

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЗАМЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ФАКТОРА НАДЕЖНОСТИ

В.Г. Китушин, Е.В. Иванова

Рассмотрена модель планирования затрат на ремонтное обслуживание оборудования электрических сетей, в основе которой лежит поддержание остаточного ресурса оборудования на оптимальном уровне. Предложены модель обоснования замены оборудования предприятия и алгоритм принятия решений, который четко определяет последовательность действий руководителя по управлению ремонтным обслуживанием и заменой оборудования электрических сетей.

Ключевые слова: ремонт, техническое перевооружение, реконструкция, затраты, надежность, технический ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Во всех отраслях экономики страны, в том числе и в энергетике, произошло и продолжает происходить существенное старение основных производственных фондов, что приводит к снижению качества продукции, надежности оказываемых услуг, снижению безопасности и техногенным кризисам в обществе. Замена этого оборудования требует значительных инвестиций, которые в полном объеме отсутствуют, а часть оборудования имеет еще достаточно высокий технический ресурс и может еще эксплуатироваться определенное время при соответствующих затратах на ремонтные воздействия. Существующие же модели технического обслуживания, ремонта и замены оборудования не отвечают современным требованиям рынка, вследствие этого появилась потребность поиска новых методов управления оборудованием. В мировой науке и практике уже много лет ведется проработка концепции управления активами (Asset Management), которая появилась именно как концепция реализации целостного подхода организации технического обслуживания и постепенно переросла в систему организации деятельности компаний в целом. В настоящее время и в России многие компании пришли к необходимости внедрения управления активами в свою деятельность, однако отраслевая специфика и недостаточная развитость информационной среды на предпри-

ятиях не позволяют воспользоваться классической теорией, что вызывает необходимость разработки на ее базе особых подходов и инструментария управления активами.

В статье решается задача планирования затрат на ремонтное обслуживание и замены оборудования электрических сетей и предлагается методика, в основе которой лежит концепция управления активами, предусматривающая оптимизацию затрат в течение жизненного цикла актива. Издержки минимизируются, начиная с момента первых инвестиций, в процессе эксплуатации и ремонтного обслуживания и заканчивая демонтажом актива.

Предлагаемая методика представляет собой порядок выработки решений, который четким образом определяет последовательность действий руководителя при управлении активами предприятия. Она рассматривает процессы ремонтного обслуживания и обновления производственных активов предприятия во взаимосвязи, и это одно из главных положений концепции управления активами. Методика предусматривает использование моделей, которые дают возможность минимизировать затраты на протяжении жизненного цикла оборудования, учитывать технологические риски, связанные с отказами оборудования, и позволяют проводить анализ не для одной единицы оборудования, а для определенной группы или даже в целом по предприятию (при наличии информации можно проводить анализ и для каждого объекта).



1. МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ОСТАТОЧНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ

В основе определения оптимального остаточного технического ресурса оборудования $R_{\text{опт}}$ лежит ряд предпосылок. На практике затраты на ремонтное обслуживание оборудования нередко не являются постоянной величиной, а с течением времени возрастают. Данная ситуация связана с жизненным циклом оборудования и частотой отказов, т. е. в процессе старения и износа оборудования частота отказов возрастает, и как следствие возрастают затраты на аварийный ремонт оборудования [1]. Поэтому необходимо найти баланс между затратами на проведение плановых и аварийно-восстановительных ремонтов, которые в свою очередь зависят от уровня надежности. Таким образом, оптимальный остаточный ресурс представляет собой уровень технического ресурса оборудования, задающий такое соотношение затрат на плановые и аварийные ремонты, при котором суммарные затраты на проведение ремонтов будут минимальны.

В качестве критерия оптимальности принимается минимум дисконтированных затрат:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T_a} a_t Z_t^{\text{рем}} + \sum_{t=1}^{T_a} a_t Z_t^{\text{ав}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_a — нормативный срок службы оборудования; $Z_t^{\text{рем}}$ — годовые затраты на плановый ремонт оборудования в t -м году, $Z_t^{\text{ав}}$ — годовые затраты на аварийные ремонты оборудования в t -м году, в данную составляющую включена также годовая компенсация ущерба потребителям из-за отказов оборудования в t -м году; a_t — коэффициент дисконтирования.

Для решения поставленной задачи были смоделированы рассмотренные далее взаимосвязи.

Затраты на аварийные ремонты и компенсация ущерба потребителям зависят от частоты отказов оборудования:

$$Z_t^{\text{ав}} = (z_t^{\text{ав}} + y)\omega_t, \quad (2)$$

где $z_t^{\text{ав}}$ — удельные затраты на аварийный ремонт в году t , y — компенсация ущерба потребителям из-за одного отказа оборудования, ω_t — частота отказов оборудования в году t , зависящая от остаточного технического ресурса оборудования.

В данной модели рассматриваются только отказы, связанные со старением и износом оборудования, поскольку именно эти отказы зависят от режима использования и ремонтного обслуживания оборудования.

Для установления связи между затратами на ремонт $Z_t^{\text{рем}}$ и надежностью оборудования ω_t воспользуемся двойной связью: между затратами на ремонт и остаточным техническим ресурсом, с одной стороны, и между ресурсом и частотой отказов, с другой.

Ресурс зависит от вложенных в оборудование затрат — от его стоимости, а если оно восстанавливаемое, то и от затрат на ремонты. Остаточный ресурс в момент времени t может быть рассчитан следующим образом [2, 3]:

$$R_t^{\text{ост}} = 1 - \left[\left(1 - \Phi_d + \sum_{i=1}^{T_a} \bar{Z}_i^{\text{рем}} \right) \left(1/T_a / \sum_{i=1}^t \Delta T_i \right)^{1/\alpha} - \sum_{i=1}^t Z_i^{\text{рем}} \right]^{\alpha}, \quad (3)$$

где Φ_d — относительная стоимость оборудования после демонтажа при эксплуатации T_a (в долях от первоначальной стоимости оборудования Φ_0),

$Z_i^{\text{рем}}$ и $\bar{Z}_i^{\text{рем}}$ — фактические и нормативные затраты на ремонтное обслуживание в i -м году в относительных единицах (отнесено к первоначальной стоимости оборудования Φ_0), ΔT_i — срабатывание ресурса в результате его использования в i -м году (размерность в годах; при нормальном использовании $\Delta T_i = 1$ год), α — показатель, характерный для каждого вида оборудования (для линейного оборудования $\alpha = 1$, для подстанционного $\alpha = 2/3$).

Связь между частотой отказов и остаточным ресурсом вытекает из определения понятия «интенсивность отказов», представляющую собой условную плотность вероятности возникновения отказа, определяемую для рассматриваемого времени при условии, что до этого момента отказ не возникает. Поскольку в модели рассматриваются только отказы, связанные со старением, то для описания используется нормальный закон:

$$\omega_t = \frac{f(X_t)}{\Phi(X_t)} \cdot \frac{1}{\sigma}, \quad (4)$$

где $f(X_t)$ — плотность вероятности нормального распределения, $\Phi(X_t)$ — интегральная функция нормального распределения, σ — среднеквадратическое отклонение времени до отказа от среднего значения (измеряется в годах), $X_t = (T_0 - t)/\sigma$ (безразмерная величина), где T_0 — среднее время до отказа (значение среднего ресурса без плановых ремонтов, измеряется в годах).

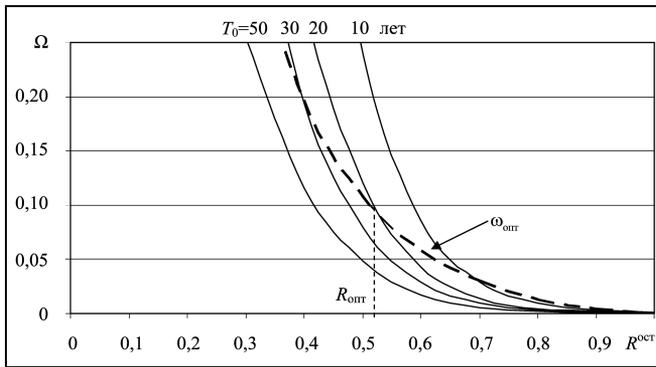


Рис. 1. Определение оптимального остаточного ресурса подстанционного оборудования при различных значениях T_0 и $y = 0$

Предполагая, что при нормальном использовании ресурс оборудования срабатывает равномерно, т. е. зависимость остаточного ресурса от времени линейная, то с учетом преобразований

$$X_t = \frac{R_t^{\text{ост}}}{R_{kt}^{\text{ост}}} \cdot \frac{T_0}{\sigma},$$

где $R_{kt}^{\text{ост}}$ — остаточный ресурс в начале работы оборудования после k -го ремонта (измеряется в относительных единицах, в случае, если ресурс оборудования после ремонта восстанавливается полностью, то $R_{kt}^{\text{ост}} = 1$).

Взаимосвязи таких показателей, как ресурс оборудования, частота отказов и затраты на ремонт позволяют таким образом учитывать в модели фактор надежности, поскольку остаточный ресурс является показателем долговечности, а частота отказов — показателем безотказности.

Если искать минимум критериальной функции (1) по ремонтным воздействиям в t -м году, то, решая уравнение относительно ω_p , получаем:

$$\omega_t^{\text{опт}} = \frac{E}{1 + E} \cdot \frac{\Phi_0(1 - R_t^{\text{ост}})^{1/\alpha}}{\Phi_0(R_t^{\text{ост}})^{1/\alpha} + y}, \quad (5)$$

где E — норма дисконта (норма дохода на капитал).

Формула (5) определяет зависимость частоты отказов оборудования от остаточного ресурса при минимальных затратах на ремонтные воздействия. Значение $R_{\text{опт}}$ получаем из выражений (4) и (5).

На рис. 1 приведена зависимость (5) при $y = 0$ для подстанционного оборудования ($\alpha = 2/3$) и зависимости (4) при различных значениях T_0 . Точки пересечения последних с зависимостью (5) и определяют оптимальные значения искомых параметров.

Данная модель позволяет планировать деятельность предприятия в отношении оптимальных объемов ремонтных работ. Поддерживая ос-

таточный ресурс на уровне оптимального, можно достигнуть минимальных затрат на ремонт оборудования за его срок службы. Это означает, что если $R^{\text{ост}} > R_{\text{опт}}$, то надо снизить ремонтные затраты так, чтобы изменение ресурса стало отрицательным и равным $\Delta R = R_{\text{опт}} - R^{\text{ост}}$. Другими словами, в начале эксплуатации объекта, когда остаточный ресурс близок к единице, а оптимальный, напротив, значительно меньше единицы, нет необходимости в ремонтных воздействиях до тех пор пока R не сблизится с $R_{\text{опт}}$. Ситуация совершенно обратная, когда $R^{\text{ост}} < R_{\text{опт}}$. В этом случае, напротив, необходимы значительные ремонтные затраты, чтобы увеличить остаточный ресурс до уровня, близкого к $R_{\text{опт}}$. После того, как объект оказался в оптимальном состоянии (по ресурсу), приращение его ресурса на каждом последующем интервале времени должно стать нулевым. Размер ремонтных затрат в любом из этих случаев можно определить, исходя из зависимости (3) при необходимом ΔR . Таким образом, решена задача планирования оптимальных объемов ремонтных работ.

2. МОДЕЛЬ ОБОСНОВАНИЯ ЗАМЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Для рассмотрения критерия оценки оптимального срока службы оборудования необходимо сформировать модель эксплуатации оборудования, в рамках которой и будет проводиться дальнейший анализ (рис. 2).

На рис. 2 приняты следующие обозначения: K — капиталовложения в объект (стоимость нового оборудования или стоимость реконструкции); Z и Z^* — соответственно затраты на ремонтное обслуживание существующего и нового оборудования, которые включают в себя затраты на плановый и аварийный ремонты; $T_{\text{зам}}$ — год замены существующего оборудования; T_a — нормативный срок службы нового оборудования.

Функция $Z(t)$ неубывающая, поскольку, если на плановый ремонт средства не тратятся, то сразу же увеличиваются затраты на аварийный ремонт, и

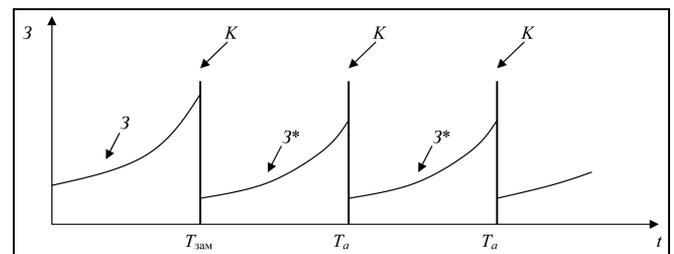


Рис. 2. Модель эксплуатации оборудования



наоборот, если мы вкладываем средства в плановый ремонт оборудования, то затраты на аварийный ремонт не возрастают. Данная ситуация связана с жизненным циклом оборудования и частотой отказов, т. е. в процессе старения и износа оборудования частота отказов возрастает, и, как следствие, возрастают затраты на аварийный ремонт оборудования.

Срок функционирования предприятия теоретически устремлен к бесконечности. Такое предположение вполне допустимо для учета последствий, кроме того, при использовании дисконтных методов наибольшее влияние на результирующий показатель оказывают ближайшие к началу реализации проекта годы. Для реализации предложенного варианта решения проблемы введем еще одну переменную n , представляющую собой число циклов использования оборудования за временной интервал $n = t/T_a$, где $t, n \rightarrow \infty$.

В качестве критерия оптимальности принимаются минимум дисконтированных затрат:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T_{\text{зам}}} a_t Z_t + \sum_{n=0}^{\infty} \left(K + \sum_{t=1}^{T_a} a_t Z_t^* \right) \left(\frac{1}{1+E} \right)^{T_{\text{зам}} + nT_a} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где a_t — коэффициент дисконтирования, E — норма дисконта.

Если искать минимум критериальной функции (6) по параметру $T_{\text{зам}}$, получим следующее уравнение:

$$Z_{T_{\text{зам}}} = \ln(1+E) \cdot \frac{(1+E)^{T_a}}{(1+E)^{T_a} - 1} \cdot \left(K + \sum_{t=1}^{T_a} a_t Z_t^* \right). \quad (7)$$

При выполнении равенства (7) предприятию безразлично — продолжать эксплуатировать существующее оборудование либо заменять его на новое. Необходимость замены оборудования возникает тогда, когда годовые затраты на эксплуатацию существующего оборудования будут больше затрат на приобретение и эксплуатацию нового оборудования за срок службы, умноженных на определенный коэффициент.

Если рассматривать как частный случай ситуацию, когда затраты на эксплуатацию нового оборудования постоянны, то с учетом некоторых преобразований можно получить следующий известный критерий:

$$Z_{T_{\text{зам}}} - Z^* > EK. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что замена действующего объекта экономически целесообразна, если экономия издержек от замены существующего оборудования новым больше годовой доходности капитала.

Как уже говорилось, затраты на ремонт оборудования с течением времени возрастают, что связано со старением оборудования. Поэтому, чтобы воспользоваться критерием (7), необходимо определить затраты на ремонтное обслуживание нового оборудования за нормативный срок службы. Для этого нужно уточнить у производителя оборудования следующую информацию: стоимость оборудования, нормативный срок службы, среднегодовые затраты на ремонт.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ДЕНЕЖНЫХ СРЕДСТВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ

После замены части оборудования на предприятии средний возраст оборудования $T_{\text{ср}}$ должен быть равен $T_{\text{опт}}$ — среднему возрасту оборудования предприятия, при котором выполняется уравнение (7).

В случае, если на предприятии отсутствуют данные о среднем возрасте оборудования, то его можно определить следующим образом:

$$T_{\text{ср}_t} = \frac{\Phi_{\Sigma \text{ам}_t} + \Phi'_t(1+p/T_a)}{\Phi_t} \cdot T_a, \quad (9)$$

где $T_{\text{ср}_t}$ — средний возраст оборудования в год t ; T_a — амортизационный период; $\Phi_{\Sigma \text{ам}_t}$ — накопленная амортизация к году t ; Φ_t — балансовая стоимость фондов в год t ; Φ'_t — балансовая стоимость фондов в год t , амортизация на которые уже не начисляется; p — срок, который уже отработали фонды по завершении амортизационного периода.

Рассчитав средний возраст оборудования по годам и имея информацию о затратах на эксплуатацию существующего оборудования, можно определить оптимальный возраст оборудования предприятия, при котором выполняется уравнение (7) (рис. 3).

На рис. 3 приняты следующие обозначения: $Z_{\text{сущ}}$ — затраты на ремонтное обслуживание существующего оборудования, соответствующие сред-

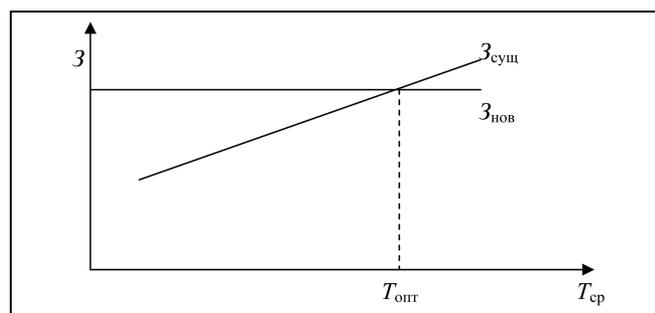


Рис. 3. Определение оптимального срока службы оборудования

нему возрасту оборудования в год t ; $Z_{\text{нов}}$ — стоимость нового оборудования и суммарные дисконтированные затраты на его ремонт за срок службы (см. формулу (7)).

Поскольку определено, что замена части оборудования необходима, это значит, что средний возраст уже превышает $T_{\text{опт}}$. Таким образом, из формулы (9) можно определить объем инвестиций, необходимых для того, чтобы средний возраст $T_{\text{ср}}$ соответствовал значению $T_{\text{опт}}$. Для этого рассмотрим три возможных случая.

1. При покупке нового оборудования заменяются фонды, амортизация на которые уже не начисляется, т. е. фонды, которые эксплуатируются сверх нормативного срока службы. В данном случае уменьшается величина Φ'_t , при этом сумма накопленной амортизации и балансовая стоимость фондов не изменяются:

$$T_{\text{опт}} = \frac{\Phi_{\Sigma \text{ам}_t} + (\Phi'_t - \Delta \Phi'_t) \cdot (1 + p/T_a)}{\Phi'_t} \cdot T_a,$$

где $\Delta \Phi'_t$ — балансовая стоимость фондов, эксплуатирующихся сверх нормативного срока службы и которые необходимо вывести из эксплуатации. Данная величина также равна стоимости нового оборудования, которое нужно приобрести для замены:

$$\Delta \Phi'_t = \Phi'_t - \frac{T_{\text{опт}} \Phi'_t - \Phi_{\Sigma \text{ам}_t} T_a}{T_a + p}.$$

2. При покупке нового оборудования заменяются фонды, амортизация на которые еще начисляется, т. е. изменяется величина $\Phi_{\Sigma \text{ам}_t}$. Такая ситуация возможна в двух случаях:

— на предприятии нет оборудования, эксплуатирующегося сверх нормативного срока службы, т. е. $\Phi'_t = 0$;

— в силу различных факторов необходима замена оборудования, которое имеет не наибольший срок эксплуатации на предприятии (например, из-за различий в условиях эксплуатации, объемах ремонтов, проводимых в течение срока службы, состояние более «молодого» оборудования может быть гораздо хуже, чем того, которое эксплуатируется сверх нормативного срока).

3. Для того чтобы изменить величину $T_{\text{ср}}$, данный случай не предусматривает какой-либо замены оборудования, а представляет собой некий вариант развития предприятия — количественное увеличение производственных фондов, т. е. для достижения значения $T_{\text{опт}}$ изменяется параметр Φ'_t .

В случаях 2 и 3 размер инвестиций определяется аналогично случаю 1 на основании формулы (9) путем изменения необходимого параметра.

4. АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ПЛАНА РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЗАМЕНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

На основе представленных моделей был сформирован алгоритм принятия решений, который четко определяет последовательность действий руководителя по управлению ремонтным обслуживанием и заменой оборудования предприятия (рис. 4). Алгоритм подразумевает осуществление следующих шагов (на рис. 4 шаги обозначены соответствующими цифрами).

1. Определение оптимального остаточного ресурса $R_{\text{опт}}$ и фактического остаточного ресурса $R_t^{\text{ост}}$ в момент времени t (год).

Фактическое значение остаточного ресурса $R_t^{\text{ост}}$ можно получить путем применения различных ме-

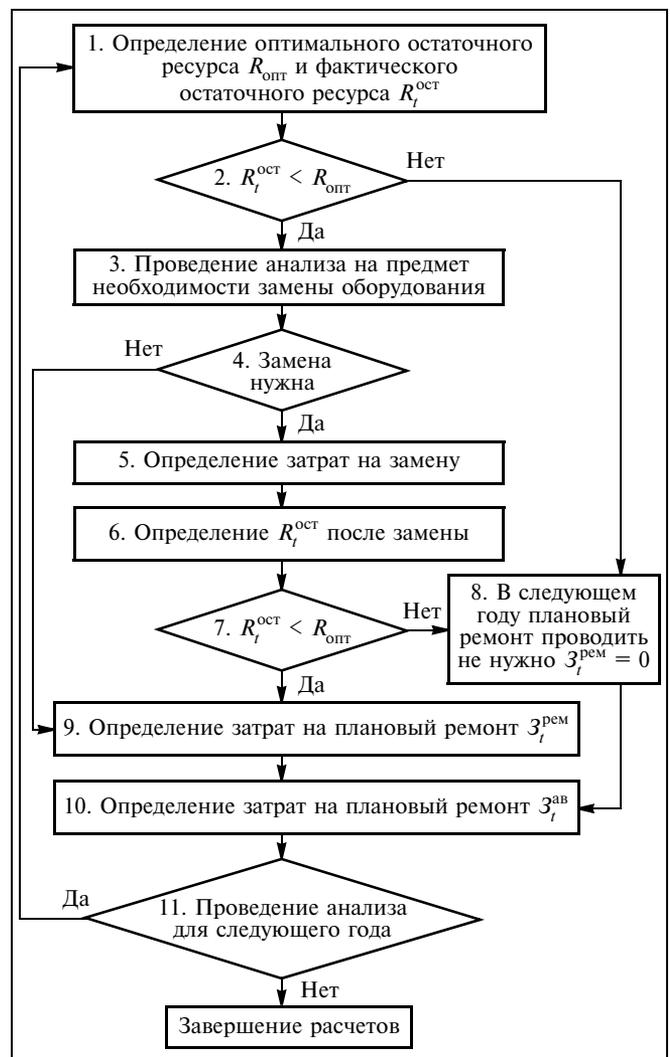


Рис. 4. Схема алгоритма принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия



тодик [4]. По сути, остаточный технический ресурс — это оценка состояния оборудования, которая может осуществляться либо посредством технической диагностики, либо с помощью теоретических методов (например, на основе зависимостей (3) и (4)).

2. Сравнение оптимального и фактического остаточного ресурса. В случае, если фактический ресурс больше или равен оптимальному, то сразу переход к шагу 9. Это означает, что в рассматриваемом периоде плановый ремонт проводить не нужно. В противном случае переход к следующему шагу.

3. Анализ на предмет необходимости замены оборудования, т. е. на данном шаге определяется, что выгоднее с экономической точки зрения — продолжать эксплуатировать существующее оборудование или заменить его на новое.

4. Если на шаге 3 было определено, что замена оборудования не нужна, то переходим к шагу 8. Иначе переходим к следующему шагу.

5. Определение размера денежных средств, необходимых для замены оборудования.

6. В результате замены части оборудования среднее значение остаточного ресурса рассматриваемой группы оборудования повышается. Однако этого может оказаться недостаточно для того, чтобы оно достигло оптимального уровня. Определить изменение $R_t^{\text{ост}}$ можно, построив зависимость остаточного ресурса от среднего возраста оборудования.

7. Если фактический ресурс после замены части оборудования больше или равен оптимальному, то переход к шагу 9, если же меньше — переход к следующему шагу.

8. В следующем году плановый ремонт (связан с поддержанием или повышением остаточного ресурса) проводить не нужно. Таким образом, затраты следующего года будут связаны только с аварийными ремонтами и техническим обслуживанием.

9. Определение затрат $Z_{\text{рем}}$ на плановый ремонт (формула (3)) для того, чтобы поднять фактический остаточный ресурс до уровня оптимального. После определения $Z_{\text{рем}}$ можно найти ожидаемые затраты на аварийные ремонты, для этого переход к шагу 10.

10. Расчет затрат на аварийные ремонты (формула (2)), исходя из прогнозируемой частоты отказов, соответствующей данному уровню остаточного ресурса. В данном случае шаг является заключительным для данного года.

11. После шага 10 дальнейший анализ может проводиться на основании этой же схемы, начиная с первого шага, но уже для следующего года. Для анализа необходимо использовать данные, полученные при расчете предыдущего периода. Однако, если в следующем году будут вводиться или выбывающие основные фонды, то это повлияет на уровень остаточного ресурса. При планировании этот факт необходимо учитывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика, позволяющая снять недостатки существующих моделей планирования ремонтного обслуживания и замены оборудования и получать информацию для принятия решений, соответствующую требованиям методологии управления активами.

Методика позволяет определять:

- оптимальное значение остаточного технического ресурса и соответствующую ему частоту отказов оборудования;

- оптимальные затраты на ремонтное обслуживание оборудования на протяжении всего срока его службы;

- момент замены существующего оборудования (в аспекте экономической целесообразности), долю оборудования, подлежащего замене в целом по предприятию, и размер денежных средств, необходимых для замены оборудования.

Для применения данной методики требуется информация, которой располагает любое энергопредприятие (фактические эксплуатационные затраты — за последние 2 — 3 года, статистика отказов, балансовая стоимость и амортизация основных фондов, показатели нового оборудования — стоимость, срок службы, нормативные затраты на ремонт и техническое обслуживание), и в этом заключается существенное преимущество вследствие неразвитости информационной базы российских компаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Китущин В.Г. Надежность энергетических систем. Ч. 1. Теоретические основы: Учебное пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 256 с.
2. Китущин В.Г., Шерварли Д.Е. Модель мониторинга технического ресурса оборудования // Избранные труды НГТУ: Сб. науч. тр. — Новосибирск, 2004. — С. 125—132.
3. Китущин В.Г., Бык Ф.Л., Шерварли Д.Е. Макродиагностика технического состояния оборудования // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики. — СПб., 2010. — С. 480—486.
4. Эксплуатация высоковольтных электрических сетей. Модели оценки состояния оборудования и оптимизации ремонтно-восстановительных процессов / А.Г. Фишов и др. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. — 118 с.

Статья представлена к публикации руководителем РРС В.Ю. Столбовым.

Китущин Викентий Георгиевич — д-р техн. наук, профессор,
✉ kitushin@eco.power.nstu.ru,

Иванова Елена Валентиновна — ассистент, ✉ ivanovaev@ngs.ru,

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
(383) 346-13-59.