

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЁМНИКЕ ПЕРВОГО УКРАИНСКОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ДЭ1

Мищенко Т.Н., Михаличенко П.Е., Костин Н.А., д.т.н., проф.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна
Украина, 49010, г.Днепропетровск, ул. Ак. В.А. Лазаряна, 2, "ДИИТ", каф. "Теоретические основы электротехники"
Тел./факс+38(0562)7761-791, E-mail:evm@diit.dp.ua

У статті викладені результати досліджень випадкового процесу зміни напруги на струмоприймачі $U(t)$ електровозів постійного струму ДЭ1 і ВЛ8. Отримано і проаналізовано основні моментні функції коливань $U(t)$ і його нормовану спектральну густину. Виконано неканоничне розкладання $U(t)$ як стаціонарного випадкового процесу. Зроблен розрахунок середнього числа викидів для електровоза ДЭ1.

В статье изложены результаты исследований случайного процесса изменения напряжения на токоприемнике $U(t)$ электровозов постоянного тока ДЭ1 и ВЛ8. Получены и проанализированы основные моментные функции колебаний напряжения $U(t)$ и его нормированная спектральная плотность. Выполнено неканоническое разложение $U(t)$ как стационарного случайного процесса. Произведён расчёт среднего числа выбросов для электровоза ДЭ1.

Тяговые сети электрических железных дорог постоянного тока характеризуются большими непрерывными колебаниями напряжения $U(t)$. При этом следует различать длительное постепенное изменение напряжения, при котором скорость поезда успевает достичь значений, близких к установившимся, и резкие кратковременные толчки напряжения. В случае длительного понижения напряжения, вызванного удалением поезда от пунктов питания, скорость электровоза (и поезда) с двигателями последовательного и независимого возбуждения снижается пропорционально напряжению, так как не изменяется магнитный поток, создаваемый главными полюсами. У двигателей же параллельного возбуждения снижение напряжения вызывает уменьшение тока возбуждения, а следовательно, и магнитного потока. При этом скорость движения снижается в меньшей степени, но для сохранения той же силы тяги должен увеличиться ток якоря, что утяжеляет условия работы тяговых двигателей, а также системы электроснабжения, так как это приводит к увеличению потерь напряжения в ней.

Значительно опаснее резкие кратковременные толчки напряжения, при которых скорость поезда не успевает заметно измениться. Поэтому даже небольшие колебания напряжения вызывают недопустимо большие толчки тока в тяговых двигателях, вызывающие нарушения коммутации двигателей или срабатывание их аппаратов защиты. Колебания напряжения отражаются на всех основных характеристиках движения поезда: скорости и времени хода, потребляемых токах, расходе электроэнергии, использовании мощности тяговой единицы, нагревании тяговых двигателей, а также на работе вспомогательных машин [1,2].

Знание характеристик колебаний $U(t)$ позволяет, во-первых, правильно учесть их действие на работу электрооборудования подвижного состава в различных режимах, во-вторых, определить потери напряжения в контактной сети и степень надежности его уровня у поезда, а также оказывает существенное влияние на КПД тяговых двигателей. При понижении напряжения КПД увеличивается в области малых нагрузок вследствие уменьшения механических и маг-

нитных потерь и снижается при средних и особенно больших нагрузках из-за увеличения удельного значения электрических потерь, которые при данном токе не зависят от напряжения [1].

Зависимость напряжения в контактном проводе (и на токоприёмнике электровоза) в общем случае является случайной функцией времени - случайным процессом $U(t)$ (рис.1).

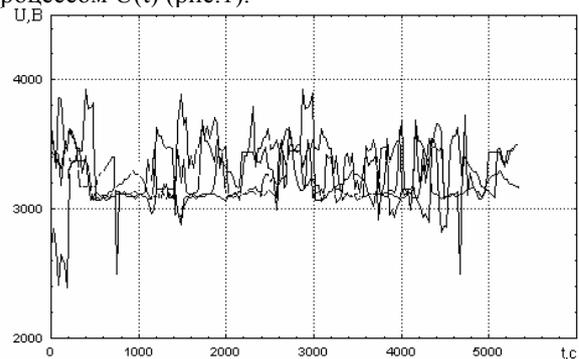


Рис.1.Реализации (пять) напряжения на токоприёмнике электровозов ДЭ1.

В связи с этим учёт колебаний напряжения должен производиться вероятностно-статистическими методами, а, следовательно, для практических расчетов нужны вероятностные характеристики изменчивости напряжения. Особенное значение приобретает знание моментных функций – математического ожидания $m_U(t)$, дисперсии $\sigma_U^2(t)$, корреляционной $K_U(\tau)$ и спектральной $S_U(\omega)$ функций напряжения. Функция корреляции $K_U(\tau)$ характеризует внутреннюю структуру случайного процесса $U(t)$; она позволяет судить о степени зависимости между значениями напряжения в различные моменты времени движения электровоза. Спектральная характеристика – спектральная плотность $S_U(\omega)$ - описывает зависимость плотности распределения дисперсии амплитуд гармоник по частотному диапазону. Характеризуя энергетическую сторону $U(t)$, функция $S_U(\omega)$ позво-

ляет определить частоты, которые вносят основной вклад в статистическую динамику напряжения.

Вопросам теоретического расчёта уровня напряжения в контактной сети посвящён целый ряд работ. Однако очень мало публикаций об установлении вероятностных характеристик напряжения по статистическим данным замеров $U(t)$ напряжения на реально действующих участках энергоснабжения. В данной работе ставится цель хотя бы частично восполнить этот пробел.

Для получения вероятностных характеристик были записаны с бортового компьютера и обработаны данные реализаций напряжения $U(t)$ на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ1 и, для сравнения, электровозов постоянного тока серии ВЛ8 на участках Приднепровской железной дороги. Обработке подвергались по 40 реализаций случайного процесса $U(t)$. Для ввода в ПЭВ последний квантовался по времени согласно рекомендациям [3] с интервалом Δt , равным 30с.

В процессе обработки были определены вероятностные функции $m_U(t)$, $\sigma_U(t)$, дисперсия $D_U(t)$, а также коэффициент асимметрии A_S и эксцесс E_X одномерного распределения напряжения (таблица).

Электро-воз	$m_U(t)$, В	$D_U(t)$, В ²	$\sigma_U(t)$, В	A_S , от.ед.	E_X , от.ед.
ДЭ1	3270,0	34970	187,0	-0,21	-0,11
ВЛ8	3270,0	49556	215,6	-0,26	0,14

Анализ реализаций $U(t)$ (рис.1) и данные таблицы показывают, что при номинальном напряжении, равном 3000В, фактические его значения изменяются в широких пределах: 2620-3920В при среднем 3270В на электровозах ДЭ1 и 2710-3830В при том же среднем – на ВЛ8. Однородный характер колебаний $U(t)$ (рис.1), а также постоянство во времени математического ожидания $m_U(t)$ и дисперсии $D_U(t)$ дают основание считать напряжение $U(t)$ стационарным случайным процессом. Одновременно, вид статистического распределения (гистограммы) для сечений (рис.2), незначительные величины коэффициентов асимметрии и эксцесса (табл.), а также величина вероятности $p=0,15$ (по критерию Пирсона) позволяют заключить, что одномерным (в сечении t_i) распределением напряжения $f(U/t_i)$ является закон Гаусса с параметрами, приведёнными в таблице.

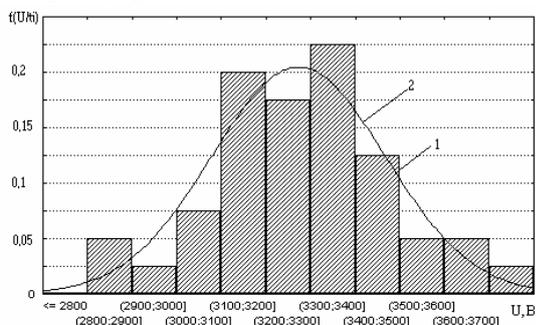


Рис.2. Статистическое (кривая 1) и теоретическое (кривая 2) одномерные распределения случайной функции напряжения на токоприёмнике электровоза постоянного тока ДЭ1.

На рис.3 приведены графики нормированных корреляционных функций $\rho_U(\tau)$ исследуемого напряжения для обеих серий электровозов (где τ – промежуток времени между двумя соседними сечениями напряжения).

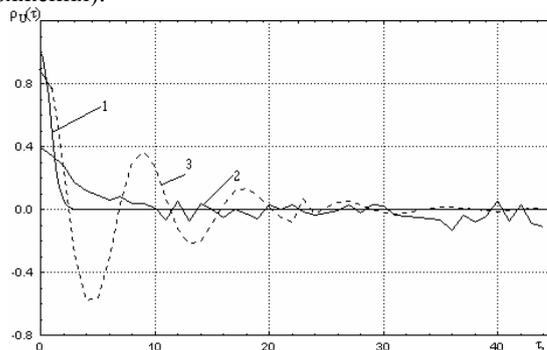


Рис.3. Нормированные корреляционные функции случайного процесса $U(t)$ электровоза ДЭ1 (1 - аппроксимированная кривая), (2 - экспериментальная кривая); электровоза ВЛ8 (3 - аппроксимированная кривая).

Характер изменения зависимостей $\rho_U(t)$ позволяет сделать следующие выводы:

- функции корреляции стремятся к нулю с возрастанием τ , следовательно, случайный стационарный процесс напряжения $U(t)$ обладает эргодическим свойством;
- знакопеременный характер $\rho_U(\tau)$ свидетельствует о наличии в структуре процесса напряжения «слабо» периодической составляющей;
- сравнительно медленное затухание колебаний нормированной корреляционной функции указывает на сохранение связи между значениями напряжения при значительных τ ;
- отрицательные значения $\rho_U(\tau)$ подчёркивают тот факт, что положительным отклонениям напряжения в данный момент времени t_i соответствуют преимущественно отрицательные отклонения его в другой момент времени t_{i+1} и наоборот.

Характер изменения экспериментальных зависимостей $\rho_U(\tau)$ позволил аппроксимировать их выражениями:

для ДЭ1:

$$\rho_U(\tau) = \exp^{-v\tau^2}, v > 0 \quad (1)$$

где $v=0,722\text{мин}^{-2}$;

для ВЛ8:

$$\rho_U(\tau) = \exp^{-\alpha|\tau|} \cdot \left(\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right), \quad (2)$$

где $\alpha=0,112\text{мин}^{-1}$, $\beta=0,708\text{мин}^{-1}$.

Нормированная спектральная плотность $S_U(\omega)$ рассматриваемого процесса $U(t)$ была получена с использованием известного преобразования Фурье:

$$S_U(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \rho_U(\tau) \cos \omega\tau d\tau \quad (3)$$

Подставив в (3) выражения (1) и (2) и проинтегрировав их, а также выполнив некоторые алгебраические преобразования, с учётом найденных значений

α , β и ν получим, что для напряжения на токоприёмнике электровозов ДЭ1

$$S_U(\omega) = \frac{\alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)} = \frac{0,722}{\pi(0,727^2 + \omega^2)}, \quad (4)$$

а электровозов ВЛ8

$$S_U(\omega) = \frac{2}{\pi} \sigma_U^2 \alpha \frac{\alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2 \omega^2} = \frac{1,28 \cdot 10^{-3}}{(\omega^2 - 51,3 \cdot 10^{-2})^2 + 5,04 \cdot 10^{-2} \omega^2} \quad (5)$$

График нормированной спектральной плотности дисперсии процесса $U(t)$, построенный по выражению (4), представлен на рис.4

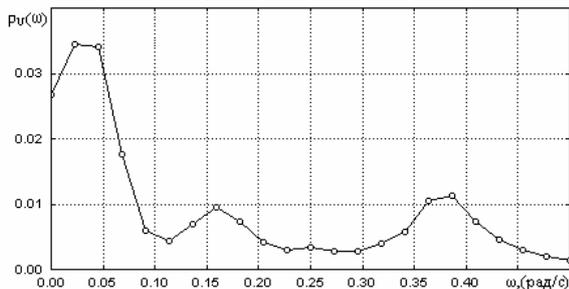


Рис.4. Нормированная спектральная плотность функции напряжения на токоприёмнике электровоза ДЭ1.

Расчёт установившихся и переходных процессов в нелинейных силовых цепях электроподвижного состава при учёте случайного характера напряжения на токоприёмнике весьма сложен. Анализ несколько упрощается, если случайную функцию $U(t)$ представить в форме детерминированной функции случайных величин. Существуют несколько методов такого разложения: представления Карунена, каноническое разложение Пугачёва, в виде обобщённых рядов Фурье, Котельникова, неканоническое разложение и др. По-нашему мнению, для анализа исследуемых электрических цепей наиболее эффективным является метод неканонических разложений [4], поскольку другие методы требуют использовать большое число членов ряда и, соответственно, большое число случайных величин. Тогда, согласно сути метода неканонических разложений [4], случайная стационарная функция напряжения $U(t)$ может быть представлена неслучайной функцией трёх независимых случайных величин $\lambda_1, \lambda_2, \gamma$:

$$U(t) = m_U(t) + \lambda_1 \sin \gamma t + \lambda_2 \cos \gamma t. \quad (6)$$

Величины λ_1 и λ_2 имеют нулевое математическое ожидание, дисперсию, равную σ_U^2 , и произвольный закон распределения. Плотность распределения случайной величины γ определяется по формуле

$$f(\gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_U(\tau) \exp^{-j\gamma\tau} d\tau, \quad (7)$$

где интегрирование осуществляется в пределах изменения функции $\rho_U(\tau)$.

Подставив в (7) выражения (1) и (2) и проинтегрировав, с учётом значений α, β, ν получим распределение $f(\gamma)$ напряжения на токоприёмнике электровоза

ДЭ1 – закон Гаусса, с математическим ожиданием $m_\gamma=0$ и дисперсией равной 2ν :

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\gamma^2}{4\nu}\right] = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{\gamma^2}{2 \cdot 1,44}\right], \quad (8)$$

для $U(t)$ ВЛ8 закон:

$$f(\gamma) = \frac{2\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{\pi} \cdot \frac{1}{(k^2 - \gamma^2)^2 + 4\alpha^2 \gamma^2} = \frac{3,66 \cdot 10^{-2}}{(51,3 \cdot 10^{-2} - \gamma^2) + 5 \cdot 10^{-2} \gamma^2} \quad (9)$$

Кроме найденных вероятностных характеристик напряжения $U(t)$ представляет практический интерес среднее число превышений (выбросов) $N_1(U_{ном})$ в единицу времени случайной функцией напряжения своего номинального значения $U_{ном}=3000В$. Для нормального стационарного процесса, каким является $U(t)$, величина $N_1(U_{ном})$ определяется по выражению [5]

$$N_1(U_{iii}) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{d^2 \rho(\tau)}{d\tau^2}} \Big|_{\tau=0} \cdot \exp\left[\frac{(U_{iii} - m_U)^2}{2\sigma_U^2}\right]. \quad (10)$$

Продифференцировав дважды выражение (1) и (2) для $\rho(\tau)$ и подставив в (10) числовые данные таблицы и параметров α, β, ν , получим, что среднее число выбросов в минуту напряжения $U(t)$ над уровнем 3000В составляет: 12-при работе электровозов ДЭ1 и 4,8 - электровозов ВЛ8.

ВЫВОДЫ:

1. Процесс изменения во времени напряжения на токоприёмнике электроподвижного состава постоянного тока, а, следовательно, и в контактной сети является случайным стационарным процессом с одномерным распределением по закону Гаусса.
2. Случайные колебания напряжения достаточно большие: даже математическое ожидание $m_U(t)$ превышает номинальное значение $U_{ном}=3000В$.
3. Среднее число превышений фактическими значениями напряжения уровня $U_{ном}$ составляют 12 выбросов в минуту для электровоза ДЭ1.
4. Случайная стационарная функция напряжения может быть представлена (замещена) детерминированной функцией трёх независимых случайных величин, что заметно упрощает анализ процессов в нелинейных силовых цепях электровозов.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги.-М.: Транспорт, 1983.-328с.
- [2] Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В., Шляхто П.Н. Подвижной состав электрических железных дорог.-М.: Транспорт, 1968 -296с.
- [3] Электромагнитная совместимость электроприёмников промышленных предприятий.//Под ред. академика АН Украины А.К. Шидловского. -Киев: Наук. думка, 1992.-236с.
- [4] Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. -М.: Машиностроение, 1968.-246с.
- [5] Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. -М.: Наука, 1970.-392с.

Поступила 09.02.03