

В. В. Доманский

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ Поездов для Наполнения Баз Данных Имитационных Моделей

Аннотация. Проведенные исследования параметров электроснабжения тяги поездов позволяют заполнить базы данных экспертных систем и повысить их качество для выбора энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей. Проведены серии статистических измерений токов фидеров на тяговых подстанциях, питающих перегоны, станционную нагрузку и подъездные пути локомотивных депо, а также напряжений холостого хода смежных тяговых подстанций. Получены статистические характеристики фидерных нагрузок, питающих конечные граничные участки, станции, подъездные пути депо, железнодорожные узлы, напряжения холостого хода и углы δ между напряжениями холостого хода смежных тяговых подстанций. Предложены алгоритмы заполнения баз данных.

Ключевые слова: нагрузки фидеров, напряжение холостого хода, базы данных.

Для цитирования: Доманский, В. В. Параметры электроснабжения тяги поездов для заполнения баз данных имитационных моделей / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

Введение

Применение энергосберегающих технологий систем тягового электроснабжения, минимизирующих энергетические затраты в процессе перевозок, требует создания информационных баз данных для интеллектуальных систем выбора рациональных схем питания электротяговых сетей [1–9].

Для заполнения информационных баз имитационных моделей участков электротяговой сети необходимо знание ряда параметров: тяговых нагрузок фидеров, напряжений холостого хода тяговых подстанций, удельных сопротивлений тяговой сети и внешней системы электроснабжения [10–15].

Цель работы – исследование параметров электроснабжения тяги поездов, необходимых при моделировании.

Исследование параметров электроснабжения тяги поездов

Нагрузки фидеров. Все фидеры, питающие контактную сеть, по специфике нагрузок можно подразделить на фидеры, питающие расчетный участок, концевые граничные участки, промежуточные станции, подъездные пути депо, крупные железнодорожные узлы, сортировочные станции. Определение нагрузок фидеров, питающих расчетные перегоны, производится на основе решения ряда последовательных моментных схем, создаваемых путем моделирования нагрузок подвижного состава и графика их движения по алгоритмам, приведенным в [5, 12–14].

На концевых граничных участках имитационной модели нагрузки фидеров питающие расчетные перегоны можно определять по функциям распределения путем разыгрывания величины тока на каждом шаге моделирования без воспроизведения графика движения поездов. Такой подход позволяет существенно увеличить скорость моделирования режимов работы электротяговых сетей для интеллектуальных систем управления тяговыми подстанциями.

Как известно [11, 12], ток фидера тяговой подстанции в начальной точке участка можно определить по формуле:

$$I_{\Phi}(t) = \sum_{k=0}^N I_k X_k(t), \quad (1)$$

где $X_k(t)$ связаны соотношениями $X_k(t) = X_{k+1}(t + \Delta)$. Поэтому ток фидера можно представить в виде:

$$I_{\Phi}(n\Delta) = \sum_{k=0}^N I_k X_{k+n}. \quad (2)$$

С одной стороны, ток J , потребляемый поездом, является случайной функцией времени, так как на него влияет большое количество случайных факторов (отклонение основного сопротивления движению, метеорологические условия, отклонение массы поезда, квалификация машиниста и т.п.). С другой стороны, он содержит очень существенную составляющую, являющуюся детерминированной функцией времени. Таким образом, случайный процесс $I_{\Phi}(t)$ является стационарным. Математическое ожидание и ковариационная функция определяются по формулам:

$$MI_{\Phi}(t) = \sum_{k=0}^N J_k Mx_k(t) = P \sum_{k=0}^N J_k = \frac{J_0 + \dots + J_{N+1}}{N+1} P(N+1), \quad (3)$$

$$DI_{\Phi}(t) = \sum_{k=1}^N J_k^2 DX_k(t) = p(1-p) \sum_{k=u}^N J_k^2 = \frac{J_0^2 + \dots + J_{N-1}^2}{N+1} P(N+1)(1-P), \quad (4)$$

$$\text{cov}(I_{\Phi}(t), I_{\Phi}(t+u\Delta)) = 0, \text{ если } U > N. \quad (5)$$

Наконец, при U меньше или равно N получим:

$$\begin{aligned} \text{cov}(I_{\Phi}(t), I_{\Phi}(t+u\Delta)) &= \text{cov}(I_{\Phi}(0), I_{\Phi}(u\Delta)) = \text{cov}\left(\sum_{k=0}^N J_k X_k \cdot \sum_{k=0}^N J_k X_{k+u}\right) = \\ &= \sum_{k=0}^N J_k J_{k-u} DX_k = P(1-P) \sum_{k=u}^N J_k J_{k-u} = \frac{J_0 J_u + \dots + J_{N-u} J_N}{N+1} P(N+1)(1-P). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь величина $P(N+1) = \lambda$ – интенсивность движения. При большом значении N , интенсивность λ фиксирована, а P – мало и, согласно центральной предельной теореме, ток фидера $I_{\Phi}(t)$ имеет нормальное распределение. Предельные значения (6) при $N \rightarrow \infty$ можно считать параметрами нормальной аппроксимации. Пусть поезд через время $\frac{l}{L} N \Delta$ приходит в точку l участка. Поскольку время прохождения участка $T = N \Delta$, то вместо дискретного набора токов J_0, \dots, J_N введем функцию $J(l)$, $0 \leq l \leq L$ с тем же смыслом, так что $J_k = J\left(\frac{k}{N} L\right)$. Тогда получим:

$$MI_{\Phi}(t) = \frac{\lambda \sum_{k=0}^N J\left(\frac{k}{N} L\right)}{N+1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_0^L J(l) dl = \lambda \bar{J}, \quad (7)$$

$$DI_{\Phi}(t) = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N+1}\right) \frac{\sum_{k=0}^N J^2\left(\frac{k}{N} L\right)}{N+1} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_0^L J^2(l) dl = \lambda J_*^2. \quad (8)$$

Для нахождения предела ковариации учтем, что следует положить $U = \frac{t}{\Delta} = \frac{t}{T} N$. При этом:

$$\text{cov}(I_{\Phi}(0), I_{\Phi}(u\Delta)) = \lambda \left(1 - \frac{\lambda}{N+1} \frac{\sum_{k=\frac{t}{T} N}^N J\left(\frac{k}{N} L\right) J\left(\left(k - \frac{t}{T} N\right) \frac{L}{N}\right)}{N+1}\right) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \lambda \frac{1}{L} \int_{\frac{t}{T} L}^L J(l) J\left(l - \frac{t}{T} L\right) dl = K(t). \quad (9)$$

На основании изложенного случайный процесс $I_{\Phi}(t)$ аппроксимируется гауссовским процессом $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ с характеристиками: средним $\lambda \bar{J}$, дисперсией λJ_*^2 и ковариационной функцией $K(t)$. При этом $K(t) = 0$ при $t \geq T$. Введем случайную величину $Z(t_0)$ – долю времени на интервале $[0, t_0]$, которую процесс $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ проводит выше некоторого уровня a . Тогда согласно [11]:

$$MZ(t_0) = 1 - \Phi\left(\frac{a - \lambda \bar{J}}{\sqrt{K(0)}}\right), \quad (10)$$

где $\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{y^2}{2}} dy$.

Для дисперсии справедливо следующее выражение:

$$DZ(t_0) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\Phi^{(n)}(\frac{a-\lambda\bar{J}}{\sqrt{k(0)})}]^2}{n! [k(0)]^n} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) K^n(t) dt \quad (11)$$

или

$$DZ(t_0) = \frac{1}{\pi t_0} \int_0^{t_0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) dt \int_0^{\frac{k(t)}{k(0)}} \exp\left\{-\frac{(a-\lambda\bar{J})^2}{k(0)(1+v)}\right\} (1 - V^2)^{-\frac{1}{2}} dv. \quad (12)$$

Пусть теперь на этот же участок поступают поезда r типов и для каждого типа имеется своя функция $J_j(l)$, $1 \leq j \leq r$, а интенсивность движения поездов велика. Будем считать, что скорости поездов всех типов в каждом узле (точке) рассматриваемого участка одинаковы, а значит времена прохождения участка для поездов всех типов равны. Тогда параметризация l одна и та же для всех типов поездов и возможны два варианта описания входящего потока поездов. При первом варианте для каждого типа имеется свой поток поездов с интенсивностью λ_j и эти потоки накладываются друг на друга независимым образом, а при втором – поезд, поступающий в данный момент в начальную точку участка, является поездом J -го типа с вероятностью P_j ($J = 1, \dots, r$), $P_1 + \dots + P_r \leq 1$.

Можно показать, что при переходах к нормальной аппроксимации оба эти описания дают тот же гауссовский процесс. Поэтому будем пользоваться первым описанием, при котором проще добраться до итоговых формул. Действительно, для поездов i -го типа, как и раньше, можно ввести идеализированный гауссовский процесс $\tilde{I}_{\Phi J}(t)$ со средним $\lambda_j \bar{J}_j$ и ковариационной функцией $K_j(t)$ ($D\tilde{I}_{\Phi j}(t) = K_j(0)$). Суммарный ток фидера (идеализированный) определяется по формуле:

$$\tilde{I}_{\Phi\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^r \tilde{I}_{\Phi j}(t). \quad (13)$$

В силу независимости он снова является гауссовским процессом со средним $\sum_{j=1}^r \lambda_j \bar{J}_j$ и ковариационной функцией $\sum_{j=1}^r K_j(t)$. Учет неравномерности движения поездов не отрицает гауссовского процесса $I_{\Phi\Sigma}(t)$.

В исследованиях [11] показано, что для описания токов фидеров, питающих перегоны, можно воспользоваться кривой распределения Пирсона третьего типа или усеченным нормальным законом. Если коэффициент использования пропускной способности расположен в интервале 0,45–0,65, то по данным работы [11] следует вместо распределения Пирсона использовать усеченный нормальный закон.

С целью проверки законов распределения токов фидеров, питающих перегоны, были проведены серии статистических измерений тока регистрирующими приборами на тяговых подстанциях (ТП) переменного и постоянного тока железных дорог. Результаты расчета основных числовых характеристик ряда выборок эмпирического распределения сведены в табл. 1. Значение критерия $\chi^2 = 21,7$ позволяет утверждать с вероятностью 0,2 для ряда выборок, что величина тока фидера, питающего перегон, соответствует нормальному распределению. В то же время для ряда выборок (значение критерия $\chi^2 = 20,1$ с вероятностью 0,2) величина тока фидера более соответствует логарифмически нормальному распределению. Эмпирические распределения I_{Φ} и логарифмически нормальное распределение с параметрами $I_{\Phi} = 163,6(A)$ и $\sigma_1 = 62,5(A)$ показаны на рис. 1, а. Результаты экспериментальной проверки случайной величины $Z(t_0)$, показывающей долю времени, которую процесс $\tilde{I}_{\Phi}(t)$ проводит выше некоторого уровня α , приведены в табл. 2.

Обычно крупные железнодорожные узлы, сортировочные станции, парки, депо питаются отдельными фидерами от шин ТП или постов секционирования. Законы распределения нагрузок этих фидеров неизвестны. С целью их установления были проведены серии статических измерений регистрирующими приборами на фидере, питающем станционную нагрузку и подъездные пути локомотивного депо. Результаты расчета основных числовых характеристик эмпирического распределения сведены в табл. 1.

Результаты расчета основных числовых характеристик
эмпирического распределения случайных величин

Параметры эмпирических распределений	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение	Асимметрия	Экцесс	Коэффициент вариации
$I_{\phi 1}, A$	143,67	62,55			
$I_{\phi 2}, A$	107,61	45,92			
$I_{\phi c}, A$	64,9	21,8	0,96	1,96	33,5
$\Delta U_x, кВ$	0,122	1,0	-0,238	1,523	82193
$\sigma, град$	1,576	0,877	-0,523	-0,523	55,67

По данным измерений построены теоретическая кривая логарифмически нормального распределения с параметрами $I_{\phi c} = 64,9(A)$, $\sigma_I = 21,8(A)$ и гистограмма тока фидера, питающего стационарную нагрузку (рис. 1, б).

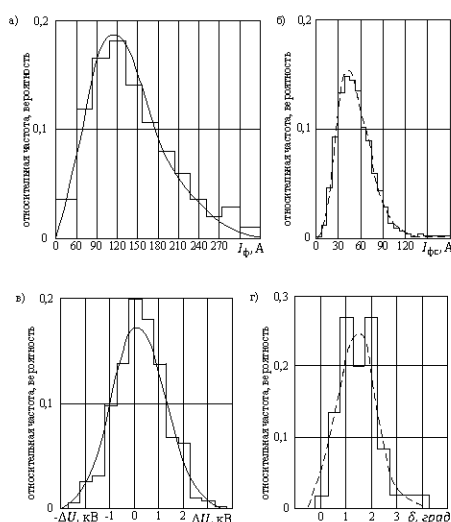


Рис. 1. Эмпирические распределения: токов фидеров, питающих перегоны I_{ϕ} , стационарная нагрузка $I_{\phi c}$, модулей отклонений напряжения холостого хода ΔU , углов между напряжениями смежных подстанций δ

Значение критерия $\chi^2 = 29,5$ позволяет утверждать с вероятностью 0,1, что величина тока фидера, питающего стационарную нагрузку, распределена по логарифмически нормальному закону:

$$F(I, \bar{I}, \sigma_I) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_I I \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{max}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_I^2} (\ln I - \bar{I})^2\right], & \text{если } I > 0, -\infty < I < \infty, \sigma_I > 0, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (14)$$

Нагрузки стационарных путей промежуточных станций создаются пусковыми токами электровазов и токами, потребляемыми электровазами на стоянках, а суммарная нагрузка определяется по формуле:

$$j(t) = (N_m - N_{\Pi} - N_{\Gamma})j_c + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} j_{\Pi k} + \sum_{j=1}^{N_{\Gamma}} j_{\Gamma j}, \quad (15)$$

где $j(t)$ – значение суммарного тока стационарных путей промежуточной станции на момент времени t ; j_c – ток, потребляемый электровазом, для собственных нужд во время стоянки; $j_{\Pi k}$ – пусковой ток в момент отправления k -го поезда с промежуточной станции; $j_{\Gamma j}$ – ток, потребляемый электровазом, при проходе промежуточной станции по главным путям без остановки; N_m – текущее количество поездов,

одновременно находящихся на промежуточной станции; $N_{п}$ – количество поездов на промежуточной станции, находящихся в режиме пуска; $N_{г}$ – количество поездов на главных путях.

Таблица 2

Результаты расчета основных числовых характеристик эмпирического распределения

Уровень	Теоретический	Эмпирический
Выбросы за уровни $\bar{I}_{\Phi 1}$ и $\bar{I}_{\Phi 2}$		
36,00/16,80	0,9574/0,9760	1,0000/1,0000
60,00/40,80	0,9095/0,9271	0,9608/0,9668
84,00/64,80	0,8300/0,8244	0,8252/0,8152
108,00/88,80	0,7158/0,6589	0,6701/0,6253
132,00/112,80	0,5740/0,4550	0,4902/0,3942
156,00/136,80	0,4219/0,2625	0,3611/0,2383
180,00/160,80	0,2807/0,1234	0,2589/0,1350
204,00/184,80	0,1674/0,0464	0,1755/0,0708
228,00/208,80	0,0888/0,0138	0,1189/0,0282
252,00/232,80	0,0416/0,0032	0,0653/0,0101
276,00/256,80	0,0172/0,0006	0,0428/0,0000
300,00	0,0062	0,0138
324,00	0,0012	0,000

Примечание. В числителе – выбросы за уровень $\bar{I}_{\Phi 1}$;
в знаменателе – выбросы за уровень $\bar{I}_{\Phi 2}$.

В процессе имитационного моделирования графика движения поездов величины N_m , $N_{п}$, $N_{г}$ каждой промежуточной станции известны на каждом шагу моделирования. При этом удобно составить матрицу имитаций остановок IMS (рис. 2). Каждая строчка матрицы характеризует одну промежуточную станцию. Количество столбцов матрицы определяется количеством станционных путей. Элемент матрицы на пересечении i -й строки и j -го столбца указывает на наличие (1) или отсутствие (0) поезда на i -й промежуточной станции j -го пути.

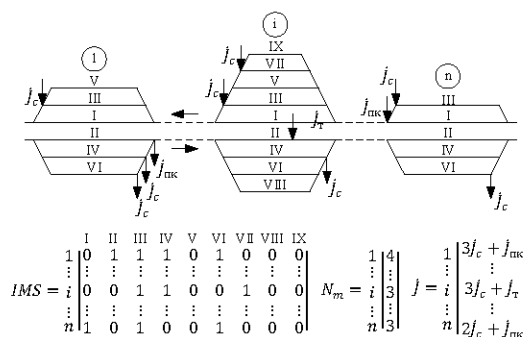


Рис. 2. Нагрузка станционных путей

Количество поездов на каждой станции можно определить, суммируя элементы столбцов соответствующей строки матрицы IMS:

$$N_m(i) = \sum_{j=1}^S IMS(i, j),$$

где S – максимальное количество станционных путей.

Суммарная нагрузка станционных путей на каждом шаге моделирования прикладывается к узлу промежуточной станции и учитывается при расчете моментных схем.

Напряжение холостого хода ТП. Теоретические предпосылки возможности вероятностного моделирования напряжения холостого хода на шинах ТП приведены в [1–3, 5, 11, 12]. Уместно отметить, что уравнильный ток может протекать по тяговой сети и за счет различных наклонов внешних характеристик ТП, а также при различных смежных нагрузках с расчетной фидерной зоной. С учетом сказанного, напряжение на шинах тяговой подстанции \dot{U}_x , необходимое для расчета уравнильного тока, следует определять по формуле:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{xx} - \Delta\dot{U}_c, \quad (16)$$

где \dot{U}_{xx} – напряжение холостого хода; $\Delta\dot{U}_c$ – падение напряжения в системе внешнего электроснабжения и на тяговом трансформаторе от нагрузок смежных фидерных зон.

Напряжение \dot{U}_x моделируется на каждой подстанции для двух фаз. При определении падения напряжения токи $\Delta\dot{U}_c$ смежных фидерных зон заранее рассчитываются в предположении равенства напряжения на шинах смежных ТП. На конечных граничных участках токи плеч питания смежных зон определяются в соответствии с заданным законом их распределения.

Процесс моделирования напряжений \dot{U}_x на шинах ТП происходит в несколько этапов. Сначала определяется модуль напряжения холостого хода по формуле:

$$U_{xx} = \bar{U}_{xx} \pm \Delta U_x, \quad (17)$$

где ΔU_x – случайная величина, определяемая в соответствии с нормальным усеченным законом.

Напряжение холостого хода \dot{U}_{xx} на одной из подстанций ориентируется в соответствии с фазой, питающей моделируемую зону. Затем моделируется угол δ и напряжение холостого хода смежной тяговой подстанции определяется на комплексной плоскости.

После того, как напряжение холостого хода \dot{U}_{xx} будет смоделировано для всех подстанций, определяется падение напряжения в системе внешнего электроснабжения и на тяговом трансформаторе от нагрузок смежных фидерных зон $\Delta\dot{U}_c$ и по формуле (16) рассчитывается напряжение \dot{U}_x для определения токораспределения, потерь напряжения в узлах схемы и потерь мощности электротяговых сетей.

Углы δ между напряжениями холостого хода смежных ТП можно измерить, имея на каждой из подстанций идентичные источники опорного напряжения. Практически такое решение вопроса трудно осуществить. Поэтому для определения углов δ была собрана схема с двухсторонним питанием. В этом случае в качестве опорного вектора, по отношению к которому можно измерять углы, взят уравнильный ток \dot{I}_y . Измерения производились в момент отсутствия поездов на фидерной зоне.

В процессе измерения модулей напряжения на шинах ТП $U_{ш1}$ и $U_{ш2}$ одновременно регистрировались уравнильные токи I_{y1} и I_{y2} , а также углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между напряжениями и уравнильными токами (рис. 3, а).

Для определения углов δ рассмотрим векторную диаграмму, показанную на рис. 3, б и рис. 3, в. Векторы напряжения на шинах смежных подстанций $\dot{U}_{ш1}$ можно построить, зная их измеренные модули и углы φ_1 и φ_2 по $\dot{U}_{ш2}$ отношению к уравнильному току. Падение напряжения на трансформаторах ТП от уравнильного тока без учета активной составляющей соответственно равны $I_y X_1$ и $I_y X_2$. Тогда напряжение холостого хода на шинах ТП легко найти по формуле:

$$\dot{U}_x = \dot{U}_{ш} + \dot{I}_y X. \quad (18)$$

Подставляя значение \dot{U}_x получим:

$$\delta = \arctg \frac{J_m \dot{U}_{\text{ш1}} + J_m i_{yX1}}{\text{Re} \dot{U}_{\text{ш1}}} - \arctg \frac{J_m \dot{U}_{\text{ш2}} + J_m i_{yX2}}{\text{Re} \dot{U}_{\text{ш2}}}, \quad (19)$$

где $\dot{U}_{\text{ш1}} = U_{\text{ш1}} e^{j\varphi_1}$; $\dot{U}_{\text{ш2}} = U_{\text{ш2}} e^{j\varphi_2}$.

В формуле (19) все величины могут быть измерены. Угол $\delta > \delta'$, если $\varphi_1 > \varphi_2 - 180^\circ$ и $\delta < \delta'$, если $\varphi_1 < \varphi_2 - 180^\circ$ и $\delta < \delta'$ (рис. 3, б и рис. 3, в).

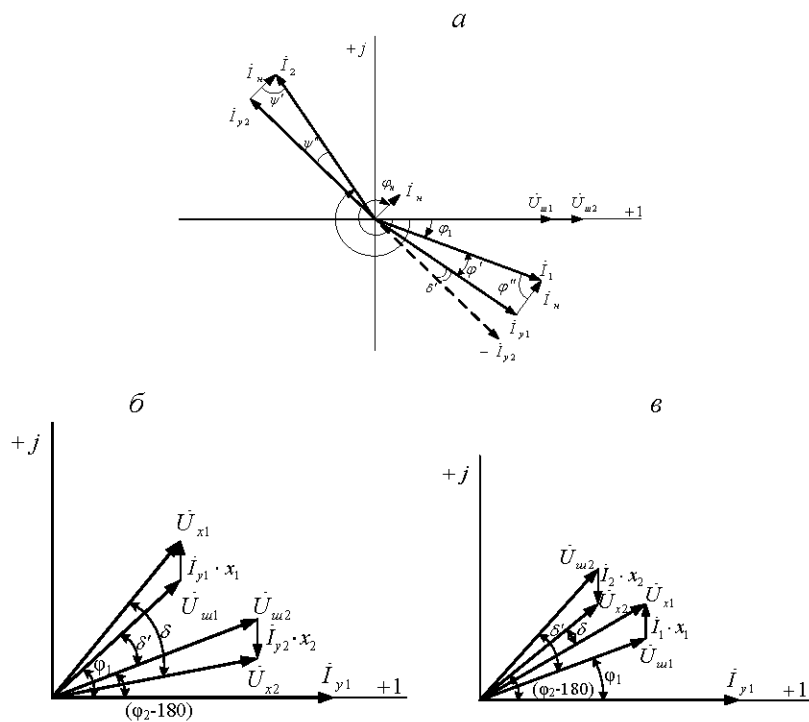


Рис. 3. Определение углов: а – углов φ_1 и φ_2 ;
б, в – между векторами напряжений смежных тяговых подстанций

Следует отметить, что на уравнительный ток может накладываться некоторый ток \dot{I}_H , обусловленный нагрузками стационарных потребителей и емкостным током утечки (рис. 3, а).

Проведенные исследования параметров электроснабжения тяги поездов позволяют наполнить базы данных экспертных систем и повысить их качество для выбора энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей.

Выводы

1 Для наполнения баз данных экспертных систем получены статистические характеристики фидерных нагрузок, питающих конечные граничные участки, станции, подъездные пути депо, железнодорожные узлы и напряжения холостого хода тяговых подстанций.

2 Напряжение холостого хода на одной из подстанций ориентируется в соответствии с фазой, питающей моделируемую зону. Угол δ между одноименными фазами тяговых подстанций моделируется для каждой межподстанционной зоны участка.

Список литературы

- ГОСТ Р 11-175. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 95 с.
- Свод правил «Тяговое электроснабжение железной дороги» (утв. приказом Министерства транспорта РФ от 2 декабря 2014 г. N 330). – 71 с.

References

- GOST R 11-175. Railway traction power supply systems. Method for selecting the main parameters : national standard of the Russian Federation: official publication. – Moscow : Standartinform, 2017. – 95 p.
- The set of rules "Traction power supply of the railway" (approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of December 2, 2014 N 330). – 71 p.

3 Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор) : монография / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 196 с.

4 Ильичева, В. В. Базисы в задачах интеллектуального выбора маршрута при управлении транспортными потоками / В. В. Ильичева, А. Н. Гуда // Информатизация и связь. – 2022. – № 5. – С. 7–13. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-5-7-13.

5 Доманский, В. В. Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский, Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

6 Гридин, В. Н. Нейронная сеть для прогнозирования нагрузок энергопотребления сортировочного узла / В. Н. Гридин, В. В. Доенин, В. С. Панищев, И. Д. Бысов // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 6–15. – DOI.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

7 Сивицкий, Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / Д. А. Сивицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(57). – С. 33–41. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

8 Незевак, В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 34–44. – ISSN 1997-0722.

9 Осипова, В. Э. Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова, Д. А. Яковлев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 107–118. – DOI <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>.

10 Скалозуб, В. В. Интеллектуальные информационные технологии и системы железнодорожного транспорта : монография «Системные технологии моделирования сложных процессов» / В. В. Скалозуб, С. Ю. Цейглин, М. С. Чередниченко. – Днепр : НМетАУ – ИВК «Системные технологии», 2016. – С. 560–589.

11 Марквард, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквард. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 р. 50 к.

3 Kornienko, V. V. Electrification of railways. World trends and prospects (Analytical review) : monograph / V. V. Kornienko, A. V. Kotelnikov, V. T. Domansky. – Kyiv : Transport of Ukraine, 2004. – 196 p.

4 Ilyicheva, V. V. Bases in the problems of intelligent route selection in the management of traffic flows / V. V. Ilyicheva, A. N. Guda // Informatization and Communication. – 2022. – No. 5. – P. 7–13. – DOI 10.34219/2078-8320-2022-13-5-7-13.

5 Domansky, V. V. Information technologies of operation modes of traction power energy and supplying their energy systems / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3. – P. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.

6 Gridin, V. N. Neural network for predicting the power consumption loads of a marshalling yard / V. N. Gridin, V. V. Doenin., V. S. Panishev, I. D. Bysov // World of Transport. – 2019. – V. 17. – No. 3. – P. 6–15. – DOI.org/10.30932/1992-3252-2019-17-3-6-15.

7 Sivitsky, D. A. Experience analysis and using prospects of artificial neural networks on railway transport / D. A. Sivitsky // Bulletin of the Siberian State University of Communications. – 2021. – No. 2(57). – P. 33–41. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_33.

8 Nezevak, V. L. Improving the model of the influence of train schedule parameters on traction power consumption in direct and alternating current sections with type I and II track profile using regression models and neural networks / V. L. Nezevak // Bulletin of Transport of the Volga Region. – 2017. – No. 6. – P. 34–44. – ISSN 1997-0722.

9 Osipova, V. E. Application of neural network methods for forecasting power consumption in railway transport / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev // Modern information technologies and IT education. – 2022. – Vol. 18. – No. 1. – P. 107–118. – DOI <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.107-118>.

10 Skalozub, V. V. Intelligent information technologies and systems of railway transport : monograph "System technologies for modeling complex processes" / V. V. Skalozub, S. Yu. Zeitlin, M. S. Cherednichenko. – Dnipro : NMetAU – IVK "System Technologies", 2016. – P. 560–589.

11 Markvard, K. G. Electricity supply of electrified railways / K. G. Markvard. – Moscow : Transport, 1982. – 528 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 p. 50 к.

12 Contact Lines for Electric Railways : Planning, De-sign, Implementation, Maintenance, 3rd Edition / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider // Wiley Publishers, 2017. – 994 p. – ISBN 978-3-895-78961-8.

13 Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / под ред. В. А. Веникова. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 456 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 р. 30 к.

14 Пелисье, Р. Энергетические системы : пер. с франц. предисловие и коммент. В. А. Веникова / Р. Пелисье. – Москва : Высшая школа, 1982. – 568 с. – ISBN В пер. (В пер.) : 3 р. 10 к.

15 Хашев, А. И. Комбинированное имитационно-аналитическое моделирование в транспортно-логистических системах / А. И. Хашев, Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

12 Contact Lines for Electric Railways : Planning, De-sign, Implementation, Maintenance, 3rd Edition / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider // Wiley Publishers, 2017. – 994 p. – ISBN 978-3-895-78961-8.

13 Electric power systems in examples and illustrations / ed. V. A. Venikov. – Moscow : Energoatomizdat, 1983. – 456 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 1 p. 30 к.

14 Pelissier, R. Energy systems : per. from French foreword and comment. V. A. Venikov / R. Pelissier. – Moscow : Higher. school, 1982. – 568 p. – ISBN В пер. (В пер.) : 3 p. 10 к.

15 Khashev, A. I. Combined simulation-analytical modeling in transport and logistics systems / A. I. Khashev, E. A. Mamaev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 1(85). – P. 117–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_117.

V. V. Domansky

TRAIN TRACTION POWER SUPPLY PARAMETERS FOR FILLING SIMULATION MODEL DATABASES

Abstract. The conducted studies of train traction power supply parameters make it possible to fill the databases of expert systems and improve their quality in order to select energy-saving modes of operation of electric traction networks. A series of statistical measurements of feeder currents at traction substations supplying hauls, station load and access roads of locomotive depots, as well as open-circuit voltages of adjacent traction substations were carried out. Statistical characteristics of feeder loads supplying end boundary sections, stations, depot access roads, railway junctions, open-circuit voltages and angles δ between open-circuit voltages of adjacent traction substations are obtained. Algorithms for filling databases are proposed.

Keywords: feeder loads, idle voltage, databases.

For citation: Domansky, V. V. Train traction power supply parameters for filling simulation model databases / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

Сведения об авторах

Доманский Василий Валерьевич
Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: domansk2015@mail.ru

Information about the authors

Domansky Vasily Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: domansk2015@mail.ru