

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Н.А.Костин¹, докт.техн.наук, Т.Н.Мищенко², канд.техн.наук

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепр, 49010, Украина,

e-mail: nkostin@ukr.net, mishchenko_tn@ukr.net

Обоснована необходимость использования методов идентификации при прогнозировании процессов в сложных мощных стохастических устройствах систем электрического транспорта. В качестве идентификационной модели электроподвижного состава предложено (вместо идеального источника тока) использовать импульсную переходную функцию. На основе корреляционной теории случайных процессов, которыми являются напряжения и токи в системах электрического транспорта, получено аналитическое выражение корреляционного интегрального уравнения в форме уравнения Винера-Хопфа, решение которого дает возможность получить импульсную переходную функцию. Рассмотрены методы решения указанного уравнения. Необходимые для решения интегрального уравнения авто- и взаимокорреляционные функции стохастических процессов напряжений и токов в системах получают экспериментальным способом на действующих участках железных дорог. Осуществлено практическое определение импульсной переходной функции как модели прогнозирования для электропоездов постоянного тока, которые эксплуатируются на электрифицированных участках Приднепровской железной дороги. С этой целью осуществлен мониторинг стохастических процессов напряжения и тягового тока в реальных условиях эксплуатации. Импульсные переходные функции получены в виде экспоненциальных функций, показаны их адекватности и «универсальности» как моделей прогнозирования. Библ. 24, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: идентификация, модель, прогнозирование, импульсная переходная функция, стохастический процесс, электрический транспорт.

Постановка задачи. Правильное определение основных взаимосвязанных ключевых параметров устройств систем электрического транспорта является основой надежной, стабильной и эффективной эксплуатации электрифицированных участков железных дорог, что особенно важно при скоростном (160...200 км/час) движении поездов. Такой выбор должен основываться на ряде критериев, главными из которых являются [1]: напряжение на токоприемнике и ток электроподвижного состава (ЭПС); фидерные токи, от которых зависят термические параметры тяговых трансформаторов и цепной контактной подвески; потери в тяговой сети и др. Планирование, организация и внедрение любой системы электрического транспорта базируется на прогнозных значениях указанных критериев.

Со времен первых исследовательских работ на электрифицированных участках [2] и до настоящего времени как в Украине [3], так и в зарубежной науке [4,5,13] существующие методы текущего анализа и прогнозирования электромагнитных процессов в системах электрического транспорта основываются на «классическом» (математическом) или имитационном (компьютерном) моделировании. При этом тяговые нагрузки задаются токами, т.е. электропоезда и электропоезда (также трамваи и мотор-вагоны метрополитенов) в расчетных схемах замещаются идеальными источниками тока [1, 2–5]. Однако, как известно [6], идеальные источники тока обладают бесконечной мощностью, а таких источников электроэнергии в практике не существует. Во-вторых, ток источника определяется по результатам тягового расчета, выполненного для конкретного железнодорожного участка, конкретного типа электроподвижного состава, для режима номинального напряжения на токоприемнике ЭПС, в то время как реально оно является случайным процессом (рис.1) [7–9], поэтому тяговые расчеты являются очень приближенным методом анализа режима работы ЭПС, а использование идеального источника тока в качестве модели ЭПС обуславливает существенные (до 6...7%) ошибки при расчете фидерных токов, напряжения на токоприемнике и потери мощности в устройствах систем электрического транспорта даже при работе ЭПС в режиме обеспечения «обычного» (до 120...160 км/час) движения поездов [3]. В то же время с увеличением мощности, реализуемой ЭПС, т.е. при скоростном движении поездов, указанные ошибки существенно (до 10%) возрастают, т.к. для его обеспечения

необходимы более мощные ЭПС. Например, мощность электровоза для скоростного пассажирского поезда с числом вагонов 14 составляет 9000кВт [10], в то время как для «обычного» движения – не превышает 5000...6000кВт.

Кроме этого, применение методов «классического» и компьютерного моделирования устройств электрического транспорта, особенно при скоростном движении, практически очень затруднено. Это обусловлено следующим. «Классическое» моделирование базируется на построении схемы замещения исследуемого устройства или системы с последующим математическим описанием, согласно законам электротехники, протекающих в них физических процессов. Однако анализ приведенных в научных публикациях [11,12] схемотехнических решений частично уже созданных и перспективных подсистем тягового электроснабжения и электроподвижного состава свидетельствует, во-первых, о существенной сложности даже их структурных схем, не говоря уже о расчетных схемах замещения с алгоритмами работы их тяговых преобразователей. Следовательно, закономерна сложность и математических моделей даже для одной фидерной зоны и одного поезда на ней. Во-вторых, практически, как правило, на фидерной зоне движется несколько поездов (т.е. единиц ЭПС), а при организации скоростного движения планируется вообще пакетный график движения поездов с 5 ... 7 поездами в пакете на фидерной зоне. В-третьих, при анализе электромагнитных и электроэнергетических процессов в подсистеме тягового электроснабжения нельзя ограничиваться одной фидерной зоной, надо рассматривать 7 зон. Наконец, задача моделирования усложняется и тем, что напряжения и токи в системах электрического транспорта являются реализациями случайных процессов (рис.1), требующих вероятностных методов решения поставленных задач.

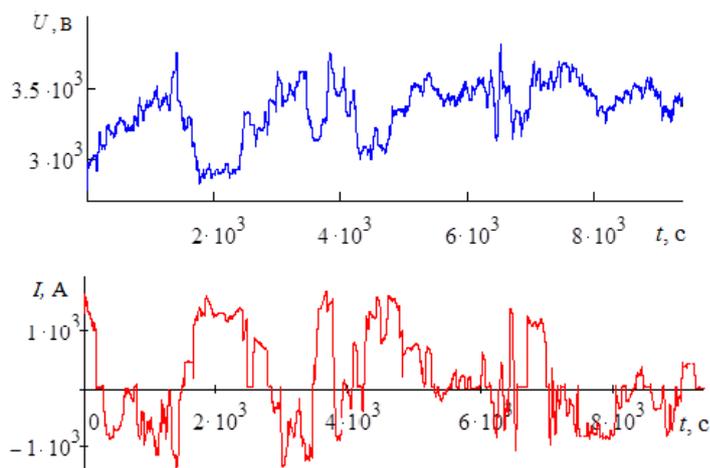


Рис. 1

решение этой проблемы возможно методами идентификации [14, 15], развитие которых наблюдается в последнее время [16–18]. Они достаточно развиты для систем с детерминированными величинами и находятся на начальной стадии в случаях стохастического изменения входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ величин, что характерно для систем электрического транспорта.

Цель работы. Адаптация и практическое применение метода импульсной переходной функции при идентификационном прогнозировании параметров электроподвижного состава постоянного тока, обеспечивающего работу соответствующих систем электрического транспорта.

Отличие научных результатов работы от существующих публикаций.

1. Впервые в Украине и Европе предложено использовать импульсную переходную функцию (вместо идеального источника тока) в качестве идентификационной модели электроподвижного состава при прогнозном моделировании электромагнитных и электроэнергетических процессов в системах электрического транспорта, в том числе и при скоростном движении поездов.

2. Получены ранее неизвестные выражения импульсной переходной функции, позволяющие прогнозировать токи электроподвижного состава, фидерные и подстанционные токи, а также потери мощности в тяговой сети при эксплуатации всех типов ЭПС постоянного тока, обеспечивающих как «обычное», так и скоростное движения поездов.

3. Впервые для моделирования электромагнитных процессов в системах электрического транспорта постоянного тока адаптирован и применен существующий метод активной параметриче-

В свою очередь, имитационные модели являются виртуальными и их применение имеет ряд ограничений, связанных с неадекватностью модели в условиях существования параметрических элементов в схеме системы, а также с трудоёмкостью собственно самого процесса моделирования [13], тем более случайных процессов напряжений и токов.

Именно указанное практически и тормозит математическое моделирование, а, следовательно, и прогнозирование процессов в перспективных системах электро-транспорта, особенно в тех, которые модернизируются для внедрения скоростного движения поездов. По нашему мнению, решение этой проблемы возможно методами идентификации [14, 15], развитие которых наблюдается в последнее время [16–18].

ской идентификации в режиме нормального функционирования электроподвижного состава при стохастическом характере напряжения на его токоприемнике и выходного электротягового тока.

Модель прогнозирования. В теории и практике прогнозирования управления линейными системами наиболее часто применяют идентификационные модели в виде «классических» форм: дифференциального или интегрального оператора, интегро-дифференциального уравнения, числового ряда, импульсной переходной функции, передаточной или частотной функций, ряда Вольтерра и др. При этом выбор вида модели определяется структурой исследуемой системы и существом поставленной задачи. В электротехнике и энергетике наиболее применимыми операторами (моделями, характеристиками) системы являются передаточные функции и импульсная переходная функция. Передаточные функции могут рассматриваться как основные характеристики линейной системы, если при анализе её свойств пользуются плоскостью комплексного переменного (что характерно при исследованиях установившихся процессов). Но чаще всего необходимы исследования в области вещественной переменной t . В этом случае, согласно мнению практически всех исследователей, в качестве идентификационной модели следует принимать импульсную переходную (весовую) функцию, так как она является исчерпывающей характеристикой любой, а значит и электроэнергетической, линейной системы.

Весовая функция, обозначим её как $g(t)$, представляет собой реакцию линейной системы (при нулевых начальных условиях) на приложенное к ней в момент времени $t=0$ детерминированное воздействие, представляющее функцию Дирака $\delta(t)$. Аналогично, если на вход линейной системы поступает воздействие в виде стационарного случайного процесса $X(t)$, на её выходе также будет стационарный случайный процесс $Y(t)$, связанный с процессом $X(t)$ уравнением свертки [19]

$$Y(t) = \int_{-0}^t g(t-\tau)X(\tau)d\tau. \quad (1)$$

Выражение (1) имеет общий вид, т.е. не содержит вероятностных характеристик процессов $X(t)$ и $Y(t)$, и поэтому не позволяет определить импульсную переходную функцию $g(t)$. В связи с этим для оценки $g(t)$ получим уравнение, связывающее корреляционные функции процессов на входе и выходе. Запишем известное выражение взаимной корреляционной функции $K_{xy}(t)$ входного $X(t)$ и выходного $Y(t)$ случайных процессов как математическое ожидание скалярного произведения центрированной функции $Y(t)$ на смещенную копию центрированной функции $X(t-\tau)$ при условии тождественного равенства нулю математических ожиданий функций $X(t)$ и $Y(t)$ [19]

$$K_{xy}(\tau) = M[X(t-\tau) \cdot Y(t)] = \frac{1}{T} \int_{-0}^T x(t-\tau) \cdot y(t) d\tau \quad (2)$$

где T – время длительности синхронно зарегистрированных реализаций $X(t)$ и $Y(t)$.

Подставив в (2) вместо функции-реакции $y(t)$ выражение свертки

$$y(t) = \int_{-0}^{\infty} x(t) \cdot g(t-\Theta) d\Theta, \quad (3)$$

после простых преобразований получим

$$K_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-0}^T x(t-\tau) d\tau \cdot \int_{-0}^{\infty} x(t) \cdot g(t-\Theta) d\Theta = \int_{-0}^{\infty} g(\Theta) \cdot K_x(\tau-\Theta) d\Theta, \quad (4)$$

где $K_x(\tau-\Theta)$ – автокорреляционная функция случайного процесса $X(t)$.

Уравнение (4) является корреляционным интегральным уравнением в форме уравнения Винера-Хопфа, решение которого при известных корреляционных функциях $K_{xy}(t)$, $K_x(t)$ позволяет получить искомое выражение импульсной переходной функции. Необходимые функции $K_{xy}(t)$, $K_x(t)$ получаем экспериментальным способом, записав и обработав реализации случайных процессов $X(t)$, $Y(t)$.

Следует подчеркнуть, что решение уравнения (4) даёт оптимальную по критерию минимума среднеквадратической ошибки импульсную переходную функцию $g(t)$ как оператор (идентификационная модель) линейной системы [19, 20].

Решение корреляционного уравнения. В последующем задача идентификации будет решаться для электроэнергетических систем транспорта, поэтому будем считать, что входным случайным воздействием является напряжение, а реакцией – ток, которые в системах электрического транспорта представляют собой случайные функции $U(t)$, $I(t)$. Тогда в уравнении (4) будем иметь дело с авто- и взаимокорреляционными функциями $K_U(t)$, $K_{UI}(t)$.

Решение корреляционного уравнения (4) возможно несколькими методами. Рассмотрим наиболее распространенные способы и сравним их с позиций трудоемкости решений и точности полученных выражений импульсной переходной функции. Одним из них является операторный метод Лапласа. Это уравнение является интегральным уравнением Вольтерра 1-го рода, в котором $g(t)$ – искомая функция, функции $K_U(t - \tau)$, $\frac{\partial K_U(t - \tau)}{\partial t}$, $K_{UI}(t)$ и $\frac{\partial K_{UI}(t)}{\partial t}$ являются непрерывными. Тогда, взяв производную от обеих частей уравнения (4) по t и воспользовавшись теоремой Бореля относительно изображения свертки любых функций-оригиналов, после некоторых преобразований получим лапласово изображение импульсной переходной функции в виде

$$L[g(t)] = L\left[\frac{K'_{UI}(t)}{K_U(t, t)}\right] \left\{ 1 + L\left[\frac{K'_U(t)}{K_U(t, t)}\right] \right\}^{-1}. \quad (5)$$

Функция-оригинал $g(t)$ определяется из (5) с использованием теории вычетов.

Вторым методом определения импульсной переходной функции является численное решение интегрального уравнения (4). Суть этого метода заключается в возможности представления уравнения Винера-Хопфа (4) системой линейных уравнений [20]. Для такого представления учитываем, что при $t \leq 0$ весовая функция $g(t) = 0$, а интервал взаимной корреляции $U(t)$ и $I(t)$ разбиваем на N равных интервалов времени: Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., $N\Delta t$. Тогда уравнение (4) может быть представлено в виде конечной суммы

$$K_{UI}(t_j) = \Delta t \sum_{i=1}^N g(t_i) K_U(t_j - t_i) \quad (6)$$

при $j = 1, 2, 3, \dots$; $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

Таким образом, для всех значений Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ..., $N\Delta t$ получим N значений ординат весовой функции $g(t)$. В матричном виде эту систему линейных уравнений можно представить как

$$\|K_{UI}\| = \|g\| \cdot \|K_U\|, \quad (7)$$

где $\|K_U\|$ – корреляционная матрица, составленная по мгновенным значениям ординат корреляционной функции входной случайной функции $U(t)$

$$\|K_U\| = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1i} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2i} & \dots & K_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{j1} & K_{j2} & \dots & K_{ji} & \dots & K_{jN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & K_{Ni} & \dots & K_{NN} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $K_{ij} = K_{ji}$; $K_{ij} = K_U(j - i)$, $i, j = 1, 2, 3, \dots, N$; $\|K_{UI}\|$ – матрица-столбец, состоящая из элементов, представляющих собой мгновенные значения ординаты взаимной корреляционной функции входной $U(t)$ и выходной $I(t)$ случайных функций; в (7) $\|g\|$ – матрица-столбец элементов, которые представляют собой искомые мгновенные значения весовой функции.

В результате решения уравнения (6) получим дискретные численные значения $g(t_i)$ искомой функции, которые аппроксимируются (если нужно) определенным аналитическим выражением.

Третьим методом является корреляционный метод факторизации, предложенный в [9], который предусматривает определенное разбиение заданных корреляционных функций. Согласно этому методу, изображение по Лапласу передаточной функции исследуемой системы можно записать как

$$F(\bar{p}) = \frac{K_{UI}^+(\bar{p}) - f(\bar{p})}{K_U^+(\bar{p}) - K_U^-(\bar{p})}, \quad (9)$$

где $K_U^+(\bar{p})$, $K_U^-(\bar{p})$, $K_{UI}^+(\bar{p})$ – изображения по Лапласу таких форм корреляционных функций

$$K_U(t) = \begin{cases} K_U^+(t) & \text{при } t \geq 0 \\ K_U^-(t) & \text{при } t < 0 \end{cases}, \quad K_{UI}(t) = \begin{cases} K_{UI}^+(t) & \text{при } t \geq 0, \\ K_{UI}^-(t) & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (10, 11)$$

Для получения изображения $F(\bar{p})$ в (9) вводится, согласно [9], функция

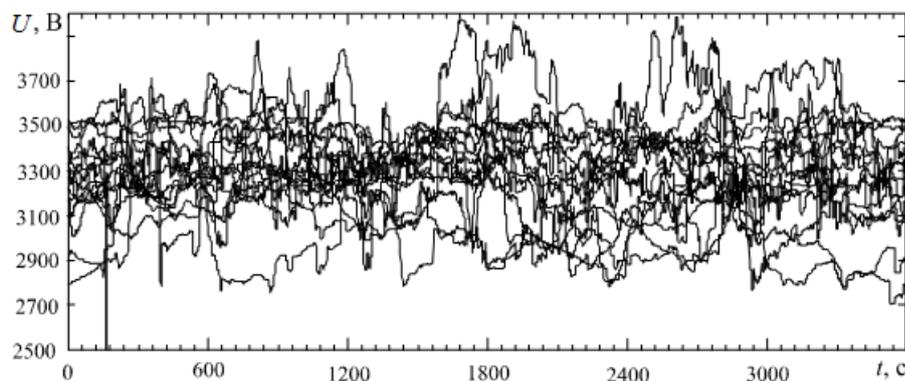
$$f(t) = \int_{-0}^{\infty} g(\tau) K_U^-(t - \tau) d\tau. \quad (12)$$

Можно показать, что искомая функция $F(\bar{p})$ является лапласовым изображением введенной функции $f(t)$: $F(\bar{p}) = L[f(t)]$.

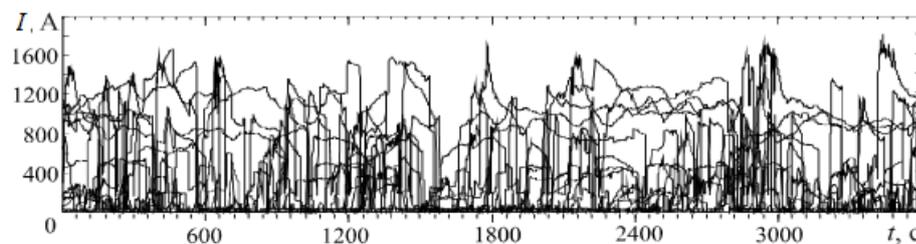
После определения $F(\bar{p})$ искомая весовая функция $g(t)$ определяется как обратное лапласово изображение функции $F(\bar{p})$. Если функция $g(t)$ исследуемой системы найдена и известна случайная функция-воздействие $X(t)$, тогда реакция $Y(t)$, как прогнозирующая функция такой системы, определяется по выражению (1).

Идентификационная модель электровозов постоянного тока. С целью оценки адекватности и «универсальности» импульсной переходной функции $g(t)$ как модели прогнозирования оценим её указанными выше методами для реально эксплуатирующегося электровоза постоянного тока ДЭ1 с последующим ее применением для других электровозов, в частности, для ВЛ8 и ВЛ11М6.

Для этого на существующих в настоящее время участках Приднепровской железной дороги в реальных условиях эксплуатации электровоза ВЛ8 была выполнена часовая регистрация 40 реализаций случайного процесса напряжения на токоприемнике электровоза $U(t)$ (рис. 2, а) и синхронно записанного также случайного процесса его тягового тока $I(t)$ (рис. 2, б) [21].



а



б

Рис. 2

Для каждой реализации $U(t)$ и $I(t)$ по известным соотношениям теории случайных процессов [19, 20] были определены автокорреляционные функции напряжения и тока, которые впоследствии были осреднены по 40 реализациям [21–23]. В результате получены усредненные корреляционные функции $K_U(\tau)$, $K_I(\tau)$,

графики которых показаны на рис.3 и которые аппроксимированы выражениями:

$$K_U(\tau) = 52350 e^{-0,0012|\tau|} \text{ В}^2,$$

$$K_I(\tau) = 332000 e^{-0,004|\tau|} \text{ А}^2.$$

Аналогичная процедура обработки реализаций $U(t)$ и $I(t)$ была выполнена для получения

взаимной корреляционной функции напряжения и тока $K_{UI}(\tau)$, показанной на рис.4 и аппроксимированной выражением $K_{UI}(\tau) = -6 \cdot 10^4 e^{-0,15|\tau|} \text{ ВА}$.

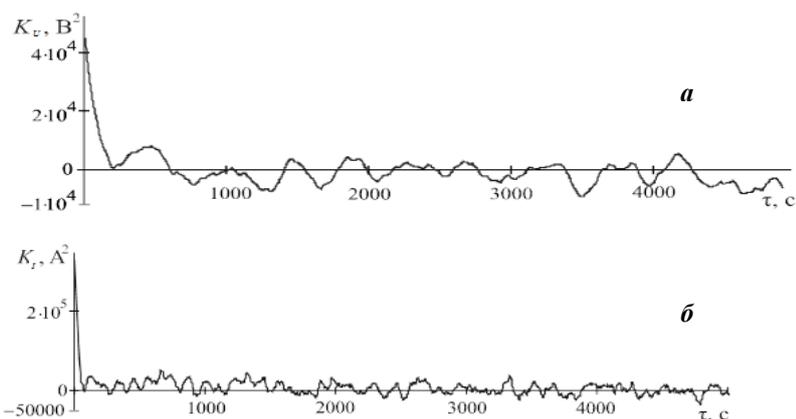


Рис.3

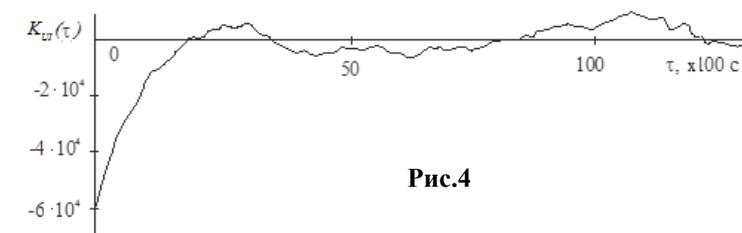


Рис.4

Решение уравнения (4) с целью определения импульсной переходной функции $g(t)$ выполнено рассмотренными выше методами.

Определение импульсной переходной функции операторным методом заключалось в нахождении обратного преобразования Лапласа от формулы (5). В результате получено следующее выражение:

$$g(t) = 0,222e^{-0,138t} - 0,0162e^{-0,112t} \text{ См.} \quad (13)$$

При решении численным методом задача была сведена к решению 40 линейных алгебраических уравнений относительно $g(t)$, для чего уравнение (4) было представлено в виде суммы (6). Задача решалась в матричной форме (7).

Аппроксимирующее выражение полученной $g(t)$ имеет вид

$$g(t) = 0,045 \exp(-0,19t) \text{ См.} \quad (14)$$

При использовании корреляционного метода факторизации функцию $g(t)$ определяли, пользуясь выражением (9) передаточной функции $F(\vec{p})$. При этом разбиение корреляционных функций выполнено следующим образом:

$$\begin{aligned} K_U^+(\tau) &= 52350 \exp(-0,0012|\tau|) \text{ В}^2, \\ K_U^-(\tau) &= 52350 \exp(+0,0012|\tau|) \text{ В}^2, \\ K_{UI}^+(\tau) &= -6 \cdot 10^4 \exp(-0,15|\tau|) \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Оригинал искомой функции $g(t)$ определяли как обратное преобразование Лапласа от функции $F(\vec{p})$. В результате получено выражение

$$g(t) = 0,042 \exp(-018t) \text{ См.} \quad (15)$$

Для оценки адекватности и «универсальности» полученных численных выражений (13–15) импульсной переходной функции $g(t)$ по формуле (1) (при верхнем пределе $+\infty$) были рассчитаны значения электровозных и фидерных токов существующих электровозов ДЭ1, ВЛ8 и ВЛ11М6 [24] в установившемся режиме их работы при среднестатистических значениях напряжений на их токоприёмниках [21], Результаты представлены в таблице.

№ п/п	Тип электровоза	В реальных условиях эксплуатации		Прогнозируемые значения тягового тока и процент расхождения с реальными значениями					
		Напряжение на токоприёмнике, В	Тяговый ток, А	Операторный метод		Численный метод		Метод факторизации	
				Ток, А	% расхождения	Ток, А	% расхождения	Ток, А	% расхождения
1	ДЭ1	3262	755	843,9	10,5	772,0	2,17	761,1	0,8
2	ВЛ8	3288	780	850,6	8,3	778,7	0,2	767,2	1,64
3	ВЛ11М6	3592	856	879,2	2,64	850,7	0,7	838,8	2,2

Как следует из данных таблицы, рассчитанные значения токов очень близки к значениям, полученным в реальных условиях эксплуатации, что свидетельствует об адекватности и «универсальности» применения (к ЭПС постоянного тока) полученных выражений импульсной переходной функции.

Выводы.

1. Импульсная переходная функция, полученная по данным режима нормального функционирования, является адекватной идентификационной моделью электроподвижного состава постоянного тока и может быть использована при прогнозном моделировании электромагнитных процессов в системах электрического транспорта, в том числе, и при скоростном движении поездов.

2. Учитывая стохастический характер изменения тяговых напряжений и токов в системах электро-транспорта, определение импульсной переходной функции целесообразно осуществлять численным методом решения корреляционного интегрального уравнения типа Винера-Хопфа как наиболее точного и занимающего промежуточное положение по трудоемкости среди рассмотренных методов.

3. Полученные численные выражения импульсной переходной функции «универсальны», т.е. пригодны для прогнозной идентификации параметров электроподвижного состава постоянного тока всех типов, близких по мощности и входному напряжению на токоприёмнике.

4. Результаты проведенных исследований являются основой для адаптации и применения моделей и методов активной идентификации к моделированию процессов во всех системах электрического транспорта постоянного тока.

1. Бейсенак Н. Тяговое электроснабжение высокоскоростных линий. *Железные дороги мира*. 2001. № 6. С. 26-30.
2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт. 1982. 528 с.
3. Босий Д.О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності. *Електрифікація транспорту*. 2014. № 8. С.15-24.
4. Gigch J.M, Alphen G. Ac traction power supply design and EMC verification. 6th International Conference *Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe* (MET'2003). Warsaw. September 25-27. 2003. Pp. 1-6.
5. Jefimowski W., Nikitenko A Case study of stationary energy storage device in a 3 kV DC traction system. 13th International Conference *Modern Electric Transport*. MET'2017. Warsaw. October 5-7, 2017. P. 26.
6. Костін М.О., Шейкіна О.Г. Теоретичні основи електротехніки. Том II. Дн-вськ : Вид-во ДНУЗТ. 2007. 276 с.
7. Мищенко Т.Н., Михалченко П.Е., Костин Н.А. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ 1. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. № 2. С. 43 – 46.
8. Kostin N., Mishenko T., Reutskova O. Stochastic Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector. 7th Intern. Conf. *Modern Electric Traction in Integrtd XXIst Century Eurupe*. Warsaw , 29.09-01.10. 2005. Pp. 227-232.
9. Kostin M. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2013. No 2a. Pp. 273-275.
10. Хворост Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2003. № 4. С. 104-114.
11. Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения. *Залізничний транспорт України*. 2003. № 6. С.11–18.
12. Міщенко Т.М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів. *Електротехніка і Електроенергетика*. 2014. № 1. С. 19-28.
13. Митрофанов А.М., Таранин М. А. Структура и математическая идентификационная модель системы тягового электроснабжения. *Електрифікація и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте*. Eltrans'2003. Санкт-Петербург. 2003. С. 348-349.
14. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир. 1979. 302 с.
15. Современные методы идентификации систем. М.: Мир. 1983. 400 с.
16. Павленко С.В. Методи та інструментальні засоби ідентифікації нелінійних динамічних систем на основі моделей Вольтерра. Автореферат дисерт. к.т.н. за спец. 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Одеський нац. політехнічний університет. Одеса, 2016. 24 с.
17. Шефер О.В. Сучасний метод ідентифікації нелінійних сигналів радіотехнічних систем. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. Вип.1 (49). С. 185-189.
18. Minucci S., Pagono M., Proto D. Model of the 2x25kV high speed railway supply system taking into account the soilair interface. *International Journal of Electrical Power and Energy System*. 2018, No 95. Pp. 644-652.
19. Лившиц Н.А., Пугачев В. Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления. М.: Советское радио. 1963. 896 с.
20. Солодовников В.В. Статистическая динамика систем автоматического управления. М.: Физматгиз. 1960. 655 с.
21. Костин Н.А., Шейкина О.Г. Неканоническое спектральное разложение случайных функций тяговых напряжения и тока в системах электрического транспорта. *Електротехніка и електромеханіка*. 2015. № 1. С. 68-71.

22. Костин Н.А., Саблин О.И. Методы корреляционно-спектрального анализа напряжения на токоприемнике и тягового тока электрического транспорта. Конф. *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта*. Днепропетровск. 2009. С.130-131.
23. Kostin N., Mishchenko T., Shumikhina L. Correlation theory of casual processes in electrical power problems for systems of electric transport. Proceedings of the 16th International Workshop Conference *Computational Problems of Electrical Engineering* (CPEE). Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine, IEEE. Lviv. September 2-5, 2015. Pp. 84-87.
24. Котельников А. Основные требования к системам и устройствам тягового электроснабжения скоростных и высокоскоростных магистралей. 6th International Conference *Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe* (MET'2003). Warsaw. September 25-27. 2003. Pp.35-41.

СТОХАСТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

М.О.Костін, докт.техн.наук, Т.М.Міщенко, канд.техн.наук

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна,

e-mail: nkostin@ukr.net , mishchenko_tn@ukr.net

Обґрунтовано необхідність використання методів ідентифікації у разі прогнозуванні процесів у складних потужних стохастичних пристроях систем електричного транспорту.. В якості ідентифікаційної моделі електрорухомого складу (замість ідеального джерела струму) запропоновано використовувати імпульсну перехідну функцію. На основі кореляційної теорії випадкових процесів, якими є напруги і струми в системах електричного транспорту, отримано аналітичний вираз кореляційного інтегрального рівняння у формі рівняння Вінера-Хопфа, розв'язання якого дає можливість отримати імпульсну перехідну функцію. Розглянуто методи розв'язання зазначеного рівняння. Необхідні для розв'язання інтегрального рівняння авто- і взаємнокореляційна функції стохастичних процесів напруг і струмів в системі отримуються експериментальним способом на діючих ділянках залізниць. Здійснено практичне визначення імпульсної перехідної функції як моделі прогнозування для електровозів постійного струму, що експлуатуються на електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці. З цією метою здійснено моніторинг стохастичних процесів напруги і тягового струму в реальних умовах експлуатації. Імпульсні перехідні функції отримані у вигляді експоненціальних функцій, показано їхню адекватність та «універсальність» як моделей прогнозування. Бібл. 24, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: ідентифікація, модель, прогнозування, імпульсна перехідна функція, стохастичний процес, електричний транспорт.

STOCHASTIC IDENTIFICATION MODEL FOR FORECASTING OF PARAMETERS OF DEVICES OF ELECTRIC TRANSPORT SYSTEMS

M. Kostin, T. Mishchenko

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, 49010, Ukraine,

e-mail: nkostin@ukr.net, mishchenko_tn@ukr.net

The necessity to create mathematical models of complex powerful devices of electric traction systems which provide speed and high-speed train movements using identification methods has been justified. A pulse transition function is recommended to be used as an identification model. Using correlation theory for stochastic processes which are voltage and currents in electric traction systems, analytic expression of correlation Wiener-Hopf integral equation has been obtained. Solution of the equation makes it possible to obtain a pulse transition function. Operational, numerical and factorization methods for the equation solving have been considered. Auto- and intercorrelation functions of stochastic current and voltage processes in the system, which are necessary for the solution of integral equation, were defined using experimental method on functioning sections of railroad. Using numerical and factorization methods a pulse transition function as a forecast model was defined for electric locomotive of a direct current DE1 used on electrified sections of Prydneprovska railway. For this purpose monitoring of stochastic voltage and traction current processes was conducted in real operating conditions. Pulse transition functions were defined as exponential functions. References 24, figures 4, table 1.

Key words: identification, model, forecasting, weight function, stochastic process, electric traction.

1. Biesenack N. Traction power supply of high-speed lines. *Zheleznye dorogi mira*. 2001. No 6. P. 26-30. (Rus)
2. Markvardt K G. Electrosupply of electrified railways. Moskva: Transport. 1982. 528 p. (Rus)
3. Bosyi D.O. Method of calculation of instantaneous traction power supply schemes for constant power consumption. *Elektryfikatsiia transportu*. No 8. 2014. Pp. 15-24. (Ukr)
4. Gigch J.M, Alphen G. Ac traction power supply design and EMC verification. 6th Intern. Conf. *Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe* (MET'2003). Warsaw. September 25-27. 2003. Pp. 1-6.
5. Jefimowski W., Nikitenko A. Case study of stationary energy storage device in a 3 kV DC traction system. 13th International Conference *Modern Electric Transport* (MET'2017). Warsaw. October 5-7. 2017. Pp. 26.
6. Kostin M. O., Sheikina O. H. Theoretical foundations of electrical engineering. Tom II. Dnipropetrovsk: Vyd-vo DNUZT. 2007. 276 p. (Ukr)
7. Mishchenko T.N., Mikhalichenko P.Ye., Kostin N.A. Probabilistic characteristics of the random voltage function on the current collector of the first Ukrainian electric locomotive DE 1. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2003. No 2. Pp. 43–46. (Rus)
8. Kostin N., Mishchenko T., Reutskova O. Stochastic Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector. 7th Intern. Conf. *Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe*. Warsaw. 29.09-01.10. Pp. 227-232.
9. Kostin M. Statistics and Probability of the Pantograph of DC Electric Locomotive the Recuperation Mode. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. No 2a. Pp. 273-275.
10. Khvorost N.V. Electric railways: stages and prospects of development. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2003. No 4. Pp. 104-114. (Rus)
11. Khvorost N.V. Goncharov Yu.P., Panasenko N.V. Improvement of electric traction of direct current in Ukrainian railways for high-speed passenger traffic. *Zaliznichnyi transport Ukraini*. 2003. No 6. Pp. 11–18. (Rus)
12. Mishchenko T.M. Prospects for circuit design and simulation of subsystems of electric traction at high speed trains. *Elektrotehnika i Elektroenerhetyka*. 2014. No 1. Pp. 19-28. (Ukr)
13. Mitrofanov A.M., Tararin M. A. Structure and mathematical identification model of traction power supply system. *Elektrifikatsiya i nauchno-tehnicheskiiy progress na zheleznodorozhnom transporte*. (Eltrans'2003). Sankt-Peterburg. 2003. Pp. 348-349. (Rus)
14. Grop D. Methods of system identification: monograph. Moskva: Mir, 1979. 302 p. (Rus)
15. Modern methods of identifying systems. Moskva: Mir, 1983. 400 p. (Rus)
16. Pavlenko S.V. Methods and tools for identification of nonlinear dynamical systems based on Volterra models. Avtoreferat dysert. k.t.n. za spets. 01.05.02 – matematychni modeliuvannia ta obchysluvalni metody. Odeskyi nats. politekhnichnyi universytet. Odesa, 2016. 24 p. (Ukr)
17. Shefer O.V. Modern method of identification of nonlinear signals of radio engineering systems. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2017. Vyp.1 (49). Pp.185-189. (Ukr)
18. Minucci S., Pagono M., Proto D. Model of the 2x25kV high speed railway supply system taking into account the soilair interface. *International Journal of Electrical Power and Energy System*. 2018. No 95. Pp. 644-652.
19. Livshits N. A., Pugachev V. N. Probabilistic analysis of automatic control systems. Moskva: Sovetskoe radio. 1963. 896 p. (Rus)
20. Solodovnikov V.V. Statistical dynamics of automatic control systems. Moskva: Fizmatgiz. 1960. 655 p. (Rus)
21. Kostin N.A., Sheykina O.G. Noncanonical spectral decomposition of random functions of traction voltage and current in electric transport systems. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2015. No 1. Pp. 68-71. (Rus)
22. Kostin N.A., Sablin O.I. Methods of correlation-spectral analysis of voltage on current collector and traction current of electric transport. *Konf. Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta*. Dnepropetrovsk. 2009. Pp. 130-131.
23. Kostin N., Mishchenko T., Shumikhina L. Correlation theory of casual processes in electrical power problems for systems of electric transport. Proceedings of the 16th International Workshop Conference *Computational Problems of Electrical Engineering* (CPEE), 2015. September 2-5, 2015 (Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine) IEEE. Lviv. 2015. P. 84-87.
24. Kotelnikov A. Basic requirements for systems and devices for traction power supply of high-speed and high-speed highways. 6th International Conference *Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe* (MET'2003). Warsaw. September 25-27. 2003. Pp. 35-41. (Rus)

Надійшла 19.12.2017
Остаточний варіант 26.06.2018