



Определение остаточного ресурса железобетонных опор воздушных линий электропередачи 110 кВ и выше

УТЕУЛИЕВ Б. А., АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями «KEGOC»
010000, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Тауелсиздик, д. 59
Bauka1177@gmail.com

В настоящее время в эксплуатации находится много воздушных линий (ВЛ) электропередачи с большим сроком службы, в связи с чем возникает проблема износа их элементов из-за естественного старения. В статье рассматриваются модели определения остаточного ресурса ВЛ на железобетонных опорах напряжением 220 кВ и выше. Приведён ряд вариантов прогнозирования остаточного ресурса железобетонных опор для сравнительного анализа.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, остаточный ресурс, железобетонные опоры, предельное состояние, параметр фактического состояния.

Согласно [1] остаточным называется ресурс, исчисляемый от значения наработки в текущий момент времени. В задачах прогнозирования остаточного ресурса функционирование ВЛ на отрезке, для которого составляется прогноз, представляет собой случайный процесс, аргументом которого служит время. Исчисление ресурса в единицах времени позволяет поставить задачи прогнозирования в наиболее общей форме. В качестве начального времени для находящейся в эксплуатации ВЛ выбирается момент последнего обследования.

Понятие предельного состояния, соответствующего исчерпанию ресурса, допускает различное толкование. В одних случаях причиной прекращения эксплуатации служит моральный износ, в других — чрезмерное снижение эффективности, которое делает дальнейшую эксплуатацию экономически нецелесообразной, в-третьих — снижение показателей безопасности ниже предельно допустимого уровня [2].

Для ВЛ с учётом проводимых ремонтов и замен изношенных элементов за предельное целесообразно принять состояние, соответствующее моральному износу, когда дальнейшая эксплуатация линии экономически нецелесообразна. В настоящее время известны

методы прогнозирования остаточного ресурса по коррозийному износу металлоконструкций, но практически отсутствуют методы определения предельного состояния центрифужированных железобетонных стоек (ЦЖС) опор.

Характеристика случайного процесса изменения состояния ЦЖС опор

Прогнозирование остаточного ресурса возможно при одновременном наличии следующих условий [3]:

- известны параметры, определяющие фактическое состояние (ФС) конструкции;
- существуют критерии предельного состояния конструкции;
- имеет место периодический (или непрерывный) контроль технического состояния конструкции.

За параметр ФС принимают повреждение, дефект или неисправность, изменяющиеся в процессе эксплуатации, численное значение которого превышает установленный нормативно-технической документацией порог. В методах диагностики ЦЖС определён их параметр ФС, который называется коэффициентом состояния бетона K_c [4, 5].

В соответствии с [6] прикладываемая к ЦЖС контрольная нагрузка, при кото-

рой происходит разрушение, определяется по формуле

$$M_{\text{разр}} = CM_{\text{пред}}, \quad (1)$$

где C — коэффициент безопасности, равный 1,6 для тяжёлого бетона; $M_{\text{пред}}$ — предельный момент (изгибающая нагрузка, соответствующая несущей способности ЦЖС).

Центрифужированная железобетонная стойка опоры считается исчерпавшей свою несущую способность, если изгибающая разрушающая нагрузка равна предельному моменту $M_{\text{разр}} = M_{\text{пред}}$. В таком случае коэффициент C не может быть меньше 1 и снижается на величину, называемую коэффициентом K_c , который должен быть в пределах $0 < K_c < 0,6$. Коэффициент состояния бетона определяется по формулам [4, 5]

$$K_c = C(1 - R_x/R_0), \quad (2)$$

где R_x , R_0 — прочность бетона фактическая и исходная соответственно.

С помощью прибора УК-1401 измеряется время распространения ультразвука по ЦЖС опоры. Прочность бетона и несущая способность стоек при ультразвуковом контроле оцениваются по следующим показателям:

- П1 — время распространения ультразвука в бетоне в поперечном направлении (t_{\perp}) по отношению к продольной оси опоры на заданной базе измерений (150 мм);

- П2 — отношение времени распространения ультразвука в поперечном направлении (t_{\perp}) ко времени его распространения в продольном направлении опоры (t_{\parallel}) при одинаковой базе измерений. Физически этот показатель (основной при оценке состояния стоек и их отбраковке) характеризует степень насыщенности бетона микроповреждениями.

Далее показано применение этих показателей. Для первичной оценки прочности бетона и несущей способности ЦЖС опор принимают следующие допускаемые значения показателей, при которых прочность бетона и соответственно несущая способность конструкций находятся в пределах, установленных проектом и стандартами на

эти конструкции. Допускаемые показатели П1 и П2 должны удовлетворять условиям $t_{\leftrightarrow} \leq 36$ мкс и $t_{\leftrightarrow}/t_{\downarrow} \leq 1,1$, соответственно.

Для первичной отбраковки ЦЖС опор устанавливают следующие предельные значения соответственно показателей П1 и П2 ($t_{\leftrightarrow} > 48$ мкс и $t_{\leftrightarrow}/t_{\downarrow} > 1,4$), при которых прочность бетона и несущая способность опор становится ниже уровня, необходимого для восприятия нормативных нагрузок.

Для промежуточных состояний опор, когда показатели П1 и П2 больше допустимых, но меньше предельных значений, несущая способность конструкций оценивается приблизительно по показателю П2, приведенному далее (так как показатель П2 находится в диапазоне 1,1 – 1,4, его промежуточные значения вычислены как среднеарифметические).

Снижение коэффициента С под влиянием коэффициента K_c

P_2 , отн. ед.	коэффициент K_c
1,10	1,6
1,15	1,5
1,2	1,4
1,25	1,3
1,3	1,2
1,35	1,1
1,4	1,0

Для ЦЖС приняты три категории технического состояния:

- первая — изменение параметра ФС, характеризующее нарушение работоспособности ВЛ, или единичный случай отказа, незначительно снижающий надёжность;

- вторая — изменение параметра ФС и возникновение частых отказов (с большой вероятностью), которые значительно снижают надёжность;

- третья — предельное состояние, при котором изменение параметра ФС приводит к многочисленным отказам, восстановление работоспособности после которых связано с большими материальными затратами.

Для каждой категории ФС определены граничные допускаемые значения [7], приведённые далее.

Категория	Коэффициент K_c
Первая	0 – 0,3
Вторая	0,3 – 0,6
Третья	Более 0,6

Интенсивность изменения параметра ФС

Опыт обслуживания ВЛ показывает, что при эксплуатации наблюдается разнообразный характер процесса изменения ФС в реальных условиях в течение времени, что определяет работоспособное или неработоспособное состояние.

Параметр ФС, случайным образом изменяющийся во времени при воздействии различных факторов, — функция

времени $X(t)$. При исследовании его изменения во время эксплуатации ЦЖС для практических целей применяются основные характеристики законов распределения случайного процесса $X(t)$. При расчёте остаточного ресурса ЦЖС используются математическое ожидание $m_x(t)$, дисперсия $D_x(t)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_x(t)$ случайного процесса $X(t)$.

В реальных условиях непрерывно наблюдать случайный процесс довольно сложно, поэтому контроль производится периодически. В каждый момент контрольного периода возможно одно из двух решений: продолжать эксплуатацию или выполнить ремонт. Последнее принимается на основе анализа интенсивности изменения фактического состояния $\mu(t)$.

Интенсивность изменения параметра фактического состояния ЦЖС определяется по формуле, принятой в [7]:

$$\mu = f(t)/F(t), \quad (3)$$

где $f(t)$ — плотность вероятности изменения параметра ФС за время t ; $F(t)$ — вероятность безотказной работы за время t .

Результаты обследования ВЛ показывают, что значение параметра фактического состояния ЦЖС имеет тенденцию к возрастанию с течением времени эксплуатации. Естественно, наибольшей интенсивностью изменения данного параметра обладают ВЛ со сроком эксплуатации более 30 – 35 лет [8, 9]. Таким образом, при создании математической модели прогнозирования остаточного ресурса ЦЖС по фактическому состоянию необходимо определить характер изменения ФС во времени, т. е. процесс старения, а также его интенсивность.

Для математической модели изменения параметра ФС для ЦЖС в процессе эксплуатации необходимо учитывать природно-климатические воздействия посредством введения климатических коэффициентов, установленных по опыту многолетних наблюдений [7].

Климатическая зона	Климатический коэффициент при разных сроках службы	
	до 20 лет	более 20 лет
Тёплая	1,00/1,00	1,00/1,00
Холодная	1,01/1,01	1,05/1,07

Примечание. В числителе приведены данные для железобетонных опор, в знаменателе — металлических.

Распределение климатических зон, выполненное на основании [10], делится на два района:

- с температурой воздуха наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,98) от -15 до -29 °C, а также среднегодовой температурой воздуха выше 0 °C (тёплый климат);

- с температурой воздуха наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,98) от -30 до -42 °C, а также среднегодовой температурой воздуха ниже 0 °C (холодный климат).

Значения климатического коэффициента [7] приведены в таблице.

Моделирование изменения фактического состояния в виде случайного процесса производится следующим образом [7]:

$$X(t) = x_{\phi} + k \ln t_{\mu}; \quad (4)$$

$$X(t) = x_{\phi} + kt_{\mu}, \quad (5)$$

где x_{ϕ} — средний показатель фактического состояния ЦЖС опор; k — климатический коэффициент, учитывающий особенности изменения фактического состояния от климатической зоны (см. таблицу); t_{μ} — количество рассматриваемых лет.

Математическую модель выбирают в зависимости от срока службы: по выражению (4) — до 20 лет; по (5) — более 20 лет. Средний показатель параметра ФС для ЦЖС опор определяется по формуле

$$x_{\phi} = \frac{1}{N_{\text{оп}}} \sum_i n_{\text{оп}} K_{ci}, \quad (6)$$

где $n_{\text{оп}}$ — число опор с одинаковым коэффициентом K_c ; $N_{\text{оп}}$ — общее число опор.

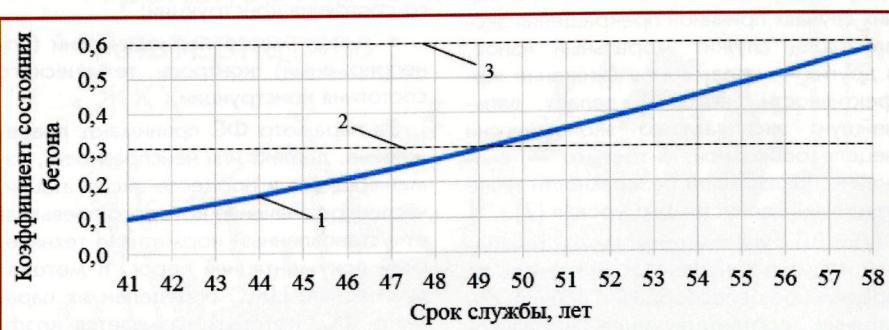


Рис. 1. Изменение параметра ФС ВЛ 220 кВ Правобережная – Индер:
1 — траектория дрейфа параметра ФС; 2 и 3 — допускаемые уровни технического состояния первой и второй категорий соответственно

По результатам расчёта строится график изменения параметра ФС, с помощью которого можно установить прогнозируемые наработки на отказы и остаточный ресурс. На рис. 1 показан график изменения коэффициента состояния бетона K_c на ВЛ 220 кВ Правобережная – Индер, находящейся в Республике Казахстан.

Допустив нормальное распределение интенсивности изменения параметра ФС для ЦЖС, примем, что случайные значения этого параметра имеют нормальное распределение с математическим ожиданием прогнозируемой наработки на отказ $M(T_i)$, дисперсией $D(T_i)$ и среднеквадратическим отклонением σ [7]

$$M(T_i) = \bar{T}_i k; \quad (7)$$

$$D(T_i) = [t_k - M(T_i)]^2; \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{D(T_i)}, \quad (9)$$

где \bar{T}_i — средняя наработка ВЛ на отказ; t_k — начальный момент прогноза.

Средняя прогнозируемая наработка ВЛ на отказ в год определяется по формуле

$$T_i = 1/\omega, \quad (10)$$

где ω — среднее значение потока отказов в единицу времени на одну ВЛ в год.

Вероятность безотказной работы определяется выражением [7]

$$F(t) = \Phi\left(\frac{M(T_i) - t_i}{\sigma}\right). \quad (11)$$

Плотность распределения прогнозируемых наработок ВЛ на отказы [7] рассчитывается по формулам

$$f(t) = \frac{1}{t_i \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln t_i - M(T_i)]^2}{2\sigma^2}\right); \quad (12)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[t_i - M(T_i)]^2}{2\sigma^2}\right). \quad (13)$$

Выражение (12) применяется при линейных и нелинейных моделях изменения параметра ФС по формуле (4), а выражение (13) — при нелинейных моделях по формуле (5). Свойства функции плотности вероятностей распределения случайной наработки позволяют прогнозировать среднее время наступления отказа ВЛ.

Отказ линии не обязательно ведёт к её полной неработоспособности. В этом случае целесообразно определять требуемые сроки ремонта ВЛ. Проведение ремонтных работ — момент перехода ВЛ из неисправного состояния в исправное. Следовательно, с учётом дрейфа параметра ФС можно получить график, описывающий прогнозируемую периодичность проведения ремонтов при изменении параметра ФС.

Прогнозирование остаточного ресурса ЦЖС опор

При указанном прогнозировании с учётом изменения фактического состояния ЦЖС для построения графика определяют:

- средний показатель параметра ФС;
- среднюю прогнозируемую наработку ВЛ на отказ;
- интенсивность изменения параметра ФС в период обследования. Если

наблюдались различные значения этого параметра, интенсивность его изменения определяется посредством плотностей вероятности и вероятности безотказной работы по формулам (11–13);

- траекторию изменения параметра ФС;
- значение остаточного износа [7] по формуле

$$x_{\text{ост}i} = (x_{\text{kpi}} - x_{\phi i})k_p, \quad (14)$$

где x_{kpi} — критические (граничные допустимые) значения параметра ФС по категориям; $x_{\phi i}$ — фактические начальные значения параметра ФС по категориям; j — число проводимых ремонтов; $k_p = 0,1$ — допускаемый остаточный износ ВЛ после ремонта;

• плотности распределения прогнозируемых наработок ВЛ на отказы по каждому дрейфу параметра ФС. При этом математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение [7] рассчитываются по формулам

$$M[X(t)] = \sum_i^n x_{\phi i}(t_i)p_i; \quad (15)$$

$$D[X(t)] = \sum (t_i - M[X(t)])^2 p_i; \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{D[X(t)]}, \quad (17)$$

где $x_{\phi i}(t_i)$ — средний параметр ФС для ЦЖС опор с учётом рассматриваемых лет t_i ; p_i — вероятности случайного процесса $x_{\phi i}(t_i)$; t_i — число рассматриваемых лет;

- период проведения ремонтов или реконструкции по наивысшим пикам плотностей распределения для каждого дрейфа параметра ФС;
- средний ресурс объекта на основании прогнозируемых траекторий

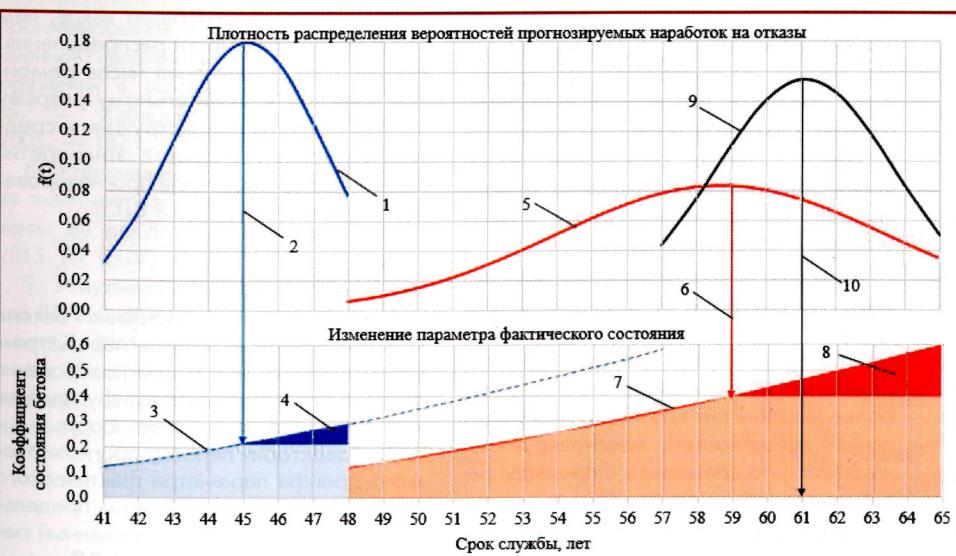


Рис. 2. Графики определения остаточного ресурса железобетонных опор по варианту с одним ремонтом:

1 — плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для ремонта; 2 — проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра ФС, определяющая начало ремонта; 3 — траектория дрейфа параметра ФС для ремонта; 4 — период проведения ремонта; 5 — плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для реконструкции; 6 — проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра ФС, определяющая начало реконструкции; 7 — траектория дрейфа параметра ФС для реконструкции; 8 — период проведения реконструкции; 9 — плотность распределения среднего ресурса ВЛ; 10 — проекция пика плотности распределения на ось, определяющая средний ресурс ВЛ

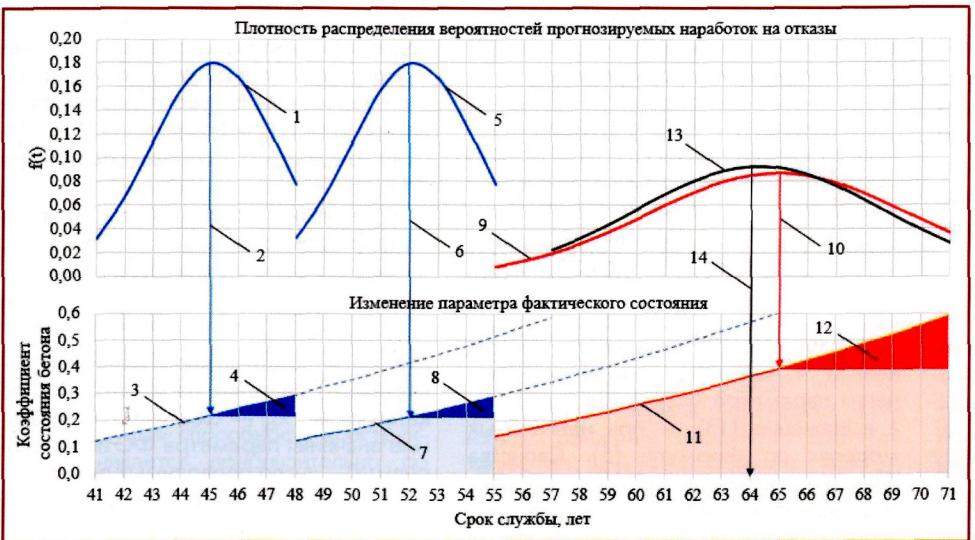


Рис. 3. График определения остаточного ресурса железобетонных опор по варианту с двумя ремонтами:

1, 5 — плотности распределения вероятностей прогнозируемых наработок для ремонта; 2, 6 — проекции пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра ФС, определяющие начало ремонта; 3, 7 — траектории дрейфа параметра ФС для ремонта; 4, 8 — периоды проведения ремонта; 9 — плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для реконструкции; 10 — проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра ФС, определяющая начало реконструкции; 11 — траектория дрейфа параметра ФС для реконструкции; 12 — период проведения реконструкции; 13 — плотность распределения среднего ресурса ВЛ; 14 — проекция пика плотности распределения на ось, определяющая средний ресурс ВЛ

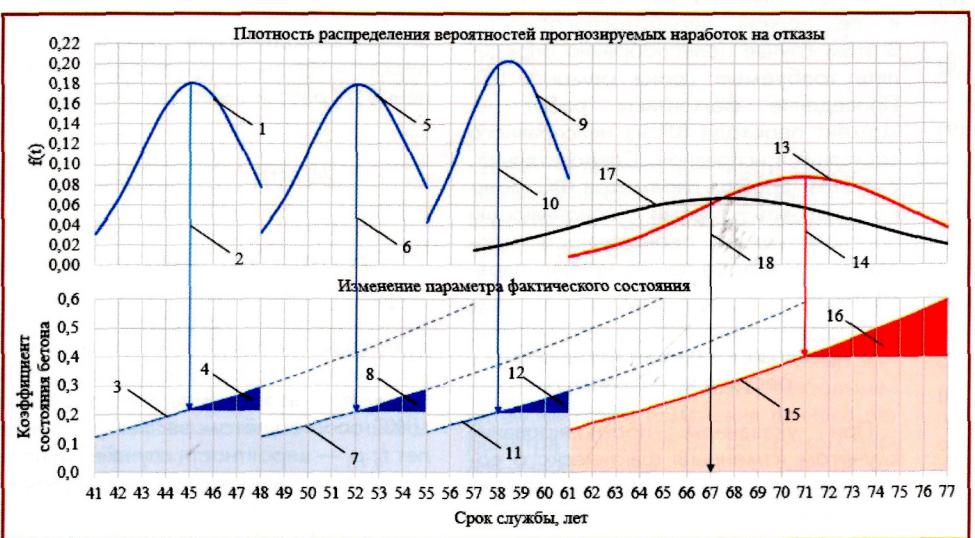


Рис. 4. График определения остаточного ресурса железобетонных опор по варианту с тремя ремонтами:

1, 5, 9 — плотности распределения вероятностей прогнозируемых наработок для ремонта; 2, 6, 10 — проекции пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра фактического состояния, определяющие начало ремонта; 3, 7, 11 — траектории дрейфа параметра фактического состояния для ремонта; 4, 8, 12 — периоды проведения ремонта; 13 — плотность распределения вероятностей прогнозируемых наработок для реконструкции; 14 — проекция пика плотности распределения на траекторию дрейфа параметра ФС, определяющая начало реконструкции; 15 — траектория дрейфа параметра ФС для реконструкции; 16 — период проведения реконструкции; 17 — плотность распределения среднего ресурса ВЛ; 18 — проекция пика плотности распределения на ось, определяющая средний ресурс ВЛ

дрейфа параметра ФС, т. е. рассчитывают плотность распределения между начальной и конечной траекторий дрейфа по формулам (10) и (11). Пик этой плотности — средний остаточный ресурс при рассматриваемых вариантах проведения ремонтов [3]. Математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение определяются также по формулам (15–17). Однако за число рассматриваемых лет t_i принимают срок службы между первой прогнозируемой траекторией параметра ФС при достижении им предельного состояния и последней траекторией параметра ФС, достигшего предельного состояния.

Приведём результаты расчётов с рассмотрением нескольких вариантов выполнения ремонтов и определения остаточного ресурса ВЛ 220 кВ Право-

бережная – Индер (рис. 2–4). Варианты отличаются числом ремонтов до начала реконструкции. При увеличении числа ремонтов остаточный ресурс ВЛ можно продлевать. Наиболее оптимален вариант с одним ремонтом с точки зрения обеспечения надёжности, так как начало реконструкции не превышает среднего ресурса. Выбор проведения ремонтов и реконструкции по варианту с двумя ремонтами также приемлем, поскольку разница между средним ресурсом и началом реконструкции незначительна.

Вариант с тремя ремонтами показывает, что с учётом остаточного износа после двух ремонтов сокращается период траектории дрейфа третьего ремонта. Об этом свидетельствует его более высокий пик плотности распределения вероятностей прогнозируемых наработок по сравнению с предыдущими плотностями распределения.

Дальнейшее увеличение числа ремонтов приводит к уменьшению перио-

да между ними, что экономически невыгодно. Поэтому при прогнозировании ремонтов рекомендуется ограничивать их число, если пик плотностей распределения вероятностей прогнозируемых наработок будет выше, чем предыдущие плотности распределения. Кроме того, увеличение числа ремонтов приводит к значительному разрыву между началом реконструкции и средним ресурсом. В связи с этим третий вариант не пригоден для прогнозирования остаточного ресурса ВЛ.

Выходы

1. Коэффициент состояния бетона может служить исходным параметром для моделирования и прогнозирования остаточного ресурса центрифугированных железобетонных стоек опор.

2. Траектория первого прогнозируемого дрейфа параметра фактического состояния при достижении им предельного состояния — гарантированный ресурс. Для рассматриваемой ВЛ гаран-

3. При расчёте и выборе вариантов проведения ремонтов и реконструкции ВЛ необходимо: учитывать недопущение роста пика плотностей распределения вероятностей прогнозируемых наработок по сравнению с предыдущими плотностями распределения; обращать внимание на недопущение значительного разрыва между началом реконструкции и средним ресурсом, если последний исчерпывается раньше. Во втором случае период проведения реконструкции назначается вместо последнего ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53480–2009. Надёжность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2010. — 32 с.
2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурсов машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1984. — 312 с.
3. РД 26.260.004–91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации, 1992.
4. Утеулиев Б. А., Тарасов А. Г. Адаптация метода ультразвукового контроля прочности бетона к оценке остаточного ресурса железобетонных стоек опор воздушных линий электропередачи // Вестник КазНТУ. 2015. № 1(107). С. 284–292.
5. Утеулиев Б. А., Тарасов А. Г. Ультразвуковой метод контроля прочности бетона применительно к железобетонным центрифугированным стойкам опор ВЛ // Кураты энергетика КЗ. 2015. № 1(01). С. 61–87.
6. ГОСТ 8829–94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жёсткости и трещиностойкости. — М.: Гострой России, ГУП ЦПП, 1997. — 27 с.
7. Боровик Г. М. Моделирование и прогнозирование показателей эксплуатационной надёжности искусственных сооружений в условиях сурового климата. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005. — 182 с.
8. Утеулиев Б. А., Михеев А. В. Оценка значимости элементов ВЛ в формировании её ресурса // Вестник КазНТУ. 2015. № 1(107). С. 273–284.
9. Утеулиев Б. А. Надёжность элементов ВЛ 220 кВ и выше // Кураты энергетика КЗ. 2015. № 1(01). С. 8–38.
10. СНиП РК 2.04-01–2010. Строительная климатология. — Алматы: КазНИИССА, 2011. — 20 с.