

# Математическая модель интегрального показателя потери ресурса силового электрооборудования тяговых подстанций в условиях эксплуатации

Александр Александрович МАТУСЕВИЧ<sup>1</sup>

## Резюме

Сформирована и получила дальнейшее развитие теоретическая основа и методическое обеспечение решения актуальной научно-технической проблемы качества и эффективности технического обслуживания и ремонта за счет оценки ресурса силового электрооборудования тяговых подстанций железных дорог в процессе эксплуатации.

Усовершенствованы методы прогнозирования остаточного ресурса которые позволяют делать научно-обоснованные выводы о возможных сроках продления эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций и, тем самым, обеспечить обоснованную периодичность и объем восстановления их износа в течение всего жизненного цикла, а также снижения расходов на эксплуатацию за счет применения обслуживания по фактическому техническому состоянию. Параметр технического ресурса рассматривается как интегральная количественная характеристика фактического состояния электрооборудования.

Разработана математическая модель оценки срабатывания ресурса силового электрооборудования с учетом режимов его работы. Проведены расчеты расхода ресурса трансформатора для разных температурных условий эксплуатации при воздействии на него эксплуатационных факторов.

**Ключевые слова:** электроснабжение, тяговая подстанция, силовое электрооборудование, техническое обслуживание и ремонт, фактический ресурс, фактический сработанный ресурс, остаточный ресурс, математическая модель, интегральный показатель оценки ресурса

## 1. Вступление

Основным заданием системы электроснабжения железных дорог является надежное обеспечение перевозочного процесса при снижении рисков и недопущение развития кризисных ситуаций в непрерывном технологическом процессе железнодорожного транспорта.

Одной из основных проблем электроснабжения электрифицированных железных дорог, которые требуют неотложного решения, относится проблема использования силового электротехнического оборудования (СЭО) тяговых подстанций (ТП), срок службы которого превышает расчетный. Уже сегодня для ряда дистанций электроснабжения количество стареющего силового оборудования ТП приближается к 50% [1, 2]. Острота проблемы обуславливается реальным соотношением темпов нарастания объемов ста-

реющего оборудования и возможностей его обновления. Следствием роста темпов нарастания объемов стареющего оборудования являются дополнительные потери. К ним относятся:

- рост вынужденных расходов на ремонтные работы. Снижение надежности стареющего силового оборудования ТП ведет к росту числа аварийных отключений, последствия которых существенно превышают расходы на плановые ремонтные работы;
- ухудшение основных технико-экономических показателей работы ТП (увеличение себестоимости преобразования электроэнергии, потери в электрических сетях, увеличение расходов на собственные нужды, и тому подобное).

В условиях, когда замена в большом количестве стареющего силового оборудования ТП практически невозможна, использование этого

<sup>1</sup> Канд. техн. наук, доцент; Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна; почта: al m0452@meta.ua.

оборудования сводится к проблеме повышения долговечности оборудования. Повышение долговечности должно предусматривать повышение надежности, как одного из основных ее свойств. Однако пути решения этой проблемы существенно отличаются от известных методов повышения безотказности и ремонтпригодности. Проблема повышения долговечности сводится к повышению остаточного срока службы. Трудность решения данной проблемы заключается и в том, что методы оценки остаточного срока службы для электроустановок на это время разработаны недостаточно полно.

В настоящее время, согласно требованиям нормативно-технической документации (НТД), применяется система плано-предупредительных ремонтов (ППР), где основным технико-экономическим критерием является минимум простоев оборудования на основе жесткой регламентации ремонтных циклов. Однако система ППР в условиях развития рыночных отношений в области ремонта во многих случаях не обеспечивает принятия оптимальных решений. Это связано с тем, что назначение профилактических работ осуществляется в соответствии с регламентом и не зависит от фактического технического состояния СЭО, что приводит к появлению дополнительных материальных и трудовых расходов, которые полно и вовремя не обеспечиваются.

В этих условиях основным направлением в развитии системы ТО и Р является разработка современных методов, основанных на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации и комплексной оценке фактического технического состояния СЭО.

В этом направлении, согласно предлагаемого алгоритма и математической модели уменьшения потерь системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог от отказов силового электрооборудования ТП за счет усовершенствования системы ТО и Р [3], одним из индивидуально важных параметров эксплуатационной надежности является остаточный ресурс электрооборудования  $R_{ост}$  [4]. Сравнивая полученное значение остаточного ресурса с допустимыми пределами его изменения, можно дать рекомендации о необходимости выведения электрооборудования в ремонт (возобновление ресурса) или о продолжении его эксплуатации. Ресурс можно рассматривать как интегральную оценку технического состояния оборудования, измеряемую в единицах наработки. Для разных типов электрооборудования наработка измеряется в разных единицах. Если используются единицы измерения ресурса наработки по времени,

то нормативный ресурс отвечает установленному сроку службы, а фактический ресурс – фактическому сроку службы. В нормативных условиях эксплуатации фактический ресурс  $R$  электрооборудования принимается равным нормативному, установленному в его паспортных данных. Место системы ТО и Р в производственном процессе ТП, по поддержке и возобновлению ресурса СЭО, представлено на рисунке 1.

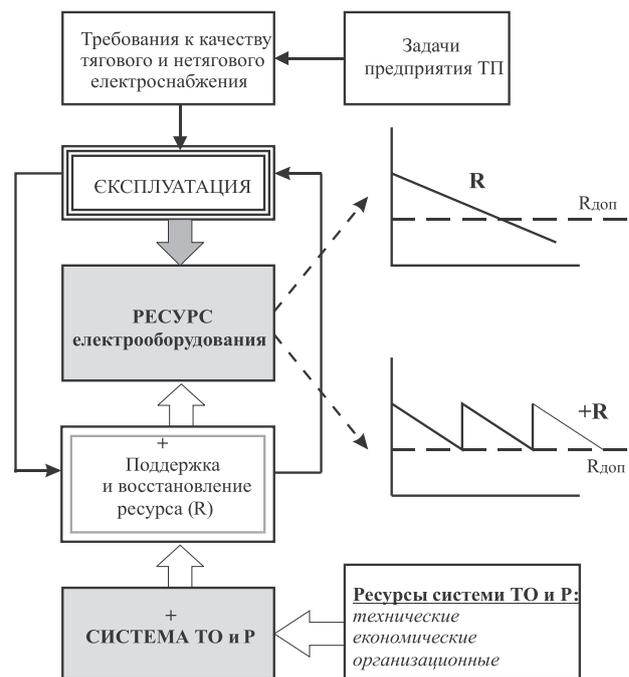


Рис. 1. Поддержка и возобновление ресурса силового электрооборудования ТП

## 2. Основная часть

Причиной изменения ресурса силового электрооборудования ТП является не только фактическое время его эксплуатации, но и ряд эксплуатационных факторов, например: повышенные рабочие температуры при эксплуатации; перегрузки электрооборудования; переходные процессы в электрооборудовании; недостаточный контроль и качество ТО и Р и др., каждый из которых определенным образом влияет на изменение технического состояния оборудования. В зависимости от их интенсивности, характера условий и режимов работы происходит уменьшение ресурса на определенную величину. Очевидно, что чем большее отклонение каждого из параметров по всем группам факторов от номинального значения, тем интенсивнее срабатывает ресурс.

Из существующих методов прогнозирования остаточного ресурса наиболее эффективным яв-

ляется метод индивидуального прогнозирования для конкретных типов оборудования [5]. Хотя, применение данного метода требует определенных затрат, связанных с использованием диагностических средств, испытательного оборудования, техники для обработки полученной информации, программного обеспечения и построения математической модели, тем не менее эти затраты окупаются, учитывая экономический эффект от полученных результатов.

Сложность проблемы прогноза остаточного ресурса оборудования, которое уже отработало назначенный срок эксплуатации, связана в первую очередь с разработкой принципов построения алгоритма и описания математической модели прогноза. Указанная модель должна представлять собой некую совокупность физических свойств и характера процессов деградации оборудования во времени за весь период эксплуатации.

Для определения технического состояния конкретного силового электрооборудования тяговой подстанции (ТП), автором предложен коэффициент относительной оценки технического состояния (сработанного ресурса)  $K_i$  по  $i$ -му определяющему параметру, который можно вычислить для каждого определяющего параметра оборудования, путем сравнения измеренного в данный момент времени значения этого параметра с начальным и предельными значениями по следующей формуле

$$K_i = 1 - \frac{X_i - X_{Иi}}{X_i - X_{Гi}} \quad (1)$$

где  $X_i$  – начальное значение  $i$ -го определяющего технического параметра по нормативно-технической документации;  $X_{Иi}$  – измеренное значение  $i$ -го определяющего параметра при проведении диагностирования;  $X_{Гi}$  – граничное значение  $i$ -го параметра, при котором эксплуатация данного оборудования не допустима.

В начале эксплуатации  $K_i = 1$ , так как  $X_i = X_{Иi}$ . По мере срабатывания ресурса оборудования измеренное значение определяющего параметра  $X_{Иi}$  уменьшается и при  $X_{Иi} = X_{Гi}$  коэффициент  $K_i = 0$ .

Таким образом, техническое состояние оборудования по данному определяющему параметру оценивается коэффициентом  $K_i$ , который изменяется в пределах  $1 \geq K_i \geq 0$ . Однако у каждого типа силового электрооборудования ТП может быть несколько параметров, которые определяют его старение. В этом случае, определить техническое состояние данного оборудования можно по значению минимального коэффициента  $K_i$  одного из параметров, значение которого максимально приближено к предельному ( $K_{\min}$ ) по сравнению

с другими определяющими параметрами. Для качественной оценки значения остаточного ресурса примем некоторые условия:

- оборудование при соблюдении требуемых условий эксплуатации сможет прослужить проектный срок, при этом его техническое состояние в конце проектного срока эксплуатации будет близким к предельному ( $K_i \approx 0$ );
- возможная реальная оценка технического состояния показала, что в конце проектного срока эксплуатации ресурс оборудования не исчерпался и имеется относительный остаточный запас, равный  $K_{\text{ост}}^*$  [5];
- примем значение остаточного ресурса с учетом ограничения по  $K_{\min} = 0,1 \div 0,2$ , при котором для предотвращения отказа дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена [5].

С учетом данных допущений можем определить приблизительное значение остаточного ресурса

$$R_{\text{ост}} = R_H \cdot (K_{\text{ост}}^* - K_{\min}) \quad (2)$$

где  $R_H$  – нормативный срок эксплуатации оборудования;  $K_{\text{ост}}^*$  – относительный коэффициент оценки остаточного запаса ресурса электрооборудования ТП;  $K_{\min}$  – минимально допустимый коэффициент оценки остаточного запаса ресурса.

Текущий режим работы СЭО ТП характеризуется множеством значений  $K_i$  для всех возможных параметров. Отклонение любого параметра способствует переходу СЭО в новый режим работы, которому соответствует новая скорость срабатывания ресурса. Для учета этого фактора и более точной оценки остаточного ресурса ( $R_{\text{ост}}$ ) автором разработан метод отслеживания механизма динамики старения оборудования ТП с учетом значения средней скорости изменения определяющих параметров за весь период эксплуатации силового электрооборудования ТП, в отличии от определения показателей технического состояния оборудования «Гамма-процентный ресурс» [4] и «Гамма-процентная наработка до отказа» [6].

Среднюю скорость изменения определяющего параметра диагностируемого оборудования ТП на протяжении всей его эксплуатации определим по формуле

$$v = \frac{X_0 - X_{И}}{T} \quad (3)$$

где  $X_0$  – начальное значение определяющего параметра;  $X_{И}$  – измеренное при испытании значение определяющего параметра;  $T$  – время от начала эксплуатации до момента измерений.

Учитывая статистические данные диагностирования СЭО ТП [2] и ГОСТ 27.204 – 83, можно делать вывод, что срабатывание ресурса СЭО ТП по  $i$ -му параметру осуществляется в основном по экспоненциальному закону. Тогда с учетом скорости срабатывания ресурса СЭО ТП (3) можно рассчитать

$$R_{ост} = R_n e^{-(v t)} \quad (4)$$

Поделив обе части равенства (4) на  $R_n$ , получим аналогичное выражение в относительных единицах

$$R_{ост}^* = e^{-(v t)} \quad (5)$$

Зависимости остаточного ресурса  $R_{ост}^*$  СЭО ТП в относительных единицах (о.е.) от скорости изменения определяющего параметра и времени  $t$ , отображены на рисунке 2.

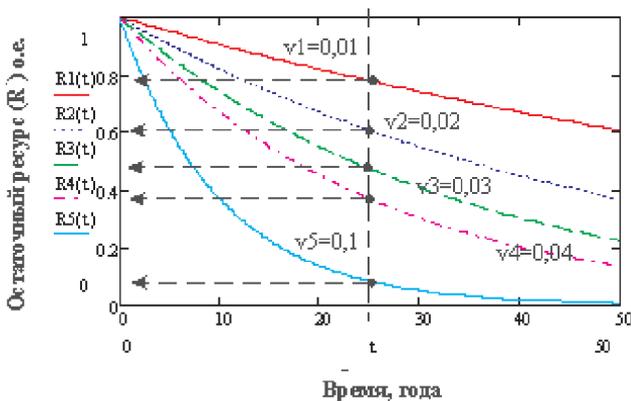


Рис. 2. Зависимость относительного остаточного ресурса  $R^*$  от скорости срабатывания и времени эксплуатации  $t$

Как было указано, при работе электрооборудования ТП в реальных условиях на него осуществляют действие  $N$  разных эксплуатационных факторов. Допустим, что на электрооборудование действует фактор  $F_i$ . При изменении фактора  $F_i$  на величину  $d_i$ , фактический ресурс электрооборудования также изменяется (увеличивается или уменьшается). Фактор  $F_i$  может характеризоваться как единичным измеряемым параметром, так и комплексом величин, которые отображают природу исследуемого эксплуатационного влияния на электрооборудование.

С учетом (1, 3, 4, 5) и [6, 7] можно записать следующее выражение для вычисления фактического сработанного ресурса электрооборудования  $R_\phi$  в зависимости от изменения фактора  $F_i$

$$R_\phi = R_n e^{-\frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (6)$$

где  $R_n$  – нормативный ресурс.

Разделив обе части равенства (6) на  $R_n$ , получим выражение фактического сработанного ресурса в относительных единицах

$$R_\phi^* = e^{-\frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (7)$$

На основании полученных выражений (3, 4, 5) введем в (6, 7) среднюю скорость изменения определяющего параметра диагностируемого силового электрооборудования ТП ( $v$ ), на протяжении всего периода его эксплуатации (рис. 2), в следствии чего получим новые выражения

$$R_\phi = R_n e^{-v \frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (8)$$

$$R_\phi^* = e^{-v \frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (9)$$

Тогда зависимость фактического сработанного ресурса  $R_\phi^*$  как функции: коэффициента сработанного ресурса  $K_i$ , величины изменения фактора  $d_i$  и средней скорости изменения определяющего параметра диагностируемого силового электрооборудования ТП, например при:  $K_i = 1 \div 10$ ;  $d_i = \{1, 4, 7, 10\}$ ;  $v = 1$ , будет иметь вид приведена на рисунке 3.

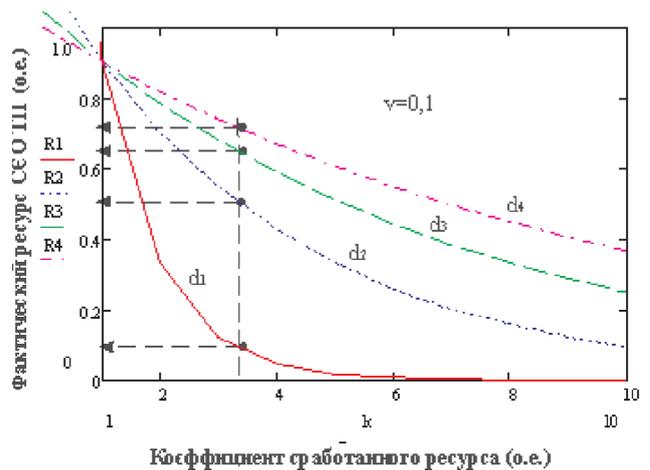


Рис. 3. Зависимость фактического сработанного ресурса СЭО ТП  $R^*$  от коэффициента сработанного ресурса  $K_i$ , величины изменения фактора  $d_i$  и скорости изменения определяющего параметра  $v$

Зависимость относительного фактического сработанного ресурса СЭО ТП (рис. 3.) показывает, изменение ресурса  $R^*$  по отношению к нормативному которое может сработать СЭО ТП в течение срока эксплуатации с учетом параметров  $K_i$ ,  $d_i$  и  $v$ . Данная зависимость имеет качественный

характер и отображает лишь тенденцию изменения ресурса. Для точного определения зависимости (9) необходимо знать реальные значения  $\nu$  и  $d_i$  которые, в свою очередь, могут быть определены экспертами или статистическим путем для СЭО ТП. Для  $N$  эксплуатационных факторов  $F_i$  выражение (9) представим как

$$R_{\phi}^* = \prod_{i=1}^N e^{-\nu \frac{(k_i-1)}{d_i}} = e^{-\sum_{i=1}^N \nu \frac{(k_i-1)}{d_i}} \quad (10)$$

Например, для четырех групп эксплуатационных факторов выражение (10) запишем в виде

$$R_{\phi}^* = e^{-\sum_{i_1=1}^{n_1} \nu \frac{(k_{i_1}^T-1)}{d_{i_1}} - \sum_{i_2=1}^{n_2} \nu \frac{(k_{i_2}^{II}-1)}{d_{i_2}} - \sum_{i_3=1}^{n_3} \nu \frac{(k_{i_3}^{III}-1)}{d_{i_3}} - \sum_{i_4=1}^{n_4} \nu \frac{(k_{i_4}^{TOuP}-1)}{d_{i_4}}} \quad (11)$$

где  $j_1 = 1 \div n_1$  – количество факторов повышение рабочей температуры при эксплуатации;  $j_2 = 1 \div n_2$  – количество факторов перегрузки оборудования;  $j_3 = 1 \div n_3$  – количество факторов переходных процессов;  $j_4 = 1 \div n_4$  – количество факторов низкого качества ТО и Р;  $k_{i_1}^T$  – кратность  $i$ -го фактора повышения рабочей температуры;  $d_{i_1}$  – относительное отклонение  $i$ -го фактора повышения рабочей температуры;  $k_{i_2}^{II}$  – кратность  $i$ -го фактора перегрузки электрооборудования;  $d_{i_2}$  – относительное отклонение  $i$ -го фактора перегрузки электрооборудования;  $k_{i_3}^{III}$  – кратность  $i$ -го фактора переходных процессов в электрооборудовании;  $d_{i_3}$  – относительное отклонение  $i$ -го фактора переходных процессов в электрооборудовании;  $k_{i_4}^{TOuP}$  – кратность  $i$ -го фактора недостаточного качества ТО и Р;  $d_{i_4}$  – относительное отклонение  $i$ -го фактора недостаточного качества ТО и Р, при которых ресурс СЭО изменяется, при этом  $n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = N$ .

Если электрооборудование уже сработало некоторый ресурс  $R_{\phi}^*$ , тогда можно определить нормативный остаточный ресурс при условии дальнейшей работы электрооборудования в нормативных условиях

$$R_{H.ост}^* = 1 - R_{\phi}^* \quad (12)$$

Усовершенствованная математическая модель оценки ресурса силового электрооборудования ТП с учетом условий эксплуатации и параметров фактического сработанного ресурса  $R_{\phi}^*$  – коэффициент сработанного ресурса  $K_r$ , величина изменения фактора  $d_i$  и скорость изменения опреде-

ляющего параметра  $\nu$ , позволяет рассчитать фактический сработанный ресурс  $R_{\phi}^*$  и нормативный остаточный ресурс СЭО ТП системы тягового электроснабжения.

Разработанная методика может быть использована для оценки фактического сработанного ресурса разных видов электрооборудования. Например, проведем расчет ресурса трансформатора, используя разработанную автором методику.

Наработка трансформаторов обычно измеряется в единицах времени. Основным эксплуатационным фактором, который влияет на ресурс трансформаторов, является температура и этот показатель входит в группу тепловых факторов. Считается, что при увеличении температуры наиболее нагретой точки (ННТ) на каждые 10°C срок службы трансформатора уменьшается почти в 2 раза [8]. Номинальным (базовым) значением фактора температуры является величина 98°C. Относительное отклонение температуры  $\Delta \mathcal{G}^*$  от базового для температурных режимов трансформатора: 1, 2, 3, 4 соответственно составит: 1; 0,938; 0,857; 1,122 о.е. Очевидно, что фактор температуры является не единственным, однако, сила влияния других факторов незначительна по сравнению с ним. Допустим, что в сумме они не превышают 15%. Нормативный ресурс трансформатора примем  $R_0 = 25$  лет. Примем что, температурные режимы в течение времени эксплуатации имели значения, которые приведены в табл. 1.

Рассчитаем фактический ресурс трансформатора за 25 лет с помощью выражения (11, 12). Для принятых выходных данных формулу расчета можно записать следующим образом

$$R_{\phi}^* = 1 - \frac{R_1 e^{-\nu \frac{\mathcal{G}_1^* - 1}{\Delta \mathcal{G}^*}} + R_2 e^{-\nu \frac{\mathcal{G}_2^* - 1}{\Delta \mathcal{G}^*}} + R_3 e^{-\nu \frac{\mathcal{G}_3^* - 1}{\Delta \mathcal{G}^*}} + R_4 e^{-\nu \frac{\mathcal{G}_4^* - 1}{\Delta \mathcal{G}^*}}}{R_0} \quad (13)$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – время работы трансформатора в каждом из температурных режимов, которые характеризуются температурами  $\mathcal{G}_1^*, \mathcal{G}_2^*, \mathcal{G}_3^*, \mathcal{G}_4^*$  соответственно с учетом скорости изменения определяющего параметра  $\nu$ . В результате расчета (например, вариант 1) используя выражение (13) получим

$$R_{\phi}^* = 1 + \frac{17e^{-0,1 \frac{(1-1)}{1}} + 3e^{-0,09 \frac{(0,938-1)}{1,06}} + 4e^{-0,07 \frac{(0,857-1)}{1,17}} + 1e^{2,1 \frac{(1,122-1)}{0,98}}}{25} = 1,006.$$

Полученное значение  $R_{\phi}^* = 1,006$  о.е. показывает, что эксплуатация трансформатора велась практически оптимально, поэтому за наработку

Таблица 1

## Температурные режимы работы трансформатора

| № режима  | Суммарная наработка в соответствующем температурном режиме, лет | Значение температуры $\vartheta, ^\circ\text{C}$ | Относительное значение фактора температуры по отношению к базисному $\vartheta = 98^\circ\text{C}$ , $\vartheta$ о.е. | Фактический сработанный ресурс $R^*_{\vartheta}$ , о.е. | Фактический сработанный ресурс $R_{\vartheta}$ , лет                    | Остаточный ресурс $R_{ост}$ , лет |
|-----------|---|--|---|---|---|-----------------------------------|
| Вариант 1 |   |  |   |   |   |                                   |
| 1         | 17  | 98   | 1   | 1,006   | <u>25,15</u><br><i>фактически<br/>выработано<br/>нормативный ресурс</i> | -0,15                             |
| 2         | 3   | 92   | 0,938   |   |   |                                   |
| 3         | 4   | 84   | 0,857   |   |   |                                   |
| 4         | 1   | 100  | 1,122   |   |   |                                   |
| Вариант 2 |   |  |   |   |   |                                   |
| 1         | 10  | 98   | 1   | 1,105   | <u>27,625</u><br><i>Эксплуатируется в<br/>зоне риска</i>                | -2,625                            |
| 2         | 6   | 92   | 0,938   |   |   |                                   |
| 3         | 0   | 84   | 0,857   |   |   |                                   |
| 4         | 9   | 100  | 1,122   |   |   |                                   |
| Вариант 3 |   |  |   |   |   |                                   |
| 1         | 5   | 98   | 1   | 0,950   | <u>23,75</u><br><i>Эксплуатируется в<br/>облегченном режиме</i>         | +1,25                             |
| 2         | 8   | 92   | 0,938   |   |   |                                   |
| 3         | 12  | 84   | 0,857   |   |   |                                   |
| 4         | 0   | 100  | 1,122   |   |   |                                   |

в 25 лет он фактически сработал свой нормативный ресурс. В годах фактический сработанный ресурс будет равен

$$25 \text{ л. } 1,006 \text{ о.е.} = 25,15 \text{ лет.}$$

Нормативный остаточный ресурс определим из выражения (12):  $R^*_{H.ост} = 1 - 1,006 = -0,006$  о.е., в результате.  $R_{ост} = 25 - 25,15 = -0,15$  лет.

Результаты проведенных расчетов разных вариантов температурных режимов работы трансформаторов (табл. 1), по разработанной методике, подтверждают достоверность данной методики по определению ресурса силового электрооборудования ТП при воздействии различных факторов и с учетом условий эксплуатации.

### 3. Выводы

На основании оценки текущего технического состояния силового электрооборудования ТП с учётом физической сущности прогнозируе-

мых процессов усовершенствован метод оценки и прогнозирования срока службы электрооборудования. В отличие от определения показателей технического состояния оборудования в применяемых стандартах, «Гамма-процентный ресурс» и «Гамма-процентная наработка до отказа», автором впервые предложен метод отслеживания механизма динамики старения оборудования с учетом значения средней скорости изменения определяющих параметров за период эксплуатации под действием различных факторов, что позволит значительно повысить качество и точность оценки остаточного ресурса оборудования. Результаты расчётов, согласно предложенной методики, позволят делать более точные научно-обоснованные выводы о возможных сроках продления эксплуатации оборудования, что уменьшит риски эксплуатации силового электрооборудования ТП после нормативных сроков.

Разработана математическая модель оценки фактического сработанного и остаточного ресурса электрооборудования при воздействии на него эксплуатационных факторов, а параметр техни-

ческого ресурса рассматривается как интегральная количественная характеристика фактического состояния силового электрооборудования ТП.

Приведенный пример расчета ресурса трансформатора, для разных температурных условий эксплуатации, подтверждает достоверность данной методики.

Разработанный метод индивидуального прогнозирования остаточного ресурса силового электрооборудования ТП, по продлению сроков его эксплуатации, предложен для апробирования на реальных объектах системы тягового электроснабжения Южной и Приднепровской железных дорог. Данная методика может быть также использована для научно-технического обоснования сроков планирования обслуживания и ремонта оборудования других технических подразделений железных дорог.

## Литература

1. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2013 году [Текст] / - К.: Издательство ООО «Девалта», 2014. - 251 с.
2. Матусевич, О.О. Исследование эксплуатации силового оборудования системы тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / О. О. Матусевич, Д.В. Миронов // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. 2015. - № 1(55). - С. 62-77.
3. Матусевич, О.О. Математическая модель анализа потерь системы тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / О.О. Матусевич // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. 2015. - № 3 (57). - С. 77-87.
4. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002-89. Издание официальное [Текст] / - М.: Издательство стандартов, 1990. - 38 с.
5. «Комплексная программа работ по продлению срока эксплуатации действующих энергоблоков атомных станций», одобренная Кабинетом Министров Украины №263р от 29.04 2004 г.
6. Надежность в технике технической системы. Технические требования к методам оценки и надежности по параметрам производительности. ГОСТ 27.204 - 83. Издание официальное [Текст] / - М.: Издательство стандартов, 1984. - 37 с.
7. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
8. 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.

## Model matematyczny integralnego wskaźnika utraty zasobów zasilania na podstacji trakcyjnej w warunkach eksploatacyjnych

### Streszczenie

W artykule sformułowano i rozwinięto teoretyczne podstawy oraz metodykę rozwiązywania problemów naukowo-technicznych dotyczących oceny eksploatacyjnej zasobów energetyki trakcyjnej na podstacjach. Udoskonalono metody prognozowania całkowitych zasobów, dzięki czemu stało się możliwe naukowe określenie możliwości przedłużenia okresu eksploatacji urządzeń elektrotrakcyjnych w podstacjach trakcyjnych. Na tej podstawie można planować zakres i okresy odnowy tych urządzeń w cyklu życia, a także zmniejszyć nakłady na eksploatację dzięki prowadzeniu procesu utrzymania na podstawie rzeczywistego stanu technicznego urządzeń.

Parametr zasobów określa kompleksową, ilościową charakterystykę rzeczywistego stanu technicznego urządzeń. Opracowano model matematyczny zmniejszania się zasobów energetycznych w zależności od warunków eksploatacji. Przedstawiono obliczenia utraty zasobów transformatora przy różnych temperaturach pracy występujących w eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** zasilanie trakcyjne, podstacja trakcyjna, urządzenia elektroenergetyczne, obsługa techniczna i remont, rzeczywiste zasoby, utracone zasoby, pozostające zasoby, model matematyczny, kompleksowy wskaźnik oceny zasobu

## **Mathematical Model of Integral Index of the Loss of Resources of Power Electric Equipment of Traction Substation in Operation**

### **Summary**

The theoretical basis and methodological support solution of actual scientific and technical problems of the quality and efficiency of maintenance and repair is formed and further developed by providing an assessment the resource power electric of traction substations of railways in operation.

Methods of forecasting of a residual resource are improved. They allow making scientifically based conclusions about the possible timing of the extension of operation of power electric of traction substations and thus providing a reasonable frequency and amount of recovery of wear throughout the life cycle, and reduce operating costs through the use of service based on the actual technical state. The parameter a technical resource is viewed as an integral quantitative characteristic of the actual state of the electrical equipment.

The mathematical model for evaluating operation of electrical power resource, taking into account its operation modes is developed. Calculation of the expense of the resource transformer for different temperature operating conditions when exposed to operational factors is done.

**Keywords:** power supply, traction substation, power supply equipment, maintenance and repair, actual resource, actual working resource, residual resource, mathematical model, integrated indicator of resource estimation