

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

НАЗАРЫЧЕВ А.Н., д-р техн. наук

Рассмотрены принципы, критерии и модели управления техническим состоянием электрооборудования в процессе эксплуатации. Предложен критерий оценки эффективности управления ресурсом электрооборудования. Для силовых трансформаторов и высоковольтных выключателей приведены примеры расчета параметров режима эксплуатации, с целью управления их техническим состоянием.

Ключевые слова: электрооборудование, техническая эксплуатация, остаточный ресурс.

PRIMARY PRINCIPLES AND MANAGEMENT CRITERIA OF ELECTRICAL EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION

NAZARYCHEV A.N., Ph.D.

The article concerns principles, criteria and management models of electrical equipment technical condition in operation. The evaluation criterion electrical equipment working life management efficiency is suggested. There are examples of maintenance mode parameters calculations for their technical condition management for power transformers and high voltage switches.

Key words: electrical equipment, technical maintenance, remaining life.

Для управления техническим состоянием (ТС) электрооборудования электрических станций и сетей разработаны правила технической эксплуатации (ПТЭ) [1], в которых изложены основные организационные и технические требования к эксплуатации энергетических объектов. Выполнение требований ПТЭ обеспечивает экономичную, надежную и слаженную работу электрооборудования электроэнергетических систем. Являясь отраслевым стандартом, ПТЭ строятся на основе принятой в энергетике концепции, определяющей цели, принципы и критерии управления, а также организационные формы и применяемые технические средства.

В общем виде цель управления ТС электрооборудования в современных условиях можно сформулировать следующим образом: обеспечение заданного уровня надежности и эффективности функционирования при минимальных затратах на эксплуатацию. Достижение этой цели позволит обеспечить решение ряда стратегических задач [2] электроэнергетики: надежное электроснабжение экономики и населения страны электроэнергией; сохранение целостности и развитие единой энергетической системы страны; повышение эффективности функционирования и обеспечение устойчивого развития электроэнергетики на базе новых современных технологий; снижение вредного воздействия энергетики на окружающую среду.

Таким образом, основным принципом новой технологии управления ТС электрооборудования является обеспечение надежности функционирования энергетических объектов, основанное на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями ТС оборудования в процессе эксплуатации. Общая проблема совершенствования системы технической эксплуатации электрооборудования включает в себя решение следующих задач [3]:

1) оптимальную организацию диагностики и контроля ТС электрооборудования; оценку и прогнозирование эксплуатационной надежности электрооборудования; оптимизацию сроков и объемов проведения технического обслуживания и ремонта;

2) выбор рациональной стратегии проведения технического обслуживания и ремонта; выбор стратегии управления состояниями процесса эксплуатации электрооборудования; планирование технического обслуживания и ремонта электрооборудования с учетом ТС.

Поэтому управление ТС электрооборудования в процессе эксплуатации может быть осуществлено как через управление режимами эксплуатации, управление показателями безотказности и долговечности, так и через непосредственное управление состояниями процесса эксплуатации путем изменения состояний работы, ремонта и резерва оборудования. В соответствии с целью, принципом и задачами управления запишем критерий управления $K(r)$ ТС электрооборудования за наработку r в векторном виде:

$$\overline{K}(r) = (\overline{F}(r), \overline{R}(r), \overline{P}(r), \overline{Z}(r), \overline{Y}(r)). \quad (1)$$

Компонент $F(r)$ критерия управления (1) показывает контролируемые средствами технической диагностики физико-химические параметры, их признаки и абсолютные отклонения, которые характеризуют изменение технического состояния электрооборудования за наработку r под воздействием тепловых, электрических, механических, химических и других факторов. Определение таких параметров осуществляется на основе их измерения штатными и специализированными средствами контроля. В число этих параметров входят электрические параметры (ток, напряжение, сопротивление и др.), температура (сборочных единиц, изолирующих и охлаждающих сред), расход, давление, вибрация, виброакустические параметры и ультразвук, интенсивность электромагнитных излучений, интенсивность инфракрасного излучения, продукты пиролиза и износа в изолирующих и охлаждающих средах, хроматографические данные и т.д.

Компонент $R(r)$ представляет собой интегральную характеристику ТС – фактический сработанный ресурс электрооборудования в объеме наработки r , который характеризует долговечность оборудования и вычисляется согласно разработанным математическим моделям [6].

Компонент $P(r)$ представляет собой вероятность безотказной работы электрооборудования в объеме наработки r , характеризует безотказность оборудования и вычисляется согласно разработанным моделям [4].

Компонент $Z(r)$ представляет собой суммарные ремонтно-эксплуатационные затраты на техническую диагностику, техническое обслуживание и ремонт электрооборудования за наработку r [3]. Значение затрат $Z(r)$ показывает, насколько эффективно принятая система эксплуатации, технического обслуживания и ремонта обеспечивает применение электрооборудования по назначению. Кроме того, значение затрат $Z(r)$ показывает, какую долю занимают ремонтно-эксплуатационные расходы в общей структуре затрат.

Решение задач оптимизации ремонта электрооборудования энергообъектов с учетом ТС и определение предельных сроков его сверхнормативной эксплуатации на основе анализа ремонтно-эксплуатационных затрат $Z(r)$ приведено в работах [3, 4, 5].

Компонент $Y(r)$ критерия управления (1) представляет собой матрицу управления состояниями процесса эксплуатации группы технологически взаимосвязанного электрооборудования за наработку r . Матрица управления устанавливает взаимосвязь между состояниями процесса эксплуатации (ремонт, резерв, работа) электрооборудования одной технологической группы в соответствии с его ТС. Матричный метод управления состояниями процесса эксплуатации электрооборудования описан в [3].

Для управления ТС используют различные стратегии управления технической эксплуатацией электрооборудования. Правило, однозначно устанавливающее выбор управляющего (ремонтного) воздействия на электрооборудование в течение всего времени его эксплуатации, принято называть стратегией управления. Под управляющим воздействием понимаются работы по техническому обслуживанию, диагностированию, текущему, среднему и капитальному ремонту. Известны три основные стратегии управления.

1. *Стратегия аварийного управления*, при которой плановые работы не проводят, а аварийные восстановительные работы осуществляют лишь после отказа оборудования. Стратегия аварийного управления позволяет наиболее полно расходовать заложенный в оборудование ресурс, но она приводит к частым длительным остановкам технологических процессов, что наносит большой ущерб и приводит к значительным затратам на аварийно-восстановительный ремонт. Поэтому в энергетике эта стратегия может применяться только для неотвеченного оборудования, отказ которого не сопровождается потерей генерирующих мощностей и не нарушает ритма производственного процесса.

2. *Стратегия управления по регламенту*, согласно которой управляющие воздействия проводят периодически в плановые сроки, независимо от технического состояния оборудования, а в случае его отказа осуществляют восстановление или замену. Оборудование эксплуатируется до сработки заранее

определенного межремонтного ресурса. Величина межремонтного ресурса определяется для группы однотипного оборудования по статистическим данным и не учитывает реальных условий и режимов эксплуатации конкретного оборудования. По истечении установленного срока службы оборудование либо снимается с эксплуатации, либо направляется на восстановительный ремонт.

3. *Стратегия управления по ТС*, когда управляющие воздействия проводят с учетом фактического состояния оборудования, определяемого методами технической диагностики, осуществляемой путем непрерывного или дискретного контроля за изменением физико-химических параметров оборудования, определяющих его работоспособность. Оборудование эксплуатируется до тех пор, пока эти параметры не достигли предельного (с точки зрения надежности) значения. После этого осуществляется предупредительный ремонт, объем которого соответствует ТС оборудования. Это позволяет более полно использовать технический ресурс и обеспечить надежную работу электрооборудования при минимальных затратах. Такая стратегия эффективна при эксплуатации сложного оборудования, ремонт которого связан с большими затратами. Однако целесообразность внедрения стратегии управления по ТС должна определяться технико-экономическими расчетами.

В практике эксплуатации электрооборудования в той или иной степени применяют все описанные стратегии управления. Учитывая, что характерной особенностью эксплуатации электрооборудования является все более широкое применение методов технической диагностики, целесообразно разработать подходы по использованию ее результатов для управления ТС электрооборудования в процессе эксплуатации.

Необходимость использования методов и средств технической диагностики вызвана тем, что появляется перспектива раннего обнаружения и своевременного устранения дефектов в оборудовании. Для этого необходимо вести измерения или осуществлять контроль физико-химических параметров, характеризующих изменение свойств оборудования в процессе эксплуатации. Однако современное состояние измерительной техники и технологий контроля не всегда позволяет прогнозировать развитие дефекта. Кроме того, неясен физический механизм возникновения ряда дефектов. Поэтому количественная оценка ТС на основе определения фактического сработанного ресурса с учетом совокупности воздействующих факторов является сегодня наиболее приемлемым и результативным направлением использования результатов диагностирования. Выражения определения нормативного и фактического остаточного ресурса электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов имеют вид [6]:

$$R_{0,ocm}^* = 1 - R_{cp}^* \quad (2)$$

$$R_{ocm}^* = R_{0,ocm}^* - \sum_{j=1}^K \int_0^{R_j^*} \left[R_j^* e^{-\left(\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{(X_{i_T}^*)^{j-1}}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_{\Xi}=1}^{N_{\Xi}} \frac{(X_{i_{\Xi}}^*)^{j-1}}{\Delta X_{i_{\Xi}}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{(X_{i_M}^*)^{j-1}}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{(X_{i_X}^*)^{j-1}}{\Delta X_{i_X}^*} \right) dr} - R_j^* \right] \quad (3)$$

где R_0^* – нормативный ресурс электрооборудования; $i_T = 1 \dots N_T$, $i_\Theta = 1 \dots N_\Theta$, $i_M = 1 \dots N_M$, $i_X = 1 \dots N_X$ – количество тепловых, электрических, механических, химических факторов; $X_{i_T}^*$, $X_{i_\Theta}^*$, $X_{i_M}^*$, $X_{i_X}^*$ – величина i_T -го теплового, i_Θ -го электрического, i_M -го механического, i_X -го химического факторов; $\Delta X_{i_T}^*$, $\Delta X_{i_\Theta}^*$, $\Delta X_{i_M}^*$, $\Delta X_{i_X}^*$ – отклонение i_T -го теплового, i_Θ -го электрического, i_M -го механического, i_X -го химического факторов; R_j^* – интервал наработки; K – количество рассматриваемых интервалов R_j^* .

После того как электрооборудование отработало фактический сработанный ресурс R_{cp}^* , по формуле (2) можно определить нормативный остаточный ресурс $R_{0,ocm}^*$, т.е. величину наработки, которую электрооборудование сможет отработать при его дальнейшей эксплуатации в нормативных условиях.

Зная величину нормативного остаточного ресурса $R_{0,ocm}^*$, можно решить обратную задачу, которая заключается в следующем: необходимо найти такие X_j^* , при которых данная единица оборудова-

$$R_{0,ocm}^* = R_{ocm,mp}^* - \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{X_{i_T,j-1}^*}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_\Theta=1}^{N_\Theta} \frac{X_{i_\Theta,j-1}^*}{\Delta X_{i_\Theta}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{X_{i_M,j-1}^*}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{X_{i_X,j-1}^*}{\Delta X_{i_X}^*}} dr^* - R_j^* \right). \quad (4)$$

Варьируя значениями эксплуатационных факторов X_j^* на j -х интервалах, добиваемся выполнения тождества (5). Значения полученных при этом факторов X_j^* являются искомыми величинами для управления режимом эксплуатации электрооборудования на интервале наработки в объеме $R_{ocm,mp}^*$.

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \left(\int_0^{R_j^*} e^{\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{X_{i_T,j-1}^*}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_\Theta=1}^{N_\Theta} \frac{X_{i_\Theta,j-1}^*}{\Delta X_{i_\Theta}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{X_{i_M,j-1}^*}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{X_{i_X,j-1}^*}{\Delta X_{i_X}^*}} dr^* - R_j^* \right), \quad (5)$$

где R^* – фактический сработанный ресурс электрооборудования.

Отметим, что разность в скобках в выражении (5) является величиной превышения фактического сработанного ресурса над величиной R_j^* . Обозначим ее

$\Delta R_{узб,j}^*$. Тогда формула (5) примет вид

$$\Delta R_{узб,j}^* = \int_0^{R_j^*} e^{\sum_{i_T=1}^{N_T} \frac{X_{i_T,j-1}^*}{\Delta X_{i_T}^*} + \sum_{i_\Theta=1}^{N_\Theta} \frac{X_{i_\Theta,j-1}^*}{\Delta X_{i_\Theta}^*} + \sum_{i_M=1}^{N_M} \frac{X_{i_M,j-1}^*}{\Delta X_{i_M}^*} + \sum_{i_X=1}^{N_X} \frac{X_{i_X,j-1}^*}{\Delta X_{i_X}^*}} dr^* - R_j^*, \quad (7)$$

Причем если $\Delta R_{узб,j}^* < 0$, то условия эксплуатации на интервале R_j^* облегчены; если $\Delta R_{узб,j}^* > 0$, то условия эксплуатации на интервале R_j^* утяжелены; если

наработает $R_{ocm}^* > R_{0,ocm}^*$ при известном значении $R_{0,ocm}^*$. При этом имеется возможность облегчить режим работы по нескольким факторам X_j^* на отдельных j -х интервалах наработки. Встает вопрос, каковы должны быть значения этих факторов X_j^* , чтобы оборудование отработало наработку в объеме R_{ocm}^* . Таким образом, необходимо рассчитать режим эксплуатации электрооборудования с учетом требуемой величины наработки.

Для решения поставленной задачи воспользуемся выражением (3), приняв в нем $R_{ocm}^* = R_{0,ocm}^*$, а $R_{0,ocm}^* = R_{ocm,mp}^*$, где $R_{ocm,mp}^*$ – требуемое значение остаточного ресурса. Электрооборудование физически не может сработать фактический ресурс, больший чем $R_{0,ocm}^*$. Поэтому в качестве фактического остаточного ресурса R_{ocm}^* необходимо подставлять $R_{0,ocm}^*$, а вместо $R_{0,ocm}^*$ – требуемое значение реального (соответствующего нормативным условиям эксплуатации) ресурса $R_{ocm,mp}^*$. В результате получим

Другой важной задачей при управлении ТС оборудования является оценка эффективности его эксплуатации. Для получения критериев эффективности эксплуатации оборудования рассмотрим выражение [6]

$$R^* = R_0^* + \sum_{j=1}^K \Delta R_{узб,j}^*, \quad (6)$$

где

$\Delta R_{узб,j}^* = 0$, то условия эксплуатации на интервале R_j^* соответствуют нормативным.

Найдем отношение

$$c = \frac{R^*}{R_0} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^K \int_0^{R_j^*} e^{\sum_{i=T=1}^{N_T} \frac{(X_{iT}^*-1)}{\Delta X_{iT}^*} + \sum_{i=3=1}^{N_3} \frac{(X_{i3}^*-1)}{\Delta X_{i3}^*} + \sum_{i=M=1}^{N_M} \frac{(X_{iM}^*-1)}{\Delta X_{iM}^*} + \sum_{i=X=1}^{N_X} \frac{(X_{iX}^*-1)}{\Delta X_{iX}^*}}{dr - R_j^*}}{R_0^*} \quad (8)$$

где c – это характеристика оптимальности эксплуатации электрооборудования.

Если $R_0^* = 1$ о.е., то (7) принимает вид выражения (3).

Если $c > 1$, то оборудование работает не в оптимальных для него, утяжеленных условиях. Если задать максимальное отклонение величины c от 1 (например, 5%), то величина этого отклонения будет определять возможность использования данного электрооборудования при воздействии эксплуатационных факторов. Его величина определяется из технико-экономического обоснования, которое может осуществляться на стадии проектирования конкретного энергообъекта.

Если $c < 1$, то электрооборудование эксплуатируется в облегченном режиме и имеет запас ресурса, который может быть использован для продления его эксплуатации. В этом случае величина отклонения может выбираться намеренно при проектировании для учета неточности исходных данных, а также возможности дальнейшей реконструкции схемы энергообъекта, связанной с увеличением рабочих токов.

Значение $\Delta R_{узбj}^*$, полученное по (7), также может являться критерием оптимальности эксплуатации электрооборудования на отрезке наработки объемом R_j^* .

Причем если $\Delta R_{узбj}^* < 0$, то это равносильно выводам, сделанным для случая, когда $c < 1$, а если $\Delta R_{узбj}^* > 0$, то выводам для $c > 1$. Сумма $\sum \Delta R_{узбj}^*$ за наработку в объеме $\sum R_j^*$ также является критерием оптимальности эксплуатации электрооборудования, с такими же ограничениями, как и для $\Delta R_{узбj}^*$: $\sum \Delta R_{узбj}^* = 0$ – оптимальная эксплуатация; $\sum \Delta R_{узбj}^* < 0$ – облегченный режим эксплуатации; $\sum \Delta R_{узбj}^* > 0$ – утяжеленный режим эксплуатации.

Рассмотрим ряд примеров, поясняющих вышеприведенные рассуждения.

Пример 1. Предположим, что для трансформатора ТД-25000/110 при известном распределении температуры наиболее нагретой точки (ННТ) в течение срока эксплуатации при известном значении нормативного ресурса $R_0 = 25$ лет было получено значение фактически сработанного ресурса, равное $R = 21,2$ года. В этом случае $R_{0,ост} = 25 - 21,2 = 3,8$ года. Согласно формуле (8), эффективность эксплуатации может быть оценена с помощью коэффициента c , рассчитываемого в данном случае по формуле

$$c = \frac{R}{R_0} = \frac{21,2}{25} = 0,848 < 1.$$

Величина $c < 1$, что говорит об облегченных условиях эксплуатации и возможности дальнейшей эксплуатации данного трансформатора в течение 3,8 лет в нормативных условиях.

Предположим, что по некоторым причинам энергообъект, на котором установлен данный трансформатор, должен проработать не 3,8 года, а 5 лет. При этом имеет-

ся возможность облегчить его условия эксплуатации, а именно, температурный режим работы. Для этого необходимо составить карту режимов работы данного трансформатора. Воспользуемся формулой (4), выразив из нее температуру в о.е.:

$$\vartheta^* = \Delta \vartheta^* \ln \left(\frac{R_{0,ост} - R_{ост,мп}}{-R_{ост,мп}} + 1 \right) + 1;$$

$$\vartheta^* = 0,088 \ln \left(\frac{3,8 - 5}{-5} + 1 \right) + 1 = 0,976 \text{ о.е.}$$

Таким образом, температурный режим трансформатора должен быть облегчен всего лишь на $(1 - 0,976) \cdot 100 = 2,4\%$. Температура ННТ при этом составит $\vartheta_{ННТ} = 0,976 \cdot 98 = 96,65^\circ\text{C}$.

Пример 2. Предположим, что для выключателя ВБЭК-35-31,5/1600 УХЛ2, совершившего 21 коммутацию токов различной величины, были получены следующие значения фактического остаточного и сработанного ресурса: $R = 2142$ раз; $R_{0,ост} = 17858$ раз при $R_0 = 20000$ раз. По формуле (8) оценим эффективность эксплуатации данного выключателя за наработку в объеме 21 коммутации:

$$c = \frac{2142}{21} = 102,286 > 1.$$

Величина $c > 1$, что говорит об утяжеленных условиях эксплуатации.

Предположим, что по некоторым причинам энергообъект, на котором установлен данный выключатель, должен совершить не оставшиеся 17858 коммутаций нормативного тока, а всего лишь 10 коммутаций величиной, существенно превосходящей номинальный ток. Для этого необходимо определить средний уровень токов отключения. Воспользуемся формулой (4), выразив из нее ток в о.е.:

$$I^* = \Delta I^* \ln \left(\frac{R_{0,ост} - R_{ост,мп}}{-R_{ост,мп}} + 1 \right) + 1;$$

$$I^* = 2,87 \ln \left(\frac{17858 - 10}{-10} + 1 \right) + 1 = 22,489 \text{ о.е.}$$

Данный выключатель свободно сможет отключить ток, равный $1,6 \cdot 22,489 = 35,982$ кА. Таким образом, теоретически он может совершить 10 коммутаций тока величиной 35,982 кА.

Заключение

Разработанный нами подход к планированию режима эксплуатации электрооборудования и выведенное на основе модели комплексной оценки ТС условие оптимальности эксплуатации электрооборудования в течение всего срока службы может использоваться в целях повышения надежности его работы на интервале наработки требуемого объема.

Список литературы

1. **СО 153-34.20.501-2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ (ПТЭ).
2. **Энергетическая** стратегия России на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 28.08.2003 г. № 1234. – 118 с.
3. **Назарычев А.Н.** Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / Под ред. В.А. Савельева; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 168 с.
4. **Назарычев А.Н., Таджикибаев А.И.** Модели расчета эксплуатационной надежности и управления техническим состоянием электрооборудования. – СПб.: ПЭИПК, 2002. – 39 с.
5. **Назарычев А.Н., Таджикибаев А.И., Андреев Д.А.** Совершенствование системы проведения ремонтов электрооборудования электростанций и подстанций. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 64 с.
6. **Назарычев А.Н., Андреев Д.А.** Методика оценки фактического ресурса электрооборудования с учетом воздействия эксплуатационных факторов // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 6. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – С. 287–305.

Назарычев Александр Николаевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 38-57-94,
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru