

О прогнозировании аварийности воздушных линий основной сети энергосистем

ГАЛИАСКАРОВ И.М., МИСРИХАНОВ М.Ш., РЯБЧЕНКО В.Н., ШУНТОВ А.В.

Исследована аварийность воздушных линий (ВЛ) 500 кВ обширного региона на протяженном временном отрезке. Выявлены существенные колебания значений параметра потоков отказов (частоты отказов). Сделан анализ этого параметра с использованием математического аппарата теории детерминированного (динамического) хаоса, а также старшего показателя Ляпунова, который позволяет оценить устойчивость динамической системы. Использование указанного математического аппарата позволило получить оригинальные результаты в актуальном направлении. Обоснована незначительность глубины прогноза характеристик надежности ВЛ вследствие хаотичности рассматриваемого динамического процесса. Этот неблагоприятный фактор снижает достоверность оценок надежности основной сети энергосистем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушные линии, параметр потока отказов, детерминированный хаос, фрактал, показатель Ляпунова, прогнозирование

В [1] исследована цикличность аварий воздушных линий (ВЛ) 500 кВ обширного региона на протяженном временном отрезке. Выявлены существенные колебания значений параметра потоков отказов (частоты отказов) под воздействием природных и социально-экономических факторов (рис. 1); предложено рассматривать указанный параметр как выходной сигнал динамической системы с множеством трудноформализуемых входов.

Бросается в глаза, что график на рис. 1 (по сути – временной ряд) не является упорядоченным, регулярным. В таких условиях представляет интерес проблема предсказуемости аварий в основных сетях энергосистем. Например, в [2] подобная изменчивость значений частоты отказов ВЛ 500 кВ описывалась математической моделью, содержащей линейный тренд и набор гармонических составляющих, определяемых с помощью преобразова-

Параметр потока отказов, $1/(\text{год} \times 100 \text{ км})$

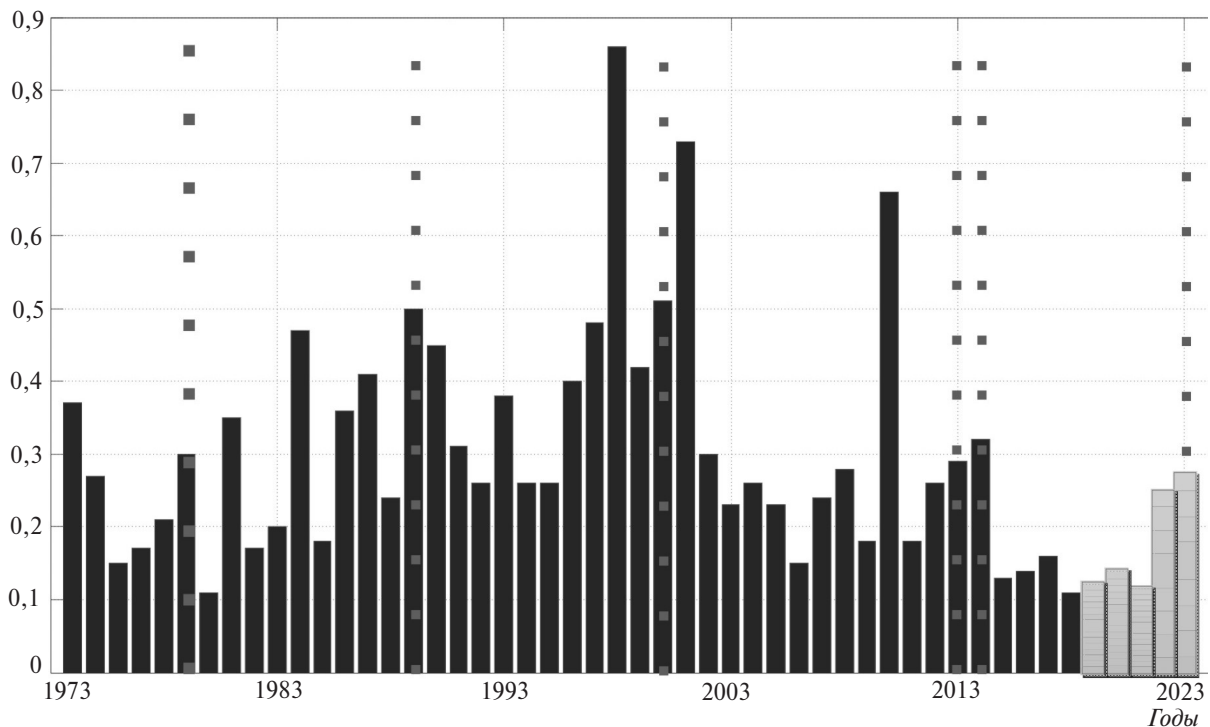


Рис. 1. Значения частоты отказов ВЛ 500 кВ в 1974–2018 (отчетные данные) и 2019–2023 гг. (прогноз) с наложением циклов солнечной активности (пунктир)

ния Фурье. Отмечалось, что она с приемлемой для прогнозных оценок точностью отражает тенденцию изменения аварийности ВЛ (в том числе с учетом циклов солнечной активности), а случайная составляющая может быть представлена в виде гауссовского белого шума. Однако вейвлет-спектр графика на рис. 1 выявил [1] наличие в частотном спектре параметра потока отказов трех различных временных периода с резко неоднородными характеристиками надежности. Следовательно, использование указанных гармонических составляющих представляется оправданным в рамках отдельно взятого, ограниченного временного периода, т.е. без учета предшествующих исторических «хвостов» данных.

Поэтому для решения задачи прогнозирования аварийности ВЛ авторы настоящей статьи привлекли, надо полагать, более подходящую в данном случае теорию детерминированного (динамического) хаоса (обзор см. в [3, 4]). В первом приближении в качестве критериев хаотического поведения рассматриваемой динамической системы использованы наличие фрактальности (или, как говорят, феномена-спутника хаоса) и положительности старшего показателя Ляпунова (признак неустойчивости динамической системы).

Вычисление фрактальной размерности параметра потока отказов. Как известно, статистической характеристикой хаотичности служит размерность странного аттрактора, отличающая от привычной размерности точки, линии, плоскости, объема, ... (соответственно нуль, один, два, три, ...). Странные аттракторы обладают фрактальной структурой, поэтому их размерность является дробной.

Для определения фрактальной размерности D был использован один из наиболее пригодных для подобных (рис. 1) временных рядов метод Хигучи [5, 6]. Алгоритм вычисления D частоты отказов ω , как временного ряда, содержащего N элементов, включает следующие шаги [7].

1. *Создание новых временных рядов.* Из заданного ряда ω создаются новые временные ряды ω_k^m , определяемые следующим образом:

$$\omega_k^m: \omega(m), \omega(m+k), \omega(m+2k), \dots, \omega\left(m + \left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k\right),$$

$$m=1, 2, \dots, k,$$

где k, m – целые числа; m – начальное время; k – временной интервал; $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция взятия целой части дроби в меньшую сторону, например, $\lfloor 2,7 \rfloor = 2$, $\lfloor 2,3 \rfloor = 2$, $\lfloor 2,01 \rfloor = 2$ и т.д.

Для временного интервала, равного k , получается k наборов новых временных рядов. Так, при

$k=3$ и $N=45$ (т.е. 45 лет, как на рис. 1) три временных ряда, полученных таким образом, имеют следующее представление:

$$\omega_3^1: \omega(1), \omega(4), \omega(7), \dots, \omega(43);$$

$$\omega_3^2: \omega(2), \omega(5), \omega(8), \dots, \omega(44);$$

$$\omega_3^3: \omega(3), \omega(6), \omega(9), \dots, \omega(45).$$

2. *Вычисление длины каждого нового ряда.* Длина кривой ω_k^m , обозначенной как $L_m(k)$, определяется следующим образом:

$$L_m(k) = \left\{ \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor} [x(m+ik) - x(m+(i-1)k)] \frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k} \right\},$$

где дробь $\frac{N-1}{\left\lfloor \frac{N-m}{k} \right\rfloor k}$ представляет собой нормировоч-

ный коэффициент для длины кривой множества временных рядов. Усреднение $\langle L_m(k) \rangle$ выполняется по всем m от 1 до k .

3. *Построение графика $\langle L_m(k) \rangle = f(k)$.* Строится график функции средней длины кривой $\langle L_m(k) \rangle$ в зависимости от k в двойном логарифмическом масштабе.

4. *Определение фрактальной размерности D как модуля тангенса угла наклона графика $\langle L_m(k) \rangle = f(k)$.*

Подразумевается, что выполняется соотношение $\langle L_m(k) \rangle \approx k^{-D}$, и на этом основании вычисляется размерность D .

На рис. 2 приведена зависимость значений фрактальной размерности временного ряда параметра потока отказов ВЛ 500 кВ с 1974 по 2018 гг. $D_{1974-2018}$ от k , рассчитанная по пп. 1–4. Как видно из рис. 2, за исключением $k=3$ все остальные значения временного интервала дают значение фрактальной размерности, меньшее 2. Точнее, усредненное значение для всех k дает $\langle D_{1974-2018} \rangle = 1,8926$. Таким образом, с позиций Евклидовой геометрии мы имеем фигуру, по своей размерности находящуюся между линией и плоскостью, но ближе к плоскости. Следовательно, фрактальность временного ряда на рис. 1 действительно имеет место.

Вычисление старшего показателя Ляпунова. Для определения характеристического показателя временного ряда на рис. 1 (старшего показателя, т.е. первой экспоненты, Ляпунова λ) был выбран ме-

тод Вольфа [8]. Показатель λ рассчитывался следующим образом. Для временного ряда x формировался фазовый портрет в n -мерном пространстве некоторой динамической системы, в котором любая точка ряда выражается последовательностью чисел

$$\{x(t_0), x(t_0 + \tau), \dots, x(t_0 + (n-1)\tau)\},$$

где τ и n – выбранные значения времени задержки и размерности пространства состояний динамической системы (размерности вложения).

Фрактальная размерность D

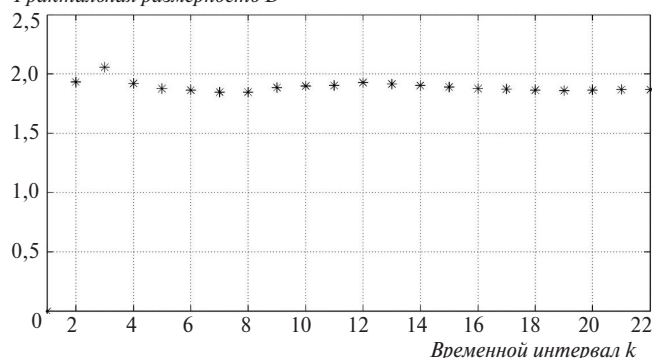


Рис. 2. Фрактальная размерность параметра потока отказов ВЛ 500 кВ в зависимости от временного интервала

Далее определялась ближайшая к начальной точка и вычислялось расстояние между этими двумя точками $d(t_0)$. В следующий момент времени, т.е. через заданное время эволюции t_0 , расстояние между этими двумя точками становилось равным $d'(t_1)$. Затем находилась новая точка, удовлетворяющая следующим условиям: ее расстояние от сместившейся начальной точки мало по отношению к норме временного ряда, рассматриваемого как вектор (примерно 5–7%); угол θ , образованный сместившейся начальной точкой, следующей за точкой последовательности (точкой во время t_1), и выбранной точкой, достаточно мал (в данном случае не превосходящий 5 град.). Затем все повторялось для следующей точки последовательности.

Старший показатель Ляпунова вычислялся по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{t_N - t_0} \sum_{k=1}^M \log_2 \left(\frac{d'(t_k)}{d(t_{k-1})} \right),$$

где M – номер последней итерации вычисления расстояния между сместившимися точками d' .

Бытует мнение о трудностях применения метода Вольфа, т.е. необходимости задания параметров метода, а именно времени задержки и размерности вложения. Однако разработаны эффективные алгоритмы, позволяющие преодолеть эти трудности. Один из таких алгоритмов основан на матричной

процедуре, заимствованной из симплектической геометрии [9]. Она заключается в «упаковке» временного ряда в матрицу вида

$$W = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_r \\ \omega_2 & \omega_3 & \dots & \omega_{r+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_s & \omega_{s+1} & \dots & \omega_L \end{bmatrix}$$

с последующим варьированием значений s, r, L и вычислением параметров метода Вольфа на основе собственных значений и векторов гамильтоновой матрицы $\text{diag}(W - W^T)$ [10, 11].

Вычислительные эксперименты с параметром потока отказов, представленным на рис. 1 (отчетные данные), показали, что оптимальная размерность вложения $n=2$. При этом старший показатель Ляпунова принимает значение $\lambda_{1974-2018} = 0,2183 > 0$. Его положительное значение свидетельствует о неустойчивом и хаотическом характере анализируемого временного ряда, рассматриваемого как выходной параметр сложной нелинейной динамической системы.

Прогнозирование аварийности ВЛ 500 кВ. Хаотические системы представляют класс моделей неопределенности, отличающихся по своим свойствам от стохастических моделей. Если в детерминированной модели будущую траекторию можно предсказать на большое время вперед, а в стохастической модели точный прогноз, вообще говоря, невозможен даже на малом промежутке времени, то в хаотической модели ошибка прогнозирования растет экспоненциально и, следовательно, возможен прогноз на ограниченное время вперед [3, 4].

Как известно, показатель Ляпунова характеризует экспоненциальную скорость разбегания близких траекторий на аттракторе. Если в начальный момент времени расстояние между экспонентами равно ε_0 , то спустя некоторое время Δt расстояние между ними окажется равным ε_1 . При этом, очевидно, $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 e^{\lambda \Delta t}$, откуда $\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}$. Допустим,

что $\varepsilon_1 = e \varepsilon_0$ (расстояние между экспонентами относительно первоначального увеличилось в e раз), следовательно, $\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln e = \frac{1}{\Delta t}$. Поэтому период про-

гнозирования в подобных задачах $T \approx \Delta t = 1/\lambda$, в нашем случае $T \approx 1/0,2183 = 4,6$ лет.

Для прогнозирования параметра потока отказов ВЛ 500 кВ был применен метод спектрального сингулярного анализа (иное название метода «Гусеница»), который широко используется для анализа временных рядов, в том числе хаотического характера [12, 13]. Он относится к глобальным методам

прогноза и используется для выделения периодических и квазипериодических составляющих из временного ряда. Исходный временной ряд представляется в виде набора составляющих, анализ которых позволяет, во-первых, судить о его особенностях и, во-вторых, продолжить его на прогнозируемый отрезок времени.

Объектом рассматриваемого метода является матрица задержек, формируемая на основе исходного временного ряда. Она подвергается сингулярному анализу, в результате чего формируется одношаговый или многошаговый прогноз. Метод имеет два ключевых параметра: длину фрагмента («гусеницы») l и число главных составляющих m . В качестве рекомендаций по их выбору использованы следующие правила [14]:

детальное разложение фрагмента ряда достигается при его длине, приблизительно равной половине длины ряда (в нашем случае $l=22$), при этом число столбцов матрицы задержек определяется по формуле

$$k = N - l + 1;$$

чем больше собственное значение главной составляющей, тем больше вклад соответствующей восстановленной компоненты ряда. Поэтому следует ограничиваться составляющими с наибольшими собственными значениями.

Так, матрица задержек имела размер 22×24 и была равна

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_{1974} & \omega_{1975} & \dots & \omega_{1997} \\ \omega_{1975} & \omega_{1976} & \dots & \omega_{1998} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{1995} & \omega_{1996} & \nu & \omega_{2018} \end{bmatrix}.$$

На основе этой матрицы формировалась симметрическая матрица

$$X = \frac{1}{22} \Omega^T \Omega,$$

разложение которой с использованием стандартной процедуры SVD [10] представлялось в виде

$$X = \Lambda V^T,$$

где Λ – диагональная матрица упорядоченных по убыванию сингулярных (собственных) значений, определяющая главные составляющие; V – ортогональная матрица сингулярных (собственных) векторов.

Выбранное число главных составляющих, соответствующее наибольшим (значимым) сингуляр-

ным числам матрицы задержек, составило 6. В результате V была редуцирована по столбцам до размера 22×6 и приняла вид

$$V^* = \begin{bmatrix} V \\ \nu \end{bmatrix},$$

где ν – последняя строка матрицы V^* .

Вычисления для случая прогнозирования поведения параметра потока отказов с глубиной 5 лет (см. выше) по формулам

$$\omega_{2019} = \frac{\nu V^T}{1 - \nu \nu^T} \begin{bmatrix} \omega_{1996} \\ \omega_{1997} \\ \vdots \\ \omega_{2018} \end{bmatrix}, \quad \omega_{2020} = \frac{\nu V^T}{1 - \nu \nu^T} \begin{bmatrix} \omega_{1997} \\ \omega_{1998} \\ \vdots \\ \omega_{2019} \end{bmatrix}, \dots,$$

$$\omega_{2023} = \frac{\nu V^T}{1 - \nu \nu^T} \begin{bmatrix} \omega_{2000} \\ \omega_{2002} \\ \vdots \\ \omega_{2022} \end{bmatrix}$$

с обновляющимися после каждого шага матрицами V и V^* дали следующие значения частоты отказов ВЛ 500 кВ на перспективу 2019–2023 гг.:

Год	2019	2020	2021	2022	2023
ω , 1/(год 100 км)	0,12	0,14	0,11	0,25	0,27

Таким образом, исторический минимум частоты отказов ВЛ 500 кВ на уровне 0,11 1/(год×100 км), зафиксированный в 2018 г., в последующие три года (2019–2021 гг.) прогнозируется примерно на том же уровне. Двух- и трехкратный рост аварийности ожидается с 2022 г. и достигнет 0,27 1/(год×100 км), повторяя многолетнюю тенденцию к всплескам, лишь до некоторой степени связанную с циклами солнечной активности [1, 2]. Тем не менее, аварийность ВЛ 500 кВ между 24-м и предстоящим в 2023 г. 25-м солнечным циклом ожидается самой минимальной за почти полувековую историю наблюдений.

Оказалось возможным сравнить прогнозные и фактические данные за истекший год. Обработка статистических данных выявила частоту отказов ВЛ 500 кВ рассматриваемого региона на уровне 0,1 1/(год×100 км) при прогнозе 0,12 1/(год×100 км), что в целом можно считать адекватной оценкой.

Одной из главных особенностей хаотичной динамической системы является ее исключительная чувствительность к начальным условиям. Поэтому столь благоприятные отчетные и прогнозные данные по аварийности ВЛ 500 кВ могут оказаться проходящим достижением. Причина кроется в старении линий электропередачи.

В [1] приводилась «возрастная характеристика» ВЛ 500 кВ рассматриваемого региона. Оказалось, что около 40% линий старше 50 лет. Согласно [15] установлены следующие нормативные сроки службы элементов ВЛ: проводов, грозозащитных тросов, оттяжек опор, линейной арматуры, изоляторов – 25 лет; фундаментов и железобетонных опор – 35 лет (в ряде документов последних лет говорится о сроке службы не менее 50 лет); стальных опор – 50 лет. Поэтому представляет интерес уточнить влияние срока службы на аварийность ВЛ.

Ниже приведена частота отказов анализируемых ВЛ 500 кВ за период 2011–2018 гг. ($\omega_{<50}$ – линий со сроком службы до 50 лет; $\omega_{\geq 50}$ – то же, но со сроком службы 50 и более лет; ω – независимо от срока службы):

Срок службы линии	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2011–2018
$\omega_{<50}$, 1/(год×100 км)	0,14	0,14	0,29	0,20	0,06	0,16	0,12	0,06	0,14
$\omega_{\geq 50}$, 1/(год×100 км)	0,24	0,41	0,3	0,47	0,24	0,12	0,21	0,18	0,27
ω , 1/(год×100 км)	0,18	0,26	0,29	0,32	0,13	0,14	0,16	0,11	0,20

Как видно, значение $\omega_{\geq 50}$ практически во всем диапазоне лет превышает $\omega_{<50}$ (в ряде случаев до трех раз); а в целом за рассмотренный период – в 2 раза: (0,27 против 0,14 1/(год×100 км)). В рассмотренных выше временных интервалах присутствовали «разновозрастные» ВЛ. Поэтому для них были рассчитаны средневзвешенные сроки службы по формуле $\sum l_i t_i / \sum l_i$, где l_i – общая протяженность ВЛ со сроком службы t_i ; $i=1, \dots, 63$. Для интервала $t \geq 50$ лет получен средневзвешенный возраст 57 лет, а для $t < 50$ лет – 31 год. Таким образом, превышение срока службы ВЛ 500 кВ примерно в два раза (с 31 до 57 лет) увеличивает частоту отказов также в два раза (около 4% в год); данную зависимость можно записать в виде $2^{(t-30)/30}$.

Среди рассмотренных отказов не зафиксировано ни одного случая отключения ВЛ 500 кВ из-за нарушения несущей способности опор и фундаментов. Анализ результатов инструментальных обследований более 300 металлических решетчатых опор ВЛ 500 кВ, находящихся в эксплуатации более 50 лет, показал такие признаки старения сооружений. На опорах обнаружены следы поверхностной коррозии металла в пределах от 3 до 7% общей толщины металла при норме не более 10% для несущих конструкций (соответственно по площади сечения – не более 20%). По результатам проверочных расчетов на прогрессирующее разрушение установлено, что наибольшее напряжение в поясах стоек опор с учетом коррозионной потери сечения

металла находится в диапазоне 1731–2334 кг/см², но не превышает предельного значения 2400 кг/см² (предел текучести стали).

Фактическая измеренная прочность бетона у неповрежденных временем фундаментов составляет 470–460 кг/см², у ранее отремонтированных фундаментов с незначительными повреждениями верхней части – 310–305 кг/см², у значительно поврежденных фундаментов – 230 кг/см² при нормативе не менее 200 кг/см². На основании этих данных можно осторожно предположить, что длительность эксплуатации ВЛ 500 кВ не ограничивается нормативным сроком службы 50 лет и может быть продлена не менее, чем в 1,5 раза, т.е. до 75–85 лет. Однако предстоящие четверть века следует рассматривать не как отсрочку в необходимости реконструкции ВЛ 500 кВ, а как время, в течение которого 40% ВЛ 500 кВ в данном регионе (около 3,5 тыс. км) должны быть полностью заменены.

Для справки, в период 2011–2018 гг. на новое строительство в регионе приходилось около 1,1% в год общей протяженности ВЛ 500 кВ, а объемы реконструкции на порядок меньше. Таким образом, при существующих темпах нового строительства необходимую замену физически изношенных ВЛ 500 кВ можно выполнить примерно наполовину, если приступить к ее практической реализации в ближайшие годы: несколько лет потребуется только для разработки, согласования и утверждения проектов планировки и межевания территорий, разработку, согласование и экспертизу проектной документации, выпуск рабочей документации. При этом в государственных инвестиционных программах данные мероприятия не предусмотрены.

Выводы. 1. Аварийность ВЛ 500 кВ, образующих костяк энергосистем страны, обладает признаками хаотичности. Таким образом, надежность электрообеспечения обширных регионов страны в определенной мере отдается на волю случая, что не является благоприятным фактором.

2. Надежность основной сети энергосистем носит также слабоуправляемый характер. Исторический минимум частоты отказов ВЛ 500 кВ на уровне 0,11 1/(год×100 км) фиксировался в 1980 и 2018 гг., когда проводились соответственно летние олимпийские игры и чемпионат мира по футболу. Как известно, во время таких мероприятий в энергосистемах проводится предельно жесткая мобилизация сил и средств. В остальные годы рассматриваемого периода частота отказов ВЛ выше, причем

в ряде случаев примерно на порядок. Отчетные данные за 2019 г. оказались исключением из этого правила. Это может быть связано с тем, что погодные условия ноября и декабря 2019 г. в европейской части страны оказались спокойными и рекордно теплыми.

3. Рост аварийности по причине износа действительно имеет место. За пределами 30-летнего срока эксплуатации рост частоты отказов ВЛ 500 кВ составляют примерно 4% в год. Таким образом, у ВЛ с превышением нормативного срока службы 50 лет аварийность оказалась в 2 раза больше.

4. На данном временном промежутке аварийность, связанная с износом элементов ВЛ, не затронула основных несущих конструкций ВЛ (фундаментов и опор). Поэтому ее доля в общей аварийности проявляется слабо. Пример тому – исторические минимумы частоты отказов ВЛ 500 кВ последних лет, несмотря на то, что около 40% линий региона имеют срок службы более 50 лет.

5. Прогнозирование характеристик надежности ВЛ 500 кВ с использованием математического аппарата детерминированного хаоса дает приемлемую глубину прогноза лишь до 5 лет. При этом с 2022 г. ожидается двух- или трехкратный рост аварийности, традиционно связанный с очередным циклом солнечной активности.

6. Анализ фактического состояния несущих конструкций ВЛ 500 кВ, находящихся в эксплуатации более 50 лет, показывает, что при должном техническом обслуживании и ремонте они прослужат еще не менее четверти века, т.е. до 75–85 лет. После этого ВЛ должны быть полностью реконструированы. Однако существующие темпы их нового строительства и реконструкции не позволят этого сделать в полной мере. В таких условиях прогнозирование аварийности ВЛ 500 кВ теряет смысл, тем более в условиях детерминированного хаоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиаскаров И.М., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Шунтов А.В. Еще раз о цикличности аварий в основных сетях энергосистем. – *Электричество*, 2019, № 11, с. 4–11.
2. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат, 2009, 332 с.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения. I. Методы. – *Автоматика и телемеханика*, 2003, № 5, с. 3–54.
4. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Управление хаосом: методы и приложения. II. Приложения. – *Автоматика и телемеханика*, 2004, № 4, с. 3–34.
5. Higuchi T. Approach to an Irregular Time Series on the Basis of Fractal Theory. – *Physica D.*, 1988, No. 31, pp. 277–283.
6. Higuchi T. Relationship between the Fractal Dimension and the Power-law Index for a Time Series: a Numerical Investigation. – *Physica D.*, 1990, No. 46, pp. 254–264.
7. Flores-Marquez E.L., Galvez-Coyt G., Cifuentes-Nava G. Fractal dimension analysis of the magnetic time series associated with the volcanic activity of Popocatepetl. – *Nonlinear Processes Geophysics*, 2012, No.19, pp. 693–701.
8. Wolf A. Determining Lyapunov Exponent Form a Time Series. – *Physica D.*, 1986, No.16, pp. 285–317.
9. Lei M., Wang Z., Feng Z. A method of embedding dimension estimation based on symplectic geometry. – *Physics Letters*, 2002, No. A303, p. 179–189.
10. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984, 320 с.
11. Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Квадратическая проблема собственных значений в электроэнергетических системах. – *Автоматика и телемеханика*, 2006, № 5, с. 24–47.
12. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Основы теории сложных систем. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2007, 620 с.
13. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». Сб. статей/Ред.: Д.Л. Данилов, А.А. Жигляевский. Изд. Санкт-Петербургского университета, 1997, 308 с.
14. Леонтьева Л.Н. Многомерная гусеница, выбор длины и числа компонент. – *Машинное обучение и анализ данных*, 2011, №1, с. 2–10.
15. СТО 56947007–29.240.01.053–2010. Методические указания по проведению периодического технического освидетельствования воздушных линий электропередачи ЕНЭС [Электрон. ресурс]. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_56947007-29.240.01.053-2010.pdf. (дата обращения 19.03.2020).

[20.01.2020]

А в т о р ы: Галиаскаров Ирек Минраханович – главный инженер филиала АО «Центр инжиниринга и управления строительством Единой энергетической системы» – Центр инжиниринга и управления строительством Центра.

Мисриханов Мисрихан Шапиевич – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» – НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2010 г.

Рябченко Владимир Николаевич – доктор техн. наук, главный технолог АО «Научно-технический центр ФСК ЕЭС», диссертацию защитил в 2002 г.

Шунтов Андрей Вячеславович – доктор техн. наук, главный научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2002 г.

About Forecasting Accident Rate of Overhead Lines Main Grid Power System

GALIASKAROV Irek M. (*Branch of Center for Engineering and Construction Management JSC – CECM Center*) – Chief engineer

MISRIKHANOV Misrikhan Sh. (*National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia*) – Leading researcher of Electric Power Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.)

RYABCHENKO Vladimir N. (*R&D Center FGS UES, Moscow, Russia*) – Chief technologist

SHUNTOV Andrey V. (*National Research University «MPEI», Moscow, Russia*) – Chief researcher of Electric Power Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.)

The accident rate of overhead lines (OHL) of 500 kV of a large region over an extended time period was investigated. Significant fluctuations in the values of their failure flow parameter (failure frequency) were revealed. The indicated parameter was analyzed using the mathematical apparatus of the theory of deterministic (dynamic) chaos. An insignificant depth of forecasting the characteristics of the overhead line reliability due to the chaotic of the dynamic process under consideration is substantiated. This is an unfavorable factor that reduces the reliability of the power systems main grid.

Key words: overhead lines, failure flow parameter, deterministic chaos, fractal, Lyapunov exponent, forecasting

REFERENCES

- Galiaskarov I.M., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N., Shuntov A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 11, pp. 4–11.
- Skopintsev V.A. *Kachestvo elektroenergeticheskikh sistem: nadozhnost', bezopasnost', ekonomichnost', zhivuchest'* (The quality of electric power systems: reliability, safety, efficiency, survivability). M.: Energoatomizdat, 2009, 332 p.
- Andriyevskiy B.R., Fradkov A.L. *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and Telemechanics)*, 2003, No. 5, p. 3–54.
- Andriyevskiy B.R., Fradkov A.L. *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and Telemechanics)*, 2004, №. 4, pp. 3–34.
- Higuchi T. Approach to an Irregular Time Series on the Basis of Fractal Theory. – *Physica D.*, 1988, No. 31, pp. 277–283.
- Higuchi T. Relationship between the Fractal Dimension and the Power-law Index for a Time Series: a Numerical Investigation. – *Physica D.*, 1990, No. 46, pp. 254–264.
- Flores-Marquez E.L., Galvez-Coyt G., Cifuentes-Nava G. Fractal dimension analysis of the magnetic time series associated with the volcanic activity of Popocatepetl. – *Nonlinear Processes Geophysics*, 2012, No. 19, pp. 693–701.
- Wolf A. Determining Lyapunov Exponent Form a Time Series. – *Physica D.*, 1986, No.16, pp. 285–317.
- Lei M., Wang Z., Feng Z. A method of embedding dimension estimation based on symplectic geometry. – *Physics Letters*, 2002, No. A303, p. 179–189.
- Voyevodin V.V., Kuznetsov Yu.A. *Matritsy i vychisleniya* (Matrices and calculations). M.: Nauka, 1984, 320 p.
- Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N. *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and Telemechanics)*, 2006, No. 5, pp. 24–47.
- Loskutov A.Yu., Mikhaylov A.S. *Osnovy teorii slozhnykh system* (Fundamentals of the theory of complex systems). Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2007, 620 p.
- Glavnyye komponenty vremennykh ryadov: metod «Gusenitsa». *Sb. statey* (The main components of the time series: the Caterpillar method. Sat Articles) / Ed. D.L. Danilov, A.A. Zhiglyavsky. Publ. of St. Petersburg University, 1997, 308 p.
- Leont'yeva L.N. *Mashinnoye obuchenije i analiz dannykh – in Russ. (Machine Learning and Data Analysis)*, 2011, No. 1, pp. 2–10.
- STO 56947007–29.240.01.053–2010. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu periodicheskogo tekhnicheskogo osvidetel'stvovaniya vozduzhnykh liniy elektroperedachi YENES* (STO 56947007–29.240.01.053–2010. Guidelines for the periodic technical survey of overhead power lines of the UNEG) [Electron. Resource] URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/sto_5694700-29.240.01.053-2010.pdf. (Data of apple 19.03.2020).

[20.01.2020]