

Еще раз о цикличности аварий в основных сетях энергосистем

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

Исследована цикличность аварий воздушных линий 500 кВ обширного региона на протяженном временном отрезке. Выявлены существенные колебания значений их параметра потоков отказов (частоты отказов) под воздействием природных и социально-экономических факторов. Построены вейвлет-спектры частоты отказов, выявивших несколько исторических периодов аварийности. Предложено рассматривать параметр потока отказов как выходной сигнал динамической системы с множеством трудноформализуемых входов. Этот рассматриваемый параметр определяется многофакторным и трудноформализуемым сложением воздействий окружающей среды и социально-экономических отношений. Оценена устойчивость этой динамической системы. Намечены пути формализации многомерной динамической модели аварийности в основных сетях энергосистем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушные линии, аварии, цикличность, вейвлет-спектр, динамическая система, запас устойчивости

Известно, что причинами крупных аварий в электрических сетях с массовыми повреждениями воздушных линий (ВЛ) нередко оказываются экстремальные климатические условия. К ним относятся повышенные гололедно-изморозевые отложения, ураганы, природные пожары и др. Сравнимое влияние на аварийность также оказывает человеческая деятельность — несанкционированное воздействие на элементы ВЛ и некачественная эксплуатация: наезды техникой на опоры, задевание проводов грузоподъемными механизмами, несвоевременное обнаружение дефектов и др. Таким образом, в общем случае аварийность ВЛ случайным образом зависит от воздействия природных и социальных (социально-экономических) факторов.

Далее в качестве примера приведена структура устойчивых, т.е. неустраняемых действием автоматического повторного включения, отказов ВЛ 500 кВ общей протяженностью около 8,5 тыс. км центрально-европейской части страны за период 2011–2018 гг.

Номер п/п	Причина отказа	Число отказов шт./%
1.	Несоблюдение сроков, невыполнение в требуемых объемах технического обслуживания или ремонта оборудования и устройств, в том числе: несвоевременное выявление и устранение дефектов (обрыв или расплетение проводов и тросов, разрушение гирлянды) прочие нарушения	34/12,8 17/6,4 17/6,4
2.	Воздействие птиц	5/1,9
3.	Превышение параметров воздействия стихийных явлений относительно условий проекта	8/3,0

4.	Воздействие посторонних лиц и организаций, не участвующих в технологическом процессе	91/34,2
5.	Воздействие повторяющихся стихийных явлений, в том числе: гололедно-изморозевые отложения атмосферные перенапряжения (гроза) природные пожары прочие воздействия неблагоприятных природных явлений (падение деревьев)	121/45,5 17/6,4 57/21,4 17/6,4 30/11,3
6.	Невыявленные причины	7/2,6
	Итого	266/100,0

Из приведенных данных следует, что социальные (пп. 1, 4) и природные воздействия (пп. 2, 3, 5) примерно в равной мере оказывают влияние на аварийность ВЛ.

Ранее в [1] отмечалось, что имеющиеся периоды колебаний аварийности в электрических сетях близки к (квази)одиннадцатилетнему циклу солнечной активности. Последняя определенно влияет на изменение природно-климатических характеристик (есть мнение, что циклы солнечной активности оказывают воздействие и на социальные явления). Однако это предположение в [1] рассматривалось в качестве гипотезы, требующей проверки и проведения целенаправленных исследований.

Циклы аварийности в электрических сетях рассматривались в [1] на примере статистических данных по неустраняемым отказам ВЛ 500 кВ также центрально-европейской части страны за период 1973–2001 гг. (приводилась удельная повреждаемость, $1/(\text{год } 100 \text{ км})$, вернее — средний параметр потока или частота отказов ω). Поэтому большой интерес представляли продление этого временного

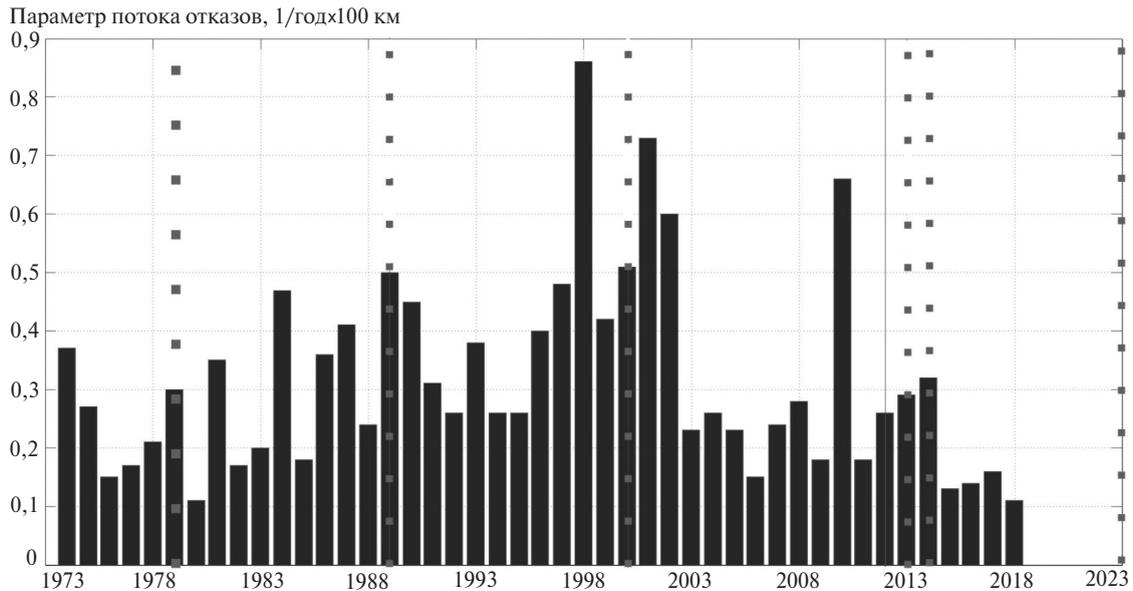


Рис. 1. Значения параметра потока отказов ВЛ 500 кВ за период 1974–2018 гг. с наложением циклов солнечной активности (• • •)

ряда и уточнение гипотезы о цикличности аварий в основных сетях энергосистем.

Были подняты архивы по всем технологическим нарушениям ВЛ 500 кВ рассматриваемого региона за период 2002–2018 гг. На рис. 1 представлена частота неустраняемых отказов ВЛ 500 кВ за 45 лет в интервале с 1973 по 2018 гг. с наложением пиков четырех состоявшихся одиннадцатилетних циклов солнечной активности (с 21-го по 24-й, последний цикл по отчетным данным имел два всплеска: 2013 и 2014 гг.); пик 25-го цикла ожидается в 2023 г.

Как видно из рис. 1, значения частоты отказов имеют колебательный характер, меняясь в широком диапазоне: 0,11 1/(год·100 км) в 1980 и 2018 гг. и 0,86 1/(год·100 км) в 1998 г. (в 1980 г. в стране состоялись летние олимпийские игры, в 2018 г. — чемпионат мира по футболу, а в 1998 г. был объявлен дефолт). В годы наибольшей солнечной активности (рис. 1) присутствует некоторое возрастание частоты отказов ВЛ. Тем не менее, в промежутках практически каждого цикла обнаруживаются всплески аварийности ВЛ, превышающие таковые для пиков солнечной активности. Например — это ранее упомянутый 1998 г. или 2010 г. с его сильнейшими пожарами в европейской части страны в результате аномально жаркого лета.

На рис. 1 приведено амплитудно-временное представление параметра (сигнала). Но, как известно, не менее значимая информация скрывается в его частотной области. Для этой цели график рис. 1 был подвергнут так называемому вейвлет-анализу [2, 3], что позволило осуществить частотно-временное разделение процесса на рис. 1.

На рис. 2 приведен вейвлет-спектр параметра потока отказов с материнским вейвлетом Хаара (haar). Кстати, практически идентичные приведен-

ному на рис. 2 вейвлет-спектры получены при использовании в качестве материнских вейвлетов Добеши (db), Койфмана (coif), симлета (sym), биортогонального сплайн-вейвлета (bior) и реверсивного биортогонального сплайн-вейвлета (rbio).

При изменении параметра потока отказов на рис. 2 различимы три временных периода с позиций интенсивности (возмущенности) его частотного спектра: с 1973 г. до начала 1990-х гг.; с начала 1990-х гг. до начала 2000-х гг. и с начала 2000-х гг. по настоящее время. Первый период имеет невозмущенный, относительно однородный, спокойный частотный спектр. Второй цикл — спектральный «шторм». Наконец, третий период — стабилизация и успокоение частотного спектра; некоторый всплеск интенсивности, по-видимому, связан с событиями 2010 г. (см. ранее). Надо полагать, что на рис. 2 отражены события, произошедшие в нашей стране. В частности, второй период — время распада единой страны и развала ее экономики.

На основании анализа событий (рис. 1 и 2) не представляется возможным подтвердить привлекательную гипотезу, высказанную в [1], что имеющиеся периоды колебаний аварийности в электрических сетях близки к одиннадцатилетнему циклу солнечной активности. Это слишком простое объяснение процессов в проблематике надежности. Причинно-следственные связи здесь гораздо сложнее. Их результирующее воздействие определяется многофакторным и трудноформализуемым сложением воздействий окружающей среды и социально-экономических отношений. Тем не менее, независимо от этого рассматриваемый параметр потока отказов представляет собой не набор фиксированных значений, зависящих, к примеру, от материала опор или номинального напряжения линии, а ди-

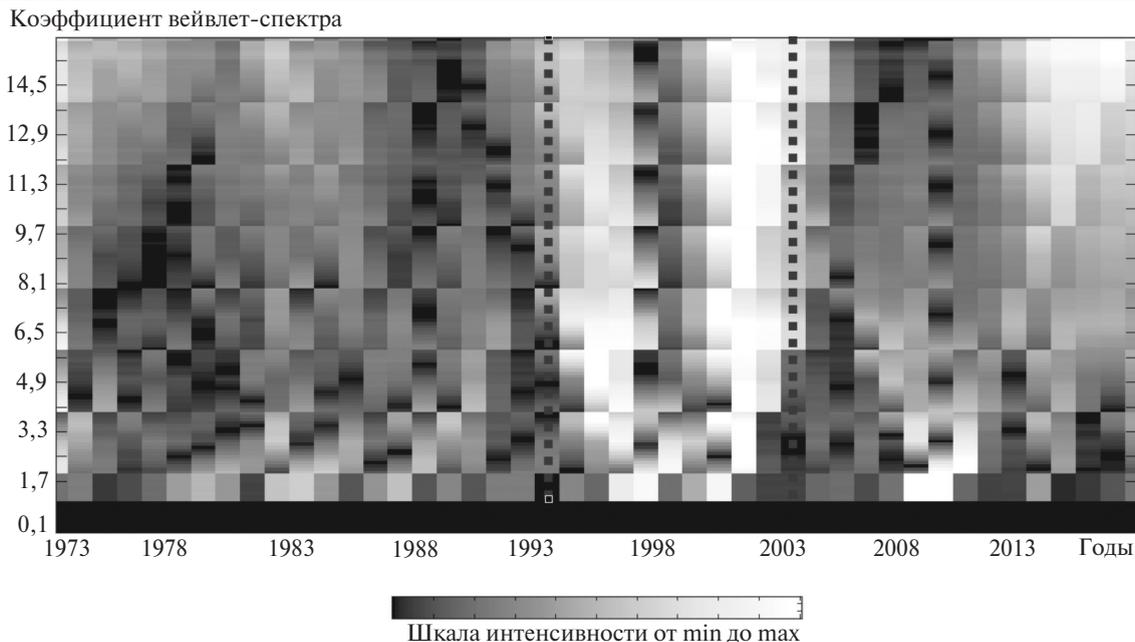


Рис. 2. Вейвлет-спектр параметра потока отказов ВЛ 500 кВ

намический процесс со сменой характерных временных периодов, порожденный некоторой динамической системой.

Как известно, математические модели динамических систем условно делятся на два непересекающихся класса: автономные и входо-выходные [4]. В первом случае выходные сигналы системы порождаются внутренними переходами состояния под действием ненулевых начальных условий. При этом все неформализованные внешние воздействия данной системы преобразуются в эквивалентные начальные условия [5]. Во втором случае выходные сигналы системы являются гомоморфным (не взаимно однозначным) преобразованием соответствующих входных сигналов.

В данном случае сформулируем частную задачу: какая динамическая система воспроизводит последовательность выходных сигналов с минимально возможными отклонениями от наблюдаемого ряда в виде параметра потока отказов (рис. 1)? При этом идентифицируемая модель должна быть пригодной для анализа ее устойчивости. (Не строго говоря, устойчивое движение динамической системы определяют две тенденции, зависящие от физической природы процесса: консервативная, стремящаяся скомпенсировать внешние воздействия, сопротивляющаяся этим воздействиям и приводящая, как правило, к колебательному движению, и диссипативная, рассеивающая энергию указанных колебаний.). Модель исследуемой динамической системы (расчетные условия):

относится к классу дискретных динамических систем [6], поскольку изменения параметра потока происходят дискретно, с шагом «интегрирования» один год;

является положительной (позитивной, неотрицательной), т.е. генерирует только положительные значения выходного сигнала, поскольку параметр потока отказов, по крайней мере, — неотрицательная величина [7, 8];

может быть представлена в пространстве состояний, т.е. описывается совокупностью физических или абстрактных переменных, характеризующих поведение системы в будущем при условии, если известно состояние в настоящий момент времени [4, 5];

обладает свойством нестационарности, так как ее параметры изменяются во времени — от шага к шагу [9];

рассматривается в качестве автономной системы, так как в данном случае отсутствует дополнительная информация, которую можно было бы принять за входные сигналы;

ограничивается набором анализируемых данных, начиная с 2002 г. (см. вейвлет-спектр на рис. 2); в противном случае результаты идентификации будут подвержены существенному влиянию так называемых «хвостов» данных, относящихся к предшествующим историческим периодам [10].

Идентификацию модели изменения параметра потока отказов за 2002–2018 гг. в классе положительных, дискретных, нестационарных, автономных динамических систем в пространстве состояний осуществим на основе преобразований матрицы Ганкеля (квадратной матрицы, у которой на всех диагоналях, перпендикулярных главной, стоят равные элементы, сформированные из массива данных) с использованием метода наименьших квадратов [10–12], при этом получаем следующие дискретные уравнения:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t); \tag{1}$$

$$\omega(t) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t), \quad \mathbf{c}^T = [1 \ 0 \ 0], \tag{2}$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния; $\omega(t)$ – выходной сигнал системы (параметр потока отказов);

$$\mathbf{x}(1) = \begin{bmatrix} \omega_{2002} \\ \omega_{2003} \\ \omega_{2004} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}(2) = \begin{bmatrix} \omega_{2003} \\ \omega_{2004} \\ \omega_{2005} \end{bmatrix}; \dots; \quad \mathbf{x}(N) = \begin{bmatrix} \omega_{2016} \\ \omega_{2017} \\ \omega_{2018} \end{bmatrix}$$

– значения вектора состояний на соответствующем шаге «интегрирования»; $t=1, \dots, N$ – интервал «интегрирования» (в данном случае $N=15$);

$$\mathbf{A}(1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,4655 & 0,0621 & 0,2404 \end{bmatrix},$$

$$\text{eigA}(1) = \{-0,33264 \pm j0,6439; 0,8933\}; \tag{3}$$

$$\mathbf{A}(2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,4633 & 0,0600 & 0,2448 \end{bmatrix},$$

$$\text{eigA}(2) = \{-0,3249 \pm j0,6448; 0,8946\}; \tag{4}$$

$$\mathbf{A}(N-1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,4184 & 0,2301 & 0,1528 \end{bmatrix},$$

$$\text{eigA}(N-1) = \{-0,3788 \pm j0,5622; 0,9104\}; \tag{5}$$

$$\mathbf{A}(N) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,4125 & 0,2326 & 0,1548 \end{bmatrix},$$

$$\text{eigA}(N) = \{-0,3773 \pm j0,5579; 0,9093\}; \tag{6}$$

– матрицы собственной (свободной) динамики по шагам «интегрирования» и соответствующие им множества собственных значений (полюсов).

Распределение полюсов (собственных значений – eigA) идентифицированной модели параметра потока отказов (1)–(6) за период 2002–2018 гг. представлено на рис. 3.

Поскольку для асимптотической устойчивости дискретной динамической системы необходимо и достаточно расположение ее полюсов на комплексной плоскости \mathbb{C} внутри единичного круга с центром в начале \mathbb{C} , то из диаграммы на рис. 3 следует, что идентифицированная модель является асимптотически устойчивой [5, 6] или, иначе говоря, шуровской моделью. При этом запас устойчивости (радиус, степень) указанной модели параметра потока отказов представлен на рис. 4.

Напомним, что в случае дискретной динамической системы запас устойчивости рассчитывается следующим образом:

$$\rho_{\text{уст}} = |\text{Re} \lambda_{\text{max}}| < 1.$$

Запас устойчивости является чрезвычайно важной характеристикой динамической системы и характеризует скорость затухания переходных процессов в ней. При этом чем меньше $\rho_{\text{уст}}$, тем ближе переходные колебания в системе к апериодическим и быстро затухающим процессам.

Однако наличие того или иного запаса устойчивости у динамической системы еще не является гарантией, что достаточно малые возмущения не приведут к потере устойчивости. Поэтому рассмотрим ε -спектр [13] в качестве метода анализа робастности устойчивости (грубости – неподверженности влиянию возмущений) динамической модели параметра потока отказов. Данный метод опериру-

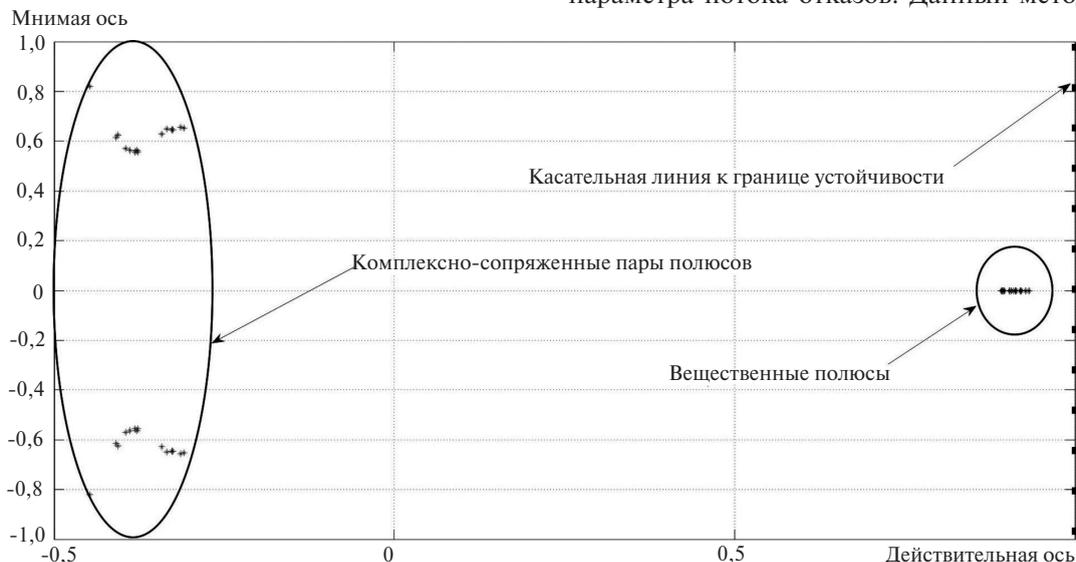


Рис. 3. Полюсы модели параметра потока отказов ВЛ 500 кВ за период 2002–2018 гг. в пространстве состояний

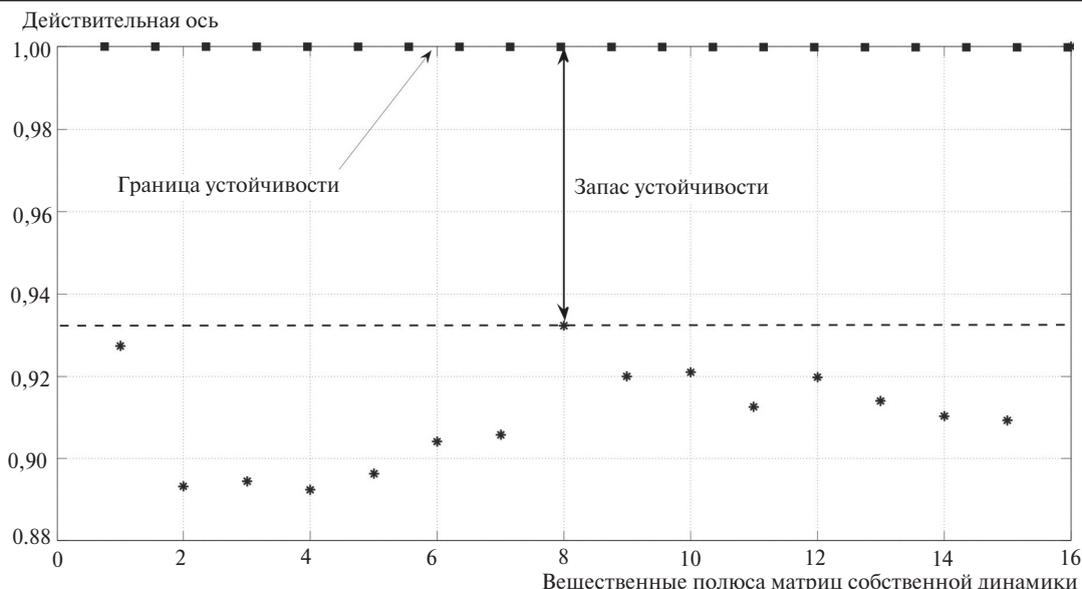


Рис. 4. Запас устойчивости дискретной нестационарной динамической модели параметра потока отказов

ет комплексными числами z_i , составляющими множество следующего вида (ε -спектр):

$$\text{eig}_\varepsilon(\mathbf{A}) = \{z_i : \sigma_{\min}(z_i \mathbf{E} - \mathbf{A}) \leq \varepsilon\}.$$

Здесь σ_{\min} – минимальное сингулярное число [14] матрицы $z_i \mathbf{E} - \mathbf{A}$; ε – заданное положительное число (допуск); \mathbf{E} – единичная матрица.

Другими словами, ε -спектр – множество комплексных чисел z , при которых все матрицы $z\mathbf{E} - \mathbf{A}$ имеют минимальные сингулярные числа, не превосходящие некоторое конечное число (допуск) ε , характеризующее эти матрицы как «близкие к вырожденным» или «практически вырожденные».

Анализ запаса устойчивости модели параметра потока отказов за период 2002–2018 гг. на основе ε -спектров (рис. 5 и 6) дает оценку весьма малой

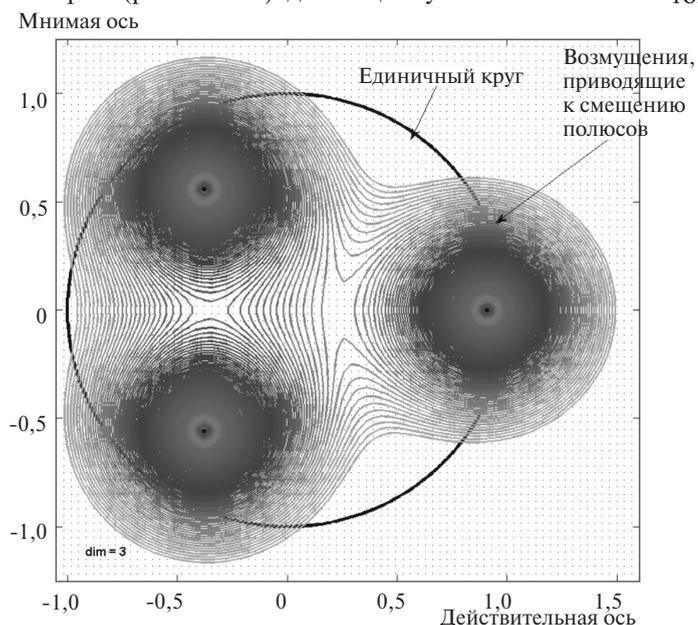


Рис. 5. Оценка робастности запаса устойчивости модели параметра потока отказов на основе ε -спектра (двумерный обзор)

степени робастности, лежащей в пределах $(0,75 \div 1,25) \cdot 10^{-1}$. Другими словами, устойчивость данной модели подвержена существенному влиянию относительно малых возмущений элементов матрицы \mathbf{A} .

Данная оценка получена при численном анализе областей на комплексной плоскости, в которых локализованы полюсы (собственные значения) всех матриц \mathbf{A} модели динамической системы (1), получаемых при относительно близких, но различающихся начальных приближениях. В этом смысле метод ε -спектров является регулярным относительно используемой стратегии «утяжеления» (увеличения интенсивности возмущений), т.е. гарантирует независимость получаемых оценок запаса устойчивости от выбора начальных приближений и стратегии «утяжеления».

Заметим, что указанная на рис. 6 резольвента матрицы \mathbf{A} равна обратной матрице $(z\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}$. При этом под нормой резольвенты понимается ее максимальное сингулярное число σ_{\max} [14].

Таким образом, динамическая модель параметра потока отказов ВЛ 500 кВ является устойчивой на рассматриваемом временном промежутке, но подверженной влиянию сравнительно небольших возмущений. Соотнесем это теоретическое предположение с нынешней практикой эксплуатации основных сетей.

На рис. 7 приведена «возрастная» характеристика ВЛ 500 кВ рассматриваемого региона. Как видно, около 40% ВЛ 500 кВ «старше» 50 лет, а линий «младше» 30 лет, т.е. построенных после событий 90-х годов прошлого столетия, менее 20%. По данным [15, 16] в стране происходит заметный рост аварийности из-за из-

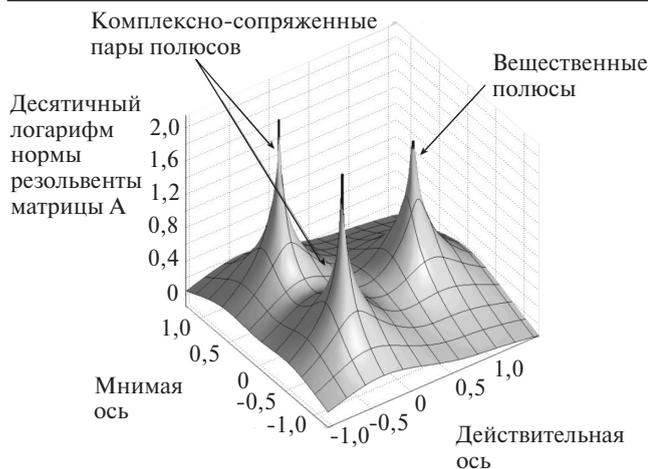


Рис. 6. Оценка робастности запаса устойчивости модели параметра потока отказов на основе ε -спектра (трехмерный обзор)

носа ВЛ всех классов напряжения. Однако фактические данные на рис. 1 (если не брать во внимание аномальный 2010 г.) свидетельствуют об обратном: надежность ВЛ 500 кВ непрерывно улучшается вопреки тому, что нового их строительства или реконструкции почти нет. Возможное объяснение данного парадокса заключается в следующем.

Анализ характеристик надежности ВЛ единой национальной электрической сети выявил [17], что за последние 30 лет средняя продолжительность планового ремонта ВЛ в основных сетях энергосистем выросла с 12–17 до 95–149 ч, т.е. почти в 10 раз. При этом основная часть преднамеренных отключений связана с ремонтами или техническим обслуживанием собственно линии, а не с ее реконструкцией или другими внешними причинами. Иными словами, поддержание работоспособности морально и физически изношенных элементов сети обеспечивается не реконструкцией, а ремонтами. Именно по такой модели хозяйствования были вынуждены работать отечественные энергосистемы в 90-х годах прошлого столетия в условиях развала экономики. Таким образом, несмотря на благоприятные на рассматриваемом временном отрезке характеристики надежности ВЛ 500 кВ (рис. 1), говорить о благоприятном прогнозе их аварийности вряд ли возможно.

Выводы. 1. Воздушные линии единой национальной электрической сети образуют костяк энергосистем, являясь наиболее повреждаемыми их элементами. Поэтому аварийности ВЛ традиционно уделяется пристальное внимание.

2. На протяжении последних десятилетий выявлены значительные колебания параметра потоков отказов ВЛ 500 кВ под воздействием природных и социально-экономических факторов: от 0,11 до 0,86 1/(год·100 км). При этом не подтверждена ранее высказанная гипотеза, что периоды колебаний



Рис. 7. Интегральная функция распределения возрастных характеристик ВЛ 500 кВ

аварийности в электрических сетях близки к одиннадцатилетнему циклу солнечной активности.

3. С использованием вейвлет-анализа показано наличие в частотном спектре параметра потока отказов ВЛ 500 кВ трех различных временных периодов, примерно соответствующих происходившим в стране социально-экономическим изменениям. Это еще раз подтверждает, что рассматриваемый параметр определяется многофакторным и трудноформализуемым сложением воздействий окружающей среды и социально-экономических отношений.

4. Учитывая колебательный процесс изменения параметра потока отказов ВЛ 500 кВ, этот параметр описан как выходной сигнал в классе положительных дискретных нестационарных автономных динамических систем в пространстве состояний.

5. Исследована асимптотическая устойчивость этой динамической системы: система оказалась устойчивой. Однако робастность модели параметра потока отказов ВЛ 500 кВ оказалась недостаточно благоприятной с позиций надежности, т.е. ее устойчивость подвержена существенному влиянию относительно малых возмущений.

6. Результаты математического моделирования и соответствующие выводы в части недостаточной робастности косвенно подтверждаются анализом возрастной структуры ВЛ 500 кВ и изменением их характеристик надежности в части ремонтно-эксплуатационного обслуживания в сторону их ухудшения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат, 2009, 332 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. — Успехи физических наук, 1996, т. 166, № 11, с. 1145–1170.
3. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005, 671 с.

4. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем/Под ред. Я.З. Цыпкина. М.: Мир, 1971, 398 с.
 5. Kailath T. Linear Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1980, 682 p.
 6. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986, 448 с.
 7. Красносельский М.А., Лифшиц Е.А., Соболев А.В. Позитивные линейные системы. Метод положительных операторов. М.: Наука, 1985, 256 с.
 8. Haddad W., Chellaboina V., Hui Q. Nonnegative and compartmental dynamical systems. Princeton University Press, 2010, 605 p.
 9. Теория автоматического регулирования. Кн. 3. Ч. 1. Техническая кибернетика. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся систем автоматического регулирования/Под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1969, 608 с.
 10. Van Overschee P., de Moor B.L. Subspace identification for linear systems: Theory, Implementation, Applications. Springer Science&Business Media, 2012, 254 p.
 11. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г., Рябченко В.Н. Идентификация непрерывных многомерных систем. Дискретно-подобные системы.— Вестник ИГЭУ, 2013, № 4, с. 47–53.
 12. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Ефанов Д.Е., Поклад М.Н. Идентификация дискретной системы на основе матричных делителей нуля.— Автоматизация. Современные технологии, 2017, № 6, с. 269–274.
 13. Trefethen L.N., Embree M. Spectra and pseudospectra. Princeton Univ. Press, 2005, 624 p.
 14. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984, 320 с.
 15. Каверина Р., Коган Ф., Яковлев Л. Повышение надежности воздушных линий 35–750 кВ. Общие вопросы состояния ВЛ. — Новости ЭлектроТехники, 2007, № 4(46) [Электрон. ресурс] <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/11.php>. (дата обращения 10.06.2019).
 16. Каверина Р., Коган Ф., Яковлев Л. Повышение надежности воздушных линий 35–750 кВ. Надежность проводов и грозозащитных тросов. — Новости ЭлектроТехники, 2007, № 5(47) [Электрон. ресурс] <http://news.elteh.ru/arh/2007/47/12.php>. (дата обращения 10.06.2019).
 17. Абдурахманов А.М., Глушкин С.В., Протасенко И.С., Шунтов А.В. О характеристиках надежности воздушных линий основной сети энергосистем. — Электричество, 2018, № 8, с. 12–17.
- [29.08.2019]
- А в т о р ы: Галиаскаров Ирек Минирахманович — 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 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 НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2002 г.*
- DOI:10.24160/0013-5380-2019-11-4-11

Once More about the Recurrence of Failures in the Grid Backbone Networks

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

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

RYABCHENKO Vladimir N. (*R&D Center FGS UES, Moscow, Russia*) — Chief technologist, Dr. Sci. (Eng.)

SHUNTOV Andrey V. (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Chief researcher, Dr. Sci. (Eng.)

The recurrence of failures of 500 kV overhead lines in a vast region on an extended time interval is investigated. An essential scatter of their flaw rate (failure frequency) values under the effect of natural and social-economic factors has been revealed. The failure frequency wavelet spectra were plotted, from which a few historical failure rate periods have been revealed. It is proposed to consider the flaw rate as the output signal of a dynamic system containing a multitude of poorly formalized inputs. This parameter is determined by multifactorial and poorly formalized summation of the effects caused by the environment and by social-economic relations. The stability of this dynamic system has been estimated. Ways for formalizing the multidimensional dynamic model of failure rate in the grid backbone networks have been outlined.

Key words: overhead power lines, failures, recurrence, flaw rate, wavelet spectrum, dynamic system, stability margin

REFERENCES

1. **Skopintsev V.A.** *Kachestvo elektroenergeticheskikh sistem: nadezhnost', bezopasnost', ekonomichnost', zhivuchest'* (The quality of electric power systems: reliability, safety, economy, survivability). Moscow, Energoatomizdat, 2009, 332 p.
2. **Astaf'yeva N.M.** *Uspekhi fizicheskikh nauk – in Russ. (Successes of physical sciences)*, 1996, vol. 166, No. 11, pp. 1145–1170.
3. **Malla S.** *Veivlety v obrabotke signalov* (Wavelets in treatment of signals). Moscow, Mir, 2005, 671 p.
4. **Kalman R., Falb P., Arbib M.** *Ocherki po matematicheskoi teorii sistem/Pod red. Ya.Z. Tsipkina* (Essays on the mathematical theory of the systems/ Edit. by Ya.Z. Tsipkin). Moscow, Mir, 1971, 398 p.
5. **Kailath T.** *Linear Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1980, 682 p.
6. **Kuo B.** *Teoriya i proektirovaniye tsifrovyykh sistem upravleniya* (Theory and planning of digital control systems). Moscow, Mashinostroyeniye, 1986, 448 p.
7. **Krasnosel'skiy M.A., Lifshits Ye.A., Sobolev A.V.** *Pozitivnyye lineinye sistemy. Metod polozhitel'nykh operatorov* (Positive linear systems. Method of positive operators). Moscow, Nauka, 1985, 256 p.
8. **Haddad W., Chellaboina V., Hui Q.** *Nonnegative and compartmental dynamical systems*. Princeton University Press, 2010, 605 p.
9. **Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kn. 3. Ch. 1. Tekhnicheskaya kibernetika. .../Pod red. V.V. Solodovnikova** (Theory of automatic control. Book 3. Part 1. Technical cybernetics. .../Edit. by V.V. Solodovnikov. Moscow, Mashinostroyeniye, 1969, 608 p.
10. **Van Overschee P., de Moor B.L.** *Subspace identification for linear systems: Theory, Implementation, Applications*. Springer Science&Business Media, 2012, 254 p.
11. **Gaiduk A.R., Kalyayev I.A., Kapustyan S.G., Ryabchenko V.N.** *Vestnik IGEU – in Russ. (Bulletin of Irkutsk State Power Engineering University)*, 2013, No. 4, pp. 47–53.
12. **Zubov N.Ye., Mikrin Ye.A., Ryabchenko V.N., Yefanov D.Ye., Poklad M.N.** *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii – in Russ. (Automation. Modern Technologies)*, 2017, No. 6, pp. 269–274.
13. **Trefethen L.N., Embree M.** *Spectra and pseudospectra*. Princeton Univ. Press, 2005, 624 p.
14. **Voyevodin V.V., Kuznetsov Yu.A.** *Matritsy i vychisleniya* (Matrices and Calculation). Moscow, Nauka, 1984, 320 p.
15. **Kaverina R., Kogan F., Yakovlev L.** *Novosti ElektroTehniki – in Russ. (News of Power Engineering)*, 2007, No. 4(46) [Electron. resource] <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/11.php> (Data of apple 10.06.2019).
16. **Kaverina R., Kogan F., Yakovlev L.** *Novosti ElektroTehniki – in Russ. (News of Power Engineering)*, 2007, No. 5(47) [Electron. resource] <http://news.elteh.ru/arh/2007/47/12.php> (Data of apple 10.06.2019).
17. **Abdurakhmanov A.M., Glushkin S.V., Protasenko I.S., Shuntov A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 8, pp. 12–17.

[29.08.2019]