.

6. Mordkovich, A. G. (2007), The system of management, monitoring and diagnostics of transformers SUMTO [Sistema upravleniya, monitoringa i diag-nostiki transformatornogo oborudovaniya SUMTO] ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaja promyshlennost', Moscow, Russia, No. 6, pp. 23–28.

7. Vasin, V. P., Dolin, A. P. (2008), On the problem of residual life assessment of power oil-filled transformers [insulation K zadache otsenki ostatochnogo resursa izoliatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov]. Novee v rossijskoi elektroenergetike, Moscow, Russia, No.3, pp. 42–55.

8. Vasin, V. P., Dolin, A. P. (2008), Resource of power oil-filled transformers insulation [Resurs izoliatsii silovykh maslonapolnennykh transformatorov] ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaja promyshlennost', Moscow, Russia, No.3. pp. 12–17.

Vasilevskij, V. V. (2013), Optimization of technological process for radio components installation based on probabilistic and technical-economical models of control operations [Optimizaciya texnologicheskogo processa montazha e'lektroradioe'lementov na osnove veroyatnostnyx i texniko-e'konomicheskix modelej kontrol'nyx operacij] Radioelektronika, informatyka, upravlinnja, Zapozhzhja, Ukraine, No.2. pp. 17–20.

9. Leonenkov, A. V. (2005), Fuzzy modeling in the MATLAB and fuzzyTECH environment [Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH] BXV - Peterburg, Saint Petersburg, Russia, 736 p.

10. Sumathi, S., Surekha, P. (2010), Computational Intelligence Paradigms: Theory & Applications Using MATLAB, Boca Raton, USA, CRC Press, 835 p.

## MODELS OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL AND CONTROL OPERATIONS OF PRODUCTION ON REAL RESOURCE OF POWER TRANSFORMER

V. V. Vasilevskij

Zaporizhzhya National Technical University

**Abstract.** The technological process of manufacturing of a power transformer is considered from the point of view of the effect of carrying out technological and control operations on the distribution of the resource of the transformer. The purpose of this work is to develop a methodology for assessing the influence of the manufacturing quality of a power transformer on its designated life. Estimation of the residual service life of the active part of the power transformer at various stages of its life is an actual scientific and technical task. The apparatus of the algebra of fuzzy numbers is applied for developing models of decreasing of transformers resource. Models are proposed for assessing the influence of the technological process stage on the assigned resource. The proposed models differ due to the imperfection of the means of control and the stochastic nature of the process of changing the resource in the course of the technological process. The developed models can be used to calculate the residual resource of a power transformer when designing or operating it. Further research will be aimed at developing a computer model of the mutual influence of the life cycle stages of a power transformer on its resource consumption.

**Key words:** Technological process, technological operation, control operation, power transformer, power transformer resource, fuzzy number.

## МОДЕЛІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КОНТРОЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ НА РЕАЛЬНИЙ РЕСУРС СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

В. В. Василевський

Запорізький національний технічний університет

**Анотація.** Розглянуто технологічний процес виготовлення силового трансформатора з погляду впливу проведення технологічних і контрольних операцій на розподіл ресурсу трансформатора. Запропоновано моделі для оцінки впливу етапу виробництва на призначений ресурс, які відрізняються урахуванням недовершеності засобів контролю та стохастичності процесу змінення ресурсу у ході технологічного процесу виробництва.

**Ключові слова:** технологічний процес, технологічна операція, контрольна операція, ресурс силового трансформатора, нечітке число.

Получено 24.04.2017



**Василевский Владимир Валентинович**, соискатель, инженер кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета. ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69002, Украина, E-mail: Lisses@ukr.net, тел. +38-050-889-30-73

**Vladimir Vasilevskij**, aspirant, engineer of the Department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo Str., Zaporozh'e, 69002, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0002-6220-8398