

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОДСИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Актуальность проблемы

Протекание энергообменных процессов в системе тягового электроснабжения имеет случайный нестационарный характер, а их характеристики в любой момент времени являются случайными величинами. Математическая модель случайного процесса строится на основе ансамбля его реализации, а свойства описываются вероятностными характеристиками.

Закон распределения случайной величины полностью характеризует ее изменение во времени [1], то есть может быть однозначно применен в качестве модели после определения соответствующих числовых характеристик. Кроме распределения вероятности для описания случайных процессов также применяются корреляционные и спектральные функции и аналитические выражения с порядком не больше 5, при этом наиболее часто используется модель третьего порядка [2].

Определение характеристик нестационарных случайных процессов представляет сложную задачу, особенно в условиях ограниченной выборки. На сегодня не существует единой методологии, согласно которой возможно анализировать свойства нестационарного процесса любого типа, используя его индивидуальную реализацию. Обобщенный подход к решению указанной задачи заключается во введении гипотезы о специфическом характере нестационарного исследуемого процесса, который рассматривается как результат действия некоторых детерминированных факторов на стационарный случайный процесс. При таком подходе, обычно, используются разные виды моделей, которые комбинируют или обобщают для наибольшего соответствия реальным физическим условиям. Отметим, что наибольшее распространение для описания нестационарных процессов в технике получила аддитивная модель вида [3] :

$$x(t) = M(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

где $M(t)$ – математическое ожидание, которое зависит от времени; $\varepsilon(t)$ – стационарный нормальный процесс с известными параметрами.

Если у нас есть n реализаций нестационарного случайного процесса $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, то, измерив в фиксированный момент времени значения переменных и усреднив их, можно определить оценку математического ожидания:

$$m_x^*(t_1) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i(t_1) \quad (2)$$

Многочисленное повторение аналогичных опытов в одинаковых условиях для разных моментов t дает ряд дискретных значений $m_x^*(t_1)$, что позволяет после интерполяции получить функцию $m_x^*(t_1)$. В большинстве случаев существует необходимость определения математического ожидания нестационарного случайного процесса по одной реализации. Решение данной задачи осуществляется методом сглаживания [2]. Обобщение этого метода на нестационарные процессы и определение условий применимости выполнены Пугачевым В.С. [1]. Процедура сглаживания осуществляется с помощью линии, ординаты которой определяются как :

$$y_z(t) = [x(t + \tau) - m_x^*(t + \tau)] \cdot [x(t) - m_x^*(t)] \quad (3)$$

Для нахождения условий достаточной точности, необходимо дать математическое определение сглаживающей кривой. В общем случае операция сглаживания может быть выполнена большим количеством методов, наиболее простым среди которых является метод скользящей средней :

$$m_x^*(t) = \frac{1}{2 \cdot T_0} \cdot \int_{t-T_0}^{t+T_0} x(s) ds \quad (4)$$

Интенсивное развитие компьютерной техники и программного обеспечения позволяют осуществлять анализ случайных процессов реализовывая сложные алгоритмы и значительное количество вычислений в режиме реального времени согласно установленным процедурам [4]. Необходимо отметить, что на сегодня не существует единой методологии, которую можно было бы применять для анализа временных рядов изменения электромагнитных помех для всех возможных ситуаций [5], поэтому разработка методологии моделирования отклонений напряжения в задачах управления режимами работы электрической тяги постоянного тока является актуальной и востребованной проблемой.

Целью этой работы является развитие подходов к моделированию отклонений напряжения на основании полученных результатов экспериментальных исследований.

Моделирование отклонений напряжения на шинах переменного тока

Для моделирования изменений отклонения напряжения (δU_t) использована модель вида (1), в которой $M(t)$ представляет тренд T , а $\varepsilon(t)$ стационарный нормальный процесс с параметрами, определенными в результате применения стандартных процедур авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС).

В качестве примера получения модели δU_t рассмотрим изменение напряжения 35 кВ на подстанции «В». Временной ряд является нестационарным, что следует из анализа рис. 1. То же можно отметить, анализируя автокорреляционную функцию (рис. 2). Значения коэффициентов автокорреляции очень медленно уменьшаются в зависимости от сдвига.

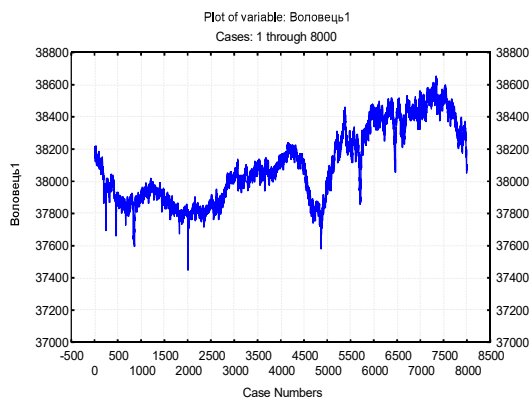


Рис. 1. Изменение напряжения 35 кВ на шинах тяговой подстанции

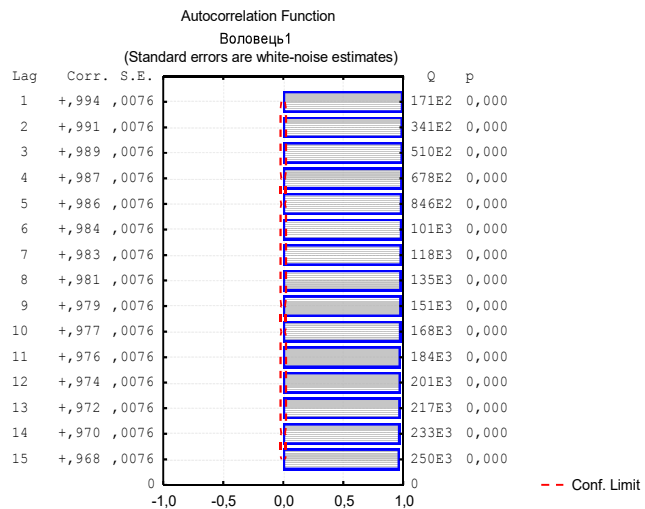


Рис. 2. Автокорреляционная функция изменения напряжения

Выделяя из этого ряда тренд получим:

$$T_{\delta U^*} = -0,426 \cdot t^3 + 15,202 \cdot t^2 - 121,25 \cdot t + 2936$$

Для превращения исходного ряда в стационарный ряд возьмем разницу первого порядка по лагу 1 от нестационарного ряда. Полученный стационарный временной ряд (рис. 3) можно идентифицировать моделью АРПСС (модель авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего).

На рис. 4 показано, что автокорреляционная функция преобразованного ряда затухает и имеет выбросы на лаге 1 (остальные значения близки к нулю). В соответствии с вышеприведенными критериями можно допустить, что соответствующей для анализа и прогноза есть модель скользящего среднего. Для уточнения этого предположения рассмотрим оценки частных автокорреляций.

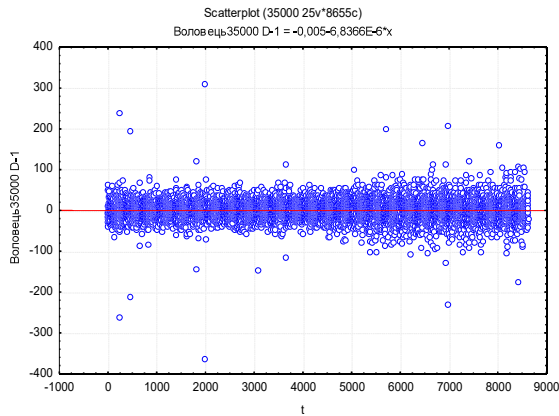


Рис. 3. Преобразованный исходный ряд изменения напряжения

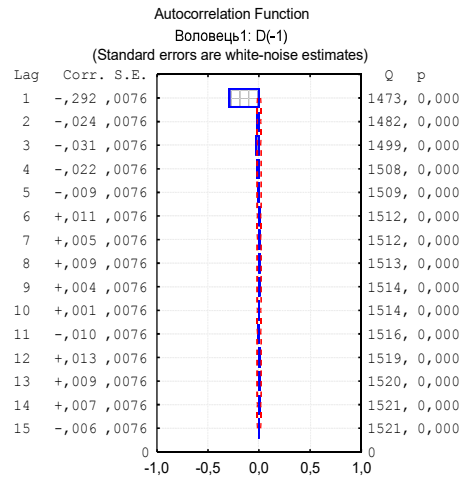


Рис. 4. Автокорреляционная функция преобразованного ряда изменения напряжения

Из рис. 5 видно, что частная автокорреляционная функция экспоненциально затухает. Это дает основание утверждать, что исходный временной ряд можно описать моделью скользящего проинтегрированного среднего вида АРПСС(0,1,1): порядок разницы d равняется 1, число параметров авторегрессии p равняется 0, число параметров скользящего среднего q равняется 1.

Поскольку модель идентифицирована, число ее параметров известно, можно генерировать реализации разных процессов с определенными значениями параметров. Анализ временного ряда показал, что из указанных моделей модель АРПСС(0,1,1) наиболее адекватна. Остатки $\varepsilon(t)$ разницы между наблюдаемыми значениями ряда и оцененными с помощью модели (рис. 6), распределены практически нормально (рис. 7), то есть могут быть получены генератором, который дает нормально распределенные, псевдслучайные числа.

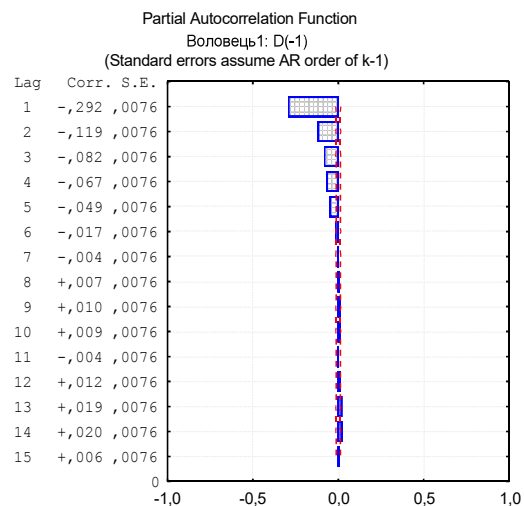


Рис. 5. Частная автокорреляционная функция преобразованного ряда изменения напряжения

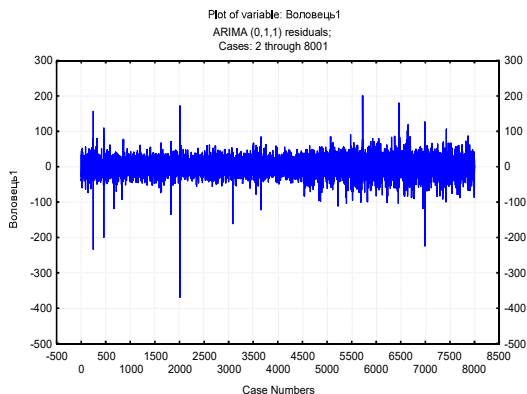


Рис. 6. Модель АРПСС(0,1,1)

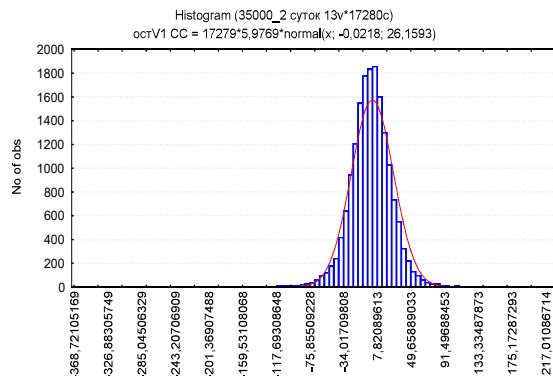


Рис. 7. Распределение остатков разницы между наблюдаемым и смоделированным рядами

Электропоставления та электроустаткування

Выполняя описанные выше превращения для временных рядов отклонений напряжения, определим их тренды в виде полиномиальных зависимостей 3-го порядка для отклонения напряжения δU от номинального значения. Полученные результаты для присоединений переменного тока сведем в табл. 1. - 3.

Таблица 1

Тренды составляющих отклонения напряжения в сети 110 кВ		
№ пор	Тяговая подстанция	$T\delta U$
1	«Л»	$0,790 \cdot t^3 - 45,656 \cdot t^2 + 636,64 \cdot t + 9862$
2	«С»	$-0,126 \cdot t^3 + 10,44 \cdot t^2 - 156,19 \cdot t + 12815$
3	«О»	$-0,678 \cdot t^3 + 25,194 \cdot t^2 - 191,17 \cdot t + 7698$

Таблица 2

Тренды составляющих отклонения напряжения в сети 35 кВ		
пор	Тяговая подстанция	$T\delta U$
1	«Л»	$-0,036 \cdot t^3 - 4,682 \cdot t^2 + 121,96 \cdot t + 3409$
2	«Н»	$-0,224 \cdot t^3 + 4,711 \cdot t^2 + 12,831 \cdot t + 3278$
3	«Б»	$-0,193 \cdot t^3 + 2,785 \cdot t^2 - 34,886 \cdot t + 1924$

Таблица 3

Тренды составляющих отклонения напряжения в сети 10 кВ		
№ пор	Тяговая подстанция	$T\delta U$
1	«С»	$-0,058 \cdot t^3 + 1,281 \cdot t^2 + 1,257 \cdot t + 520$
2	«Н»	$-0,0013 \cdot t^3 - 1,194 \cdot t^2 + 29,75 \cdot t + 237$
3	«Ос»	$-0,233 \cdot t^3 + 4,936 \cdot t^2 + 24,153 \cdot t + 340$
4	«Ч»	$0,0408 \cdot t^3 - 1,644 \cdot t^2 + 19,781 \cdot t + 294$
5	«О»	$-0,078 \cdot t^3 + 2,934 \cdot t^2 - 23,329 \cdot t + 579$

На примере одной тяговой подстанции для одного из присоединений покажем графические зависимости трендов и исходных временных реализаций, исходные реализации и восстановленные временные ряды, а также оценим адекватность полученных математических моделей помех.

Восстановление временных рядов выполнялось с применением полученных формул с добавлением случайной составляющей, которая определялась путем розыгрыша равномерно распределенной величины с дальнейшим масштабированием к нормальному закону распределения с результирующими параметрами (пример для уровня напряжения 10 кВ приведен в табл. 4). Результирующие параметры определены с использованием обобщенной теоремы Чебышева [6].

Таблица 4

Параметры законов распределения остатков $\epsilon(t)$ отклонений напряжения на шинах 10 кВ			
пор	Тяговая подстанция	$\hat{i} [\hat{\sigma}]$	$\sigma[\hat{\sigma}]$
	«С»	-0,0116	25,5899
	«Ск»	-0,0185	25,592
	«Н»	0,0119	8,0615
	«Ос»	0,2353	10,7681
	«Ч»	0,0047	23,306
	«О»	0,0484	29,963
	Результирующее	0,0450	9,024

Результаты моделирования отклонения напряжения в сети 10 кВ для одной из тяговых подстанций приведены на рис. 8 (1 - исходный ряд; 2 - тренд; 3 - модель).

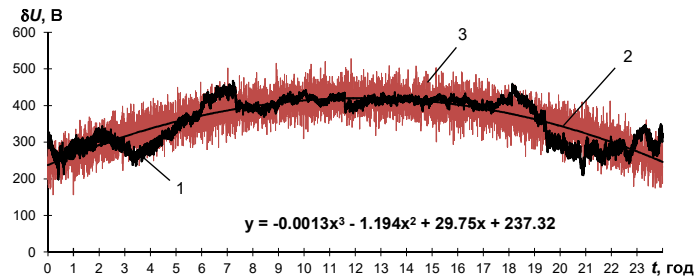


Рис. 8. Моделирование отклонений напряжения для шин 10 кВ

Проверка адекватности полученных моделей и оценка их точности выполнялась согласно методик, описанных в [5]. Основой их применения является статистическая проверка гипотезы тождественности законов распределения реального и смоделированного рядов. Основой проверки является неперевышение некоторой критической оценки расхождения сравниваемых значений меры D :

$$D = \sup \{F_p(t) - F_m(t)\} \quad (5)$$

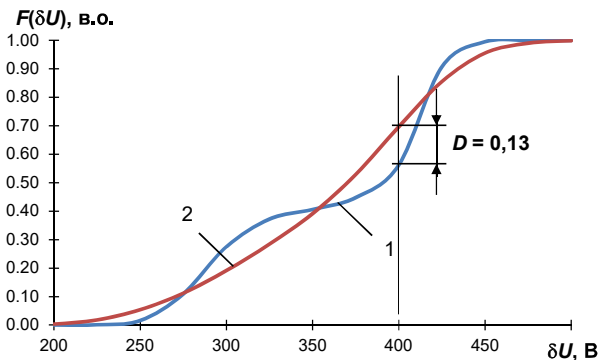


Рис. 9. Проверка адекватности модели

В качестве такой оценки широко применяется критерий Смирнова. Выполнив необходимые расчеты, получаем $D_{\delta U} = 0,25$. На рис. 9 приведен пример проверки предложенной модели для отклонения напряжения. Его анализ показывает, что предложенная модели является адекватной. Адекватность предложенной модели подтвержена и для других присоединений переменного тока.

Моделирование отклонений напряжения на шинах постоянного тока

В качестве примера получения модели δU_t рассмотрим изменение отклонений напряжения 3,3 кВ на подстанции «В» (рис. 10). Временной ряд является нестационарным, что также можно определить, анализируя его автокорреляционную функцию (рис. 11). Значения коэффициентов автокорреляции очень медленно уменьшаются в зависимости от сдвига. Это дает нам основание применить для моделирования отклонений напряжения на шинах 3,3 кВ методологию описанную выше. Результаты расчетов, моделирования и проверки адекватности приведены в таблицах 5-6 и на рис. 10-13.

Таблица 5

Тренды составляющих отклонения напряжения в сети 3,3 кВ

пор	Тяговая подстанция	$\sigma U = f(t)$, В; _ , год
	«Л»	$-0,043 \cdot t^3 + 1,259 \cdot t^2 - 5,743 \cdot t + 238,5$
	«С»	$-0,0753 \cdot t^3 + 2,792 \cdot t^2 - 26,718 \cdot t + 223,5$
	«Н»	$-0,0534 \cdot t^3 + 1,956 \cdot t^2 - 16,928 \cdot t + 266,4$
	«В»	$-0,0046 \cdot t^3 + 0,215 \cdot t^2 - 3,652 \cdot t + 280,4$

Таблица 6

Параметры законов распределения остатков отклонений напряжения в сети 3,3 кВ

пор	Тяговая подстанция	$\hat{i} [\hat{\sigma}]$	$\sigma[\hat{\sigma}]$
	«Л»	-0,0026	13,6775
	«С»	-0,0072	9,5181
	«Н»	-0,0000865	4,9168
	«В»	0,0044	10,0448
	Результирующее	-0,00137	5,017

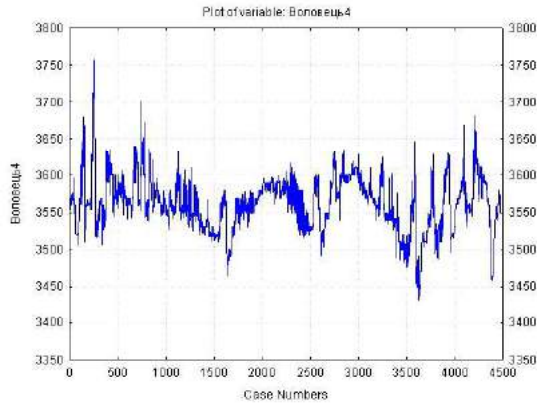


Рис. 10. Измеренный временной ряд изменения напряжения на шинах 3,3 кВ

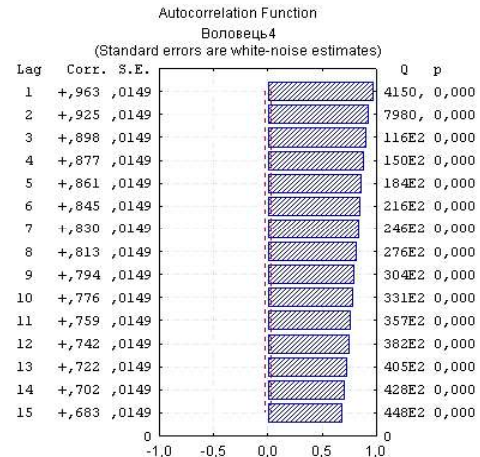


Рис. 11. АКФ измеренного временного ряда изменения напряжения на шинах 3,3 кВ

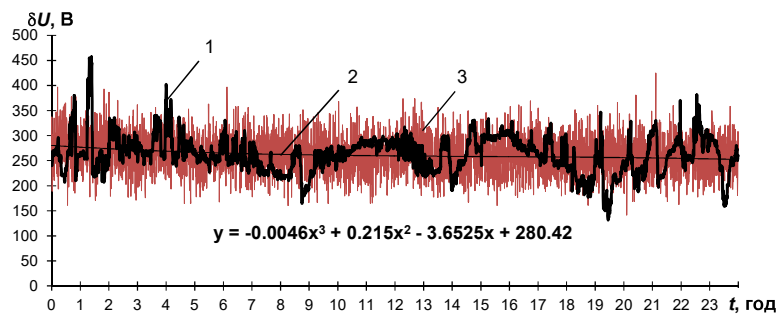


Рис. 12. Моделирование отклонений напряжения для шин 3,3 кВ

Выводы

Разработаны методологические подходы к моделированию отклонений напряжения на основе экспериментальных исследований как в подсистеме переменного, так и в подсистеме постоянного тока. Предлагается применять аддитивную модель, состоящую из тренда и случайной стационарной величины, получаемой генератором случайных чисел с нормальным распределением и заданными статистическими характеристиками.

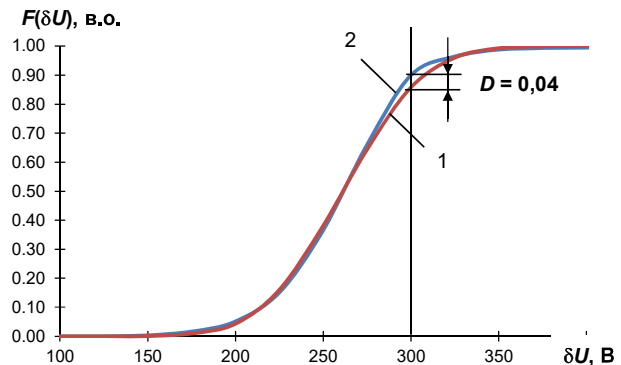


Рис. 13. Проверка адекватности модели отклонений напряжения на шинах 3,3 кВ

Список литературы

1. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. - М.: ГИФМЛ, 1960.- 884 с.
2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. - М.: Мир, 1976. - 760с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функция. - М.: Наука, 1968. - 468 с.
4. Анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров / Под редакцией В.Э. Фигурнова. - М.: ИНФРА-м, 2003. - 544 с.
5. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) - М.: Высшая школа, 1984. - 439 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 9-ое издание - М.: Издательский центр Академия, 2003. - 576 с.

Рекомендовано до друку