

А.А. САХНО, аспирант ЗНТУ, Запорожье

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА
330-750 КВ С БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ КОН-
ДЕНСАТОРНОГО ТИПА**

В статті розглянуто результати розробки математичної моделі прогнозу залишкового ресурсу трансформаторів струму 330-750 кВ з конденсаторною ізоляцією. Модель ґрунтується на теоретичному законі розподілу Гомпертцу та моделі пропорційних інтенсивностей Коксу, для використання у складі систем безперервного контролю характеристик головної ізоляції.

В статье описаны результаты разработки математической модели прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа. Модель основывается на теоретическом законе распределения Гомпертца и модели пропорциональных интенсивностей Кокса, для применения в системах непрерывного контроля.

Введение. Прогнозирование остаточного ресурса высоковольтного оборудования является частью решения важнейшей задачи повышения технической устойчивости электрических машин и аппаратов и электротехнических комплексов в целом и имеет важное практическое значение. Проблема прогноза и оценки текущего остаточного ресурса (ОР) стала актуальна в связи со старением парка электрооборудования. В Украине, на подстанциях 220 кВ и выше, около 50 % оборудования отработало свой номинальный ресурс, темпы замены оборудования соизмеримы с темпами его старения, однако, основная часть этого оборудования имеет достаточно высокие коэффициенты запаса прочности. Поэтому встает вопрос об оценке реального ресурса аппарата и прогноза его показателей надежности на ближайшие периоды для планирования технического обслуживания и капитальных расходов. Важной задачей является снижение эксплуатационных расходов на оборудование за счет перехода от устаревшей системы технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) к системе обслуживания по реальному техническому состоянию. Внедрение непрерывной автоматизированной диагностики и прогноза ОР является важным этапом в создании интеллектуальных электроэнергетических систем и "необслуживаемых" подстанций. В данной статье авторами представлены основные

результаты разработки модели прогноза ОР измерительных трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа (БМКИ).

Исследователи, сделавшие немалый вклад в развитие теории моделирования надежности электрооборудования, как правило, используют в своих работах экспоненциальные модели и модели на основе закона распределения Вейбулла для определения эксплуатационной вероятности безотказной работы [1, с. 53, 2, с. 57]. Основным его свойством является то, что вероятность безотказной работы не зависит от событий, произошедших с оборудованием в предыдущем периоде работы, а зависит только от рассматриваемого интервала времени. Такой подход не совсем корректен. Вопросы о недостатках классических моделей, в связи с отсутствием в них учета влияния эксплуатационных факторов на оборудование, поднимаются современными отечественными и зарубежными авторами [3, 4]. Вопросы прогнозирования остаточного ресурса ТТ в эксплуатации не достаточно исследовались учеными, в основном существующие работы посвящены прогнозу ресурса силового трансформаторного оборудования, как наиболее дорогостоящего или прогнозу ОР электротехнического оборудования в целом [5]. Недостатком многих моделей является отсутствие учета влияния режимов эксплуатации и то, что они не позволяют дать количественную оценку остаточному ресурсу ТТ.

Цель и задачи исследования. Усовершенствование существующей системы диагностики на основе разработки методики непрерывной диагностики и прогноза остаточного ресурса основной изоляции высоковольтных ТТ под рабочим напряжением, для современных микропроцессорных систем автоматизированного непрерывного контроля состояния высоковольтных ТТ, с целью выявления текущих неисправностей и прогнозирования их состояния, для повышения технической устойчивости электротехнических систем, обеспечения возможности перехода к системе ТОиР по реальному техническому состоянию оборудования и создания «необслуживаемых» подстанций и интеллектуальных электроэнергетических сетей.

Моделирование остаточного ресурса измерительных трансформаторов тока. Для создания адекватных моделей прогноза ОР ТТ требуются базы данных измерений всех значимых диагностических параметров и отказов по статистически значимой выборке ТТ, причем базы должны вестись автоматически для исключения ошибок и влияния человеческого фактора. На данный момент такие базы данных отсутствуют, поэтому их создание в будущем позволит существенно

уточнить разработанную. В проделанной работе использовалась база данных периодического контроля состояния всех ТТ 330-750 кВ одной их энергосистем (ЭС) Украины. В базе, сотрудниками службы диагностики ЭС, собиралась информация о ТТ установленных начиная с 1963 года при этом данные о диагностике в базу вводились только с 1989 года, причем для некоторых единиц эта дата может быть более поздняя. В базе присутствуют только данные о ТТ которые были в эксплуатации по состоянию на 2001 год, база заканчивается 2008-м годом. Таким образом, отсутствуют сведения:

- о трансформаторах, которые были установлены и отказали до 2001 года;
- диагностическая информация о ТТ до 1989 года (на некоторых ТТ год может колебаться);
- о находящихся в эксплуатации трансформаторах тока по состоянию на 2008 г. и полученные после 2008 года.

Согласно математической терминологии такие данные называются ограниченными слева и цензурированными справа. Объем выборки составлял 565 единиц ТТ 330-750 кВ. При этом ТТ были разбиты на 5 групп (табл. 1). Двухкаскадные ТТ (рымовидные 750 кВ) – рассматриваются при расчетах как два трансформатора.

Таблица 1 – Характеристика групп исследуемой выборки ТТ

Код группы	Описание группы	Сред. длит. эксплуатации, лет	Стандарт. отклон. сред. длит. эксплуата-ции	Кол-во наблю-дений	Кол-во цензу-рованных на-блюдений	Всего
Tog	SF ₆	0.5	1.112	8	14	22
Tfrm_n	P ¹ – H ²	34.0	6.773	10	19	29
Tfrm_g	P – Г ³	20.0	7.369	7	312	319
tfum_g	У ⁴ – Г	16.0	7.377	5	97	102
tfum_n	У – H	35.0	8.624	28	65	93
Всего		21.0	9.848	58	507	565

Примечания:

1 – рымовидная вторичная обмотка, 2 – негерметичный, 3 – герметичный, 4 – U-образная первичная обмотка, SF₆ – элегазовая основная изоляция.

В 57 наблюдениях, что составляет около 10 % от всей выборки, отсутствовали значения некоторых ковариат, и они были замещены медианой значений, полученных от ТТ с полными данными. Отказами

считались авария аппарата или его отбраковка и отказ от дальнейшей эксплуатации по причинам неудовлетворительных результатов "оффлайн" диагностики. Группа ТТ с элегазовой изоляцией (tog) малочисленна и опыт эксплуатации данного типа ТТ статистически не значителен, это связано с тем, что элегазовые ТТ только начали использоваться для опытной эксплуатации в начале 2000-х годов в отечественных сетях, поэтому данная группа ТТ не будет участвовать в дальнейших расчетах по построению модели прогноза. Таким образом модель ограничивается только ТТ 330-750 кВ с БМКИ. Все расчеты по обработке экспериментальных данных выполнялись в пакете STATISTICA 6.0 с использованием модуля Survival Analysis.

Прогнозировании времени отказа. При прогнозировании времени отказа особую актуальность приобретает выяснение того, являются ли выбранные в гипотезе диагностические критерии связанными с временами эксплуатации трансформаторов тока. При наличии такой зависимости рассчитывается подходящая математическая модель и оцениваются значения ее параметров. Такую модель проблематично строить при помощи классической множественной регрессии по нескольким причинам. Во-первых, времена жизни не являются нормально распределенными. Во-вторых, имеется проблема с цензурированными, т.е. незавершенными наблюдениями, т.е. с теми отказ или отбраковка которых не произошла до 2008 года. Проведенные в работе расчеты по каждой группе ТТ подтверждают, что наиболее точно эмпирическим данным соответствует теоретическое распределение интенсивностей отказов Гомпертца и Вейбулла. Закон Гомпертца-Мейкема позволяет учесть влияние на надежность оборудования как случайных факторов, так и "износных" явлений [6]. Закон Вейбулла предполагает, что все ТТ на начальном этапе эксплуатации находятся в идеальном состоянии, однако это не так, вследствие несовершенства производства, основная изоляция ТТ с БМКИ всегда имеет ряд дефектов, которые усиливаются под воздействием времени и эксплуатационных воздействий поэтому. При построении модели, отказы, произошедшие по причине форс-мажорных обстоятельств (буря, взрыв соседнего оборудования), а также по вине человеческого фактора не учитывались как отказы. Они носят случайный характер, учесть который в прогнозе не возможно, поэтому из закона Гомпертца-Мейкема выпадает слагаемая отвечающая за случайные обстоятельства, и остается чистый закон Гомпертца. В обоих законах распределения Гомпертца и Вейбулла интенсивность отказов может увеличиваться и уменьшаться с течением времени, а также частным случаем обоих за-

конов является экспоненциальная модель распределения, поэтому они во многом схожи.

В работе предлагается использовать модель пропорциональных интенсивностей Кокса, это наиболее общая регрессионная модель, поскольку она не связана с предположениями относительно распределения времени выживания. Модель предполагает, что процесс износа ресурса происходит независимо от эксплуатационных воздействий. Далее предполагается, что вероятность отказа в любой момент времени рассчитывается из значения, зависящего от времени (процесса старения) и коэффициента (зависящего от параметров воздействия на ТТ). Модель некумулятивная, т.к. рассчитывает мгновенный риск отказа [8]. В случае с ТТ, модель не должна быть кумулятивной, т.к. диагностические критерии введенные в модель являются кумулятивной оценкой текущего состояния изоляции отражая в себе весь период эксплуатации ТТ. Расчет ОР, т.е. прогноз времени отказа, базируется на предположении, что дальнейший износ ресурса будет происходить только из-за старения. После аварийного воздействия, значения критериев изменяются, при этом значения ОР должно пересчитываться, поэтому модель должна применяться только в составе системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции ТТ. Так как стандартная ошибка оценки функции вероятности безотказной работы (ВБР) на порядки ниже самой оценки, то именно функция ВБР используется для прогностических целей. Предложенная модель предполагает, что функция ВБР имеет некоторый уровень, являющийся функцией независимых переменных. В ходе проведенной систематизации литературных источников и оценки возможности контроля в процессе эксплуатации, были выбраны следующие критерии, в качестве независимых переменных: тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции ($\text{tg}\delta_1$), изменение емкости основной изоляции (ΔC_1), изменение $\text{tg}\delta_1$ ($\Delta \text{tg}\delta_1$), скорость изменения $\text{tg}\delta_1$ ($v_{\text{tg}\delta_1}$), коэффициент температурной зависимости $\text{tg}\delta_1$ (α). Таким образом выдвигается гипотеза о связи $\text{tg}\delta_1$, ΔC_1 , $\Delta \text{tg}\delta_1$, $v_{\text{tg}\delta_1}$, α и количества лет в эксплуатации (t_e) с ОР (R_o) изоляции трансформаторов тока 330-750 кВ. При этом все диагностические критерии являются прогностическими для долгосрочного прогноза вероятности отказа ТТ. Параметр ΔC_1 является мгновенным признаком частичного отказа и служит прогнозом предстоящего взрыва ТТ, его связь с отказом аппарата установлена и в подтверждении не нуждается.

Модель для расчета мгновенной ВБР может быть и записана в следующем виде:

$$S(t, (\text{tg}\delta_1, \Delta \text{tg}\delta_1, v_{\text{tg}\delta_1}, \alpha))=$$

$$= S_0(t) \exp(b_1 \cdot \text{tg}\delta_1 + b_2 \cdot \Delta \text{tg}\delta_2 + b_3 \cdot v_{-} \text{tg}\delta_3 + b_4 \cdot \alpha) \quad (1)$$

где $S(t, (\text{tg}\delta_1, \Delta \text{tg}\delta_1, v_{-} \text{tg}\delta_1, \alpha))$ – результирующая интенсивность, при заданных для соответствующего наблюдения значениях ковариат, $S_0(t)$ – базовая функция интенсивности, она равна интенсивности в случае, когда все независимые переменные равны нулю.

Для оценки адекватности модели вычисляется значение критерия как функции логарифма правдоподобия для модели со всеми оцененными параметрами (L_1) и логарифма правдоподобия модели, в которой все ковариаты обращаются в 0 (L_0). Если величина χ^2 статистически значима (уровень значимости $p < 0,05$), отвергается нулевая гипотеза и принимается, что независимые переменные значимо влияют на время жизни. Так как анализ стратифицированный (выборка ТГ разбита на группы по конструктивному признаку), то в ходе анализа проверяется гипотеза о том, что одна и та же регрессия является подходящей для разных групп ТГ, то есть зависимость между выживаемостью и регрессорами одна и та же для разных групп данных [9, с. 546]. Программа Statistica рассчитывает модель по итерационному методу оценивая параметры, которые максимизирует логарифмическую функцию правдоподобия регрессионной модели посредством метода Ньютона-Рафсона [9, с. 556].

Таблица 2 – Результаты оценки модели

Параметр	Значение
Кол-во наблюдений	543
Цензурированных	495 (91.16%)
Полных	48 (8.84%)
L_1	-159,909
L_0	-181,368
χ^2 (Null model - final solution)	42,91737
Число степеней свободы	4
Уровень значимости (p)	0,000001

В работе [3] предлагается оценка уровня достоверности модели Кокса, по формуле:

$$R^2 = 1 - \exp\left(\frac{2}{N} \cdot (L_0 - L_1)\right),$$

где N – число периодов времени при расчете модели, $N = 44$.

Подставив $R^2 = 0,62$, модель Кокса применима к исследуемым данным [3].

Из табл. 2 видно, что значение χ^2 (Chi-Square) статистически зна-

чимо (уровень значимости 0,000001, что существенно меньше 0,05), поэтому можно сделать вывод, что некоторые диагностические критерии связаны с выживаемостью ТТ.

В табл. 3 приведены результаты расчета модели:

- Beta – приведены оценки параметров (коэффициенты при соответствующих переменных в регрессионном уравнении),
- SE – стандартные ошибки,
- значения t -критерия, (отношение соответствующих элементов первого и второго столбца), значимыми считаются параметры с $t > 2.0$.
- p – уровень значимости (значимы при $p < 0,05$).

Выдвинутая гипотеза подтверждается.

Таблица 3 – Результаты расчета модели

	Beta	SE	t-value	p
tg δ 1	4,09973	1,141208	3,592444	0,000328
v_ tg δ 1	8,26857	3,992332	2,071114	0,038356
α	23,52839	8,749141	2,689223	0,007166
Δ tg δ 1	2,21677	1,039463	2,132611	0,032964

Согласно формуле (1) необходимо получить базовую функцию ВБР для каждой группы. Рассчитывается в модуле Survival Analysis пакета STATISTICA 6.0 по методу наименьших квадратов с разными весами, выбираются данные с весами, кривая которых наиболее точно соответствует эмпирическим данным. Полученные данные аппроксимировались для автоматизации модели.

Для определения ОР ТТ при помощи полученной модели рассчитывается вероятность безотказной работы для каждого ТТ в исследуемой выборке. Модель предполагает, что ковариаты одинаково влияют на остаточный ресурс ТТ разных групп и, что каждая группа имеет свою базовую функцию ВБР зависящую от времени. В модели, при определении отклонений от базового ВБР, используется средние значения tg δ ₁ = 0,32 и α = 0,01, так как эти ковариаты не равняются нулю, даже у новых ТТ с БМКИ, при отрицательных отклонениях значения tg δ ₁ принимается равным нулю т.к. такое отклонение от среднего не свидетельствует о лучшем состоянии ТТ чем базового. Для расчета остаточного ресурса выбирается следующее граничное значение функции ВБР по группам: tfrm_g: 0,73, tfrm_n: 0,26, tfum_g: 0,64, tfum_n: 0,36. Значения, являются средним между нижними границами доверительных интервалов для усеченных и полных наблюдений по каждой группе, т.к. имеющиеся данные – данные по периодическому

контролю, и решение о выводе ТТ принимались с учетом того, что ТТ может отказать до следующего контроля, в то время как на самом деле он будет продолжать безотказную работу со снижением вероятности безотказности. Выбор таких граничных значений допустим только при непрерывном контроле, когда ОР будет корректироваться в реальном масштабе времени. Таким образом, получается, что оборудование может продолжать свою эксплуатацию, если ВБР его на прогнозируемом интервале менее указанных значений и оборудование отбраковывается, если вероятность отказов более этих значений. Эти величины могут быть уточнены при получении достаточного опыта в эксплуатации подобных систем или нормативными документами в конкретных энергосистемах. Далее используя разработанную модель производился расчет ОР для анализируемой выборки из 543 трансформаторов тока. Анализ случаев прогноза высокого ОР показал, что модель не может адекватно предсказать ресурс ТТ выведенных по причине: течи масла (повреждения фарфоровой крышки) и низкого сопротивления последних слоев изоляции (можно зафиксировать непрерывным измерением проводимости изоляции или методом предложенным в [10], после накопления опыта его использования).

Таблица 4. Прогноз по группе отказавших ТТ

Характер-ка состояния	Отказ.,шт.	Усеч., шт.
Отработали ресурс	24	20
ОР на грани отработки	5	17
ОР от 5 до 10 лет	1	49
ОР более 10-ти лет	18	409
Всего	48	495

Система правильно отбраковывала ТТ с повышенным $\text{tg}\delta_1$ основной изоляции с повышенным $\text{tg}\delta$ масла, с повышенным газо- влажно- содержанием масла. По данным прогноза, в энергосистеме работает 7% (37 шт.) ТТ требующих обследования.

Выводы. Ухудшение технического состояния основной изоляции ТТ происходит непрерывно, как при работе в номинальных, так и в аварийных и недогруженных режимах. Разработанная модель учитывает, что процесс износа происходит в разных режимах работы с разной интенсивностью. В работе был осуществлен выбор диагностических критериев выдвинута гипотеза о их связи с показателями надежности ТТ. Рассчитаны функции вероятности безотказной работы на основе распределения по закону Гомпертца, который наиболее точно соответствует эмпирическим данным, что было подтверждено в рабо-

те. Впервые, разработана модель количественной оценки остаточного ресурса ТТ. Модель предполагает расчет остаточного ресурса при сохранении значений ковариат во всем прогнозируемом периоде, поэтому ее применение возможно только в составе СНК изоляции ТТ.

Список информационных источников. 1. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике: Учеб. пособие для вузов / Гук Ю.Б. – Л.: Энергоатомиздат. – 1990. – 208 с. 2. Фокин Ю.А. Оценка надежности систем энергоснабжения / Фокин Ю.А., Туфанов В.А. // М.: Энергоатомиздат. – 1981. – 224 с. 3. Li Z. Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures / Zhiguo Li, Shiyu Zhou, Suresh Choubey, Crispian Sievenpiper // IEEE Transactions. – 2007. – Vol. 39. – Issue 3. – P. 303 – 315. 4. Андреев Д.А. Совершенствование методов расчета эксплуатационной надежности электрооборудования электростанций и подстанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.02 "Электростанции и электроэнергетические системы" / Д.А. Андреев. – Иваново, 2006. – 23 с. 5. Hong Y. Prediction of remaining life of power transformers based on left truncated and right censored lifetime data / Y.Hong, W.Q.Meeker J.D. McCalley // Annals of Applied Statistics. – 2009. – Vol. 3. – No. 2. – P. 857-879. 6. Смородов Е.А. Методы повышения надежности и эффективности технологического и энергетического оборудования в процессе добычи и транспорта нефти и газа: автореф. дис. ... доктора техн. наук: спец. 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы", 05.26.03 "Пожарная и промышленная безопасность" (нефтегазовая отрасль) / Е.А. Смородов. – Уфа, 2004. – 47 с. 7. Bartley W.H. Analysis of Transformer Failures / William H. Bartley // Int. Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, Stockholm, 2003. – Режим доступа: www.bpjglobal.net/eng/knowledge-center/download.aspx?id=191. 8. Cox D.R. Regression Models and Life-Tables / D.R. Cox // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). – 1972. – Vol. 34. – No. 2. – P. 187-220. 9. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. / Боровиков В. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с. 10. Яцейко А.Я. Диагностика изоляции высоковольтных трансформаторов струму під робочою напругою: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец.: 05.14.02 – "Електричні станції, мережі і системи" / Яцейко А.Я. – К., 2008. – 18 с.



Сахно Александр Анатольевич, аспирант ЗНТУ. Защитил диплом инженера в ЗНТУ по специальности электрические машины и аппараты в 2004 г. Ведущий специалист отдела АСУТП ООО "Энергоавтоматизация" с 2005 г. Научные интересы связаны с проблемами диагностики состояния высоковольтных аппаратов под рабочим напряжением в режиме эксплуатации.

Поступила в редколлегию 30.09.2010