

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА И СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак*

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск*

Рассматривается совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения, основанного на графике движения поездов на участке железной дороги. В качестве направления совершенствования способа принято уточнение расчета для поездов, находящихся в режиме рекуперативного торможения. Проведение тяговых расчетов в настоящее время осуществляется при допущении о том, что напряжение на токоприемнике электроподвижного состава постоянно во всех режимах движения поезда. Указанное допущение вносит определенную погрешность в расчет энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения.

С целью повышения точности расчетов предлагается изменить порядок расчета при имитационном моделировании и дополнить его проверкой условий применения рекуперативного торможения. С этой целью тяговые расчеты предлагается выполнять на каждом шаге расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения с целью учета уровня напряжения на токоприемнике. При этом режим рекуперативного торможения поезда в расчетах применяется только при создании соответствующих условий на основе проверки напряжения на токоприемнике и баланса мощностей на межподстанционной и смежной зонах питания тяговой сети.

*Ключевые слова:* движение поезда, график движения, система тягового электроснабжения, расчет энергетических показателей, способ расчета, условия рекуперативного торможения, напряжение на токоприемнике электроподвижного состава.

## **Введение**

Применение рекуперативного торможения на участках железных дорог постоянного и переменного тока оказывает значительное влияние на энергетические показатели движения поезда и системы тягового электроснабжения. Объемы рекуперативного торможения по сети дорог в 2015 году достигли уровня 2 млрд кВт·ч, что составило около 5 % от общего потребления электроэнергии на тягу поездов. Влияние рекуперативного торможения на энергетическую эффективность перевозок обуславливает актуальность совершенствования расчетов энергетических показателей движения поезда и систем тягового электроснабжения (СТЭ) в условиях рекуперативного торможения для различных вариантов организации движения поездов с учетом характеристик тяговых подстанций, тяговой сети и др.

## **1. Состояние вопроса**

Проектирование новых электрифицируемых участков, а также реконструкция и модернизация существующих, неразрывно связаны с проведением электрических расчетов, в ходе которых определяются различные энергетические показатели работы СТЭ. В настоящее время известен целый ряд методов расчета энергетических показателей СТЭ: по заданному расположению поездов; по сечениям графика движения поездов; по заданным размерам движения поездов [1] и др. Уменьшение шага расчетов для сечений графика движения поездов на основе мгновенных схем позволяет повы-

сить точность определения энергетических показателей СТЭ. Указанное обстоятельство относится и к проведению тяговых расчетов. Определение основных показателей работы СТЭ электрифицированных железных дорог основано на расчетах с помощью ряда соответствующих методик и программ, примерами которых могут являться методики расчета параметров тяговых сетей [2, 3] и способы расчета показателей [4–6]. Указанные методики положены в основу существующих программ имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и СТЭ.

Повышение точности расчетов при определении расхода и потерь электроэнергии позволяет получить результаты, адекватные данным измерений, например, по определению расхода потерь электроэнергии в тяговой сети [7], и свести к минимуму проведение «полевых» экспериментов, заменив их экспериментами на основе имитационного моделирования, например, для решения целого ряда задач, связанных с поиском путей повышения энергетической эффективности перевозочного процесса [8–11].

Указанные выше методы расчета энергетических показателей СТЭ основаны на определении электрических нагрузок на основе имитационного моделирования графика движения поездов. В основе определения тяговой нагрузки лежит тяговый расчет, выполняемый при условии сохранения постоянным напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС). Проведение расчетов на основе данного подхода вносит неточности

в расчет, связанные с тем, что напряжение в контактной сети во времени непрерывно изменяется и может достигать предельных значений, о чем свидетельствует ряд экспериментов [12, 13], что, однако, в данных расчетах не учитывается. Указанное обстоятельство приводит к тому, что токораспределение, потери напряжения и мощности, расход и потери энергии в тяговой сети, скорость движения, время хода поезда по перегону и энергетические показатели движения поезда определяются с недостаточной степенью точности.

Решение указанного вопроса видится в перерасчете напряжения на токоприемнике ЭПС на основе электрических расчетов при выполнении тяговых расчетов [14, 15]. Сравнение результатов тяговых расчетов, выполненных с учетом изменения напряжения и без него, с экспериментальными данными показывает, что учет напряжения на токоприемнике ЭПС позволяет существенно сократить отклонение расчетных значений от фактических [16].

Следует отметить, что предложенные способы имеют ряд недостатков, связанных с двумя обстоятельствами. Во-первых, не рассматривается возможность так называемого «срыва» рекуперации, когда режим рекуперативного торможения прекращается при превышении допустимого уровня напряжения на токоприемнике ЭПС. Во-вторых, в способах отсутствует расчет баланса мощности в межподстанционных и смежных с ней зонах, с одной стороны, отпускаемой тяговыми подстанциями, с другой стороны, потребляемой на тягу и рекуперированной ЭПС, потерь мощности в тяговой сети.

Предлагаемый способ имитационного моделирования позволяет учесть изменяющееся напряжение на токоприемнике ЭПС с пересчетом характеристик ЭПС в различных режимах ведения поезда, в том числе в режиме рекуперативного торможения, возможность которого определяется на основе баланса мощностей, учитывает предельно допустимый уровень напряжения на токоприемнике и условия перехода из рекуперативного торможения в пневматическое или совмещения обоих видов торможения, и направлен на повышение точности выполнения расчетов при определении энергетических показателей движения поезда и СТЭ.

## 2. Предлагаемый способ расчета

Определение энергетических показателей движения поезда и СТЭ осуществляется в порядке, отличном от ранее предложенного [17], с учетом проверки условий по применению рекуперативного торможения и изменения алгоритма расчета.

### 2.1. Выполнение тяговых расчетов

Тяговые расчеты выполняются методом интегрирования уравнения движения поезда с мак-

симальной величиной шага интегрирования  $\Delta t = 1$  с для каждого поезда в четном и нечетном направлениях по расчетным размерам движения поездов с учетом серии ЭПС, массы состава и нагрузки на ось.

На первом шаге интегрирования расчета начальное значение напряжения на токоприемнике  $U_{k=1}$  принимается равным номинальному в контактной сети, начальная скорость движения поезда  $V_{k=1} = V_0$  (0 км/ч) и координата поезда на плане пути  $S_{k=1} = 0$  км. В случае проследования поезда в начальном пункте без остановки скорость поезда  $V_{k=1}$  определяется установленной скоростью проследования главных путей станций или перегонов.

На каждом  $k$ -м шаге интегрирования определяется величина тормозного пути до остановочного пункта при заданной скорости  $V_k$ , км:

$$S_{Tk} = 0,278V_k t_n + \frac{500(V_k^2 - V_{ост}^2)}{\zeta \cdot 1000(1000g_p \varphi_{кр} + w_{0k} i_c)}, \quad (1)$$

где  $t_n$  – время подготовки тормозов к действию в зависимости от типа состава, типа тормозов и количества осей состава, ч;

$V_{ост}$  – скорость проследования остановочного пункта, км/ч;

$\zeta$  – величина, обратная приведенной массе одной тонны веса поезда,  $10^3 \text{ км/ч}^2$ ;

$g_p$  – расчетный тормозной коэффициент поезда;

$\varphi_{кр}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок;

$w_{0k}$  – результирующее основное удельное сопротивление движению поезда, Н/кН;

$i_c$  – крутизна уклона приведенного элемента профиля.

Режим торможения применяют с текущего шага интегрирования  $k$  до остановки поезда в остановочном пункте при выполнении неравенства

$$S_{ОП} \leq S_k + S_{Tk} \leq S_{ОП} + \frac{l_{но}}{2}, \quad (2)$$

где  $S_{ОП}$  – координата остановочного пункта, км;

$l_{но}$  – длина приемоотправочных путей остановочного пункта, км.

В режиме торможения поезда на каждом шаге интегрирования определяют величины тормозной силы  $B_{kk}$  (кН), удельного замедляющего усилия  $b_{kk}$  (Н/кН), значение падения скорости  $\Delta V_k$ .

Режим тяги при движении поезда применяют при выполнении неравенства

$$S_k + S_{Tk} < S_{ОП}. \quad (3)$$

В этом случае по тяговым характеристикам  $F_k(V)$  определяется значение силы тяги  $F_{kk}$  (кН) на  $k$ -м шаге интегрирования для скорости  $V_k$ .

Далее определяется величины удельной силы тяги  $f_{kk}$  на  $k$ -м шаге интегрирования, удельного ускоряющего усилия  $f_{yk}$ , значение приращений скорости  $\Delta V_k$  (км/ч) и пройденного пути  $\Delta S_k$  (км),

выполняется расчет конечного времени  $k$ -го шага интегрирования  $t_{k+1}$  (с), скорости  $V_{k+1}$  (км/ч) как это показано в [13].

Полученное значение скорости движения поезда, проверяют на выполнение неравенства

$$V_{k+1} \geq V_{k+1}^{орп}, \quad (4)$$

где  $V_{k+1}^{орп}$  – максимально допустимая скорость для расчетной категории поездов на участке пути с координатой  $S_{k+1}$ .

При выполнении неравенства (4) принимается, что  $V_{k+1} = V_{k+1}^{орп}$  и на шаге  $k+1$  для  $w_0 + i_c \geq 0$  режимом ведения поезда выбирается выбег. При этом принимается  $f_{kk+1} = 0$ . Если выполняется неравенство  $w_0 + i_c < 0$ , в качестве режима выбирается торможение и для скорости  $V_{k+1}$  по тормозным характеристикам  $B_k(V)$  определяется величина тормозной силы  $B_{kk+1}$ , для которой находится удельное замедляющее усилие  $b_{yk}$  и падение скорости  $\Delta V_{k+1}$ . Расчет конечной координаты на  $k$ -м шаге интегрирования  $S_{k+1}$  (км) выполняется для четного и нечетного направлений.

Полученное значение расчетного напряжения применяется на шаге интегрирования  $k+1$  применительно к рассматриваемому поезду. Далее осуществляется пересчет токовых характеристик для скорости  $V'$ , определяемой по выражению, км/ч,

$$V' = V \frac{U_k}{U_{ном}}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость, определяемая по тяговой характеристике для номинального напряжения  $U_{ном}$ , км/ч.

Для режима тяги по токовым характеристикам  $I_d(V)$  для  $V_{k\text{ ср}}$  определяется значение тягового тока  $I_{dk}$  поезда.

## 2.2. Проверка условий применения рекуперативного торможения

В случае выполнения неравенства (2) с  $k$ -го шага применяется торможение. Определяется величина тормозной силы  $B_{kk}$  для скорости  $V_k$ , затем величина  $b_{yk}$  и приращение скорости  $\Delta V_k$ . По характеристикам рекуперативного торможения  $I_p(V)$  для  $V_{k\text{ ср}}$  находится значение тока рекуперации  $I_{pk}$  поезда.

Для каждой межподстанционной зоны, в которой созданы условия для перехода в режим рекуперативного торможения, и смежных с ней зон выполняется проверка неравенства

$$P_k^{рек} \geq \sum P_k^{тяги} + \sum \Delta P_k, \quad (6)$$

где  $P_k^{рек}$  – мощность рекуперативного торможения:

$$P_k^{рек} = V_k B_{kk}, \quad (7)$$

$\sum P_k^{тяги}$  – суммарная мощность ЭПС, не находящегося в режиме рекуперативного торможения на рассматриваемой межподстанционной зоне и смежными с ней;

$\sum \Delta P_k$  – суммарные потери мощности, обусловленные передачей энергии рекуперации на рассматриваемой межподстанционной зоне и смежными с ней.

В случае, если неравенство (6) выполняется, по характеристикам рекуперативного торможения определяется  $I_{pk+1}(V_{k+1})$ . Напряжение на токоприемнике находится по следующему выражению

$$U_k^{рек} = \frac{P_k^{рек}}{I_{pk}}. \quad (8)$$

Условия для применения рекуперативного

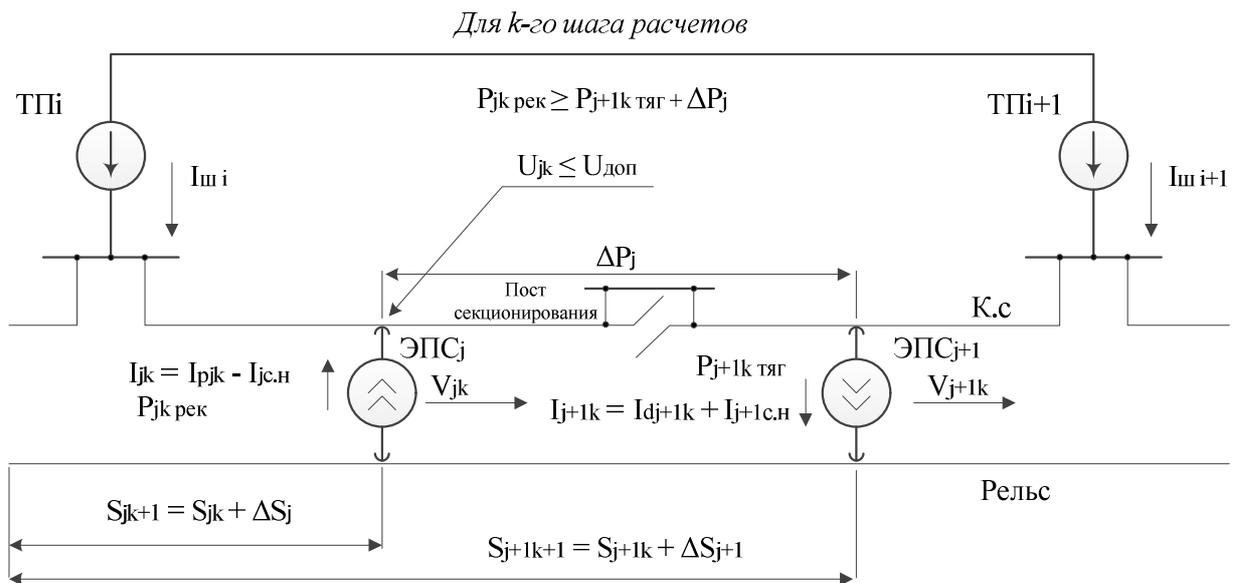


Рис. 1. Фрагмент схемы замещения для межподстанционной зоны

торможения будут выполняться до тех пор, пока выполняется неравенство

$$U_k^{\text{рек}} \leq U_{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $U_{\text{доп}}$  – максимальное допустимое напряжение на ЭПС.

Если неравенство (6) или (9) не выполняется, ЭПС переходит в режим пневматического (реостатного) торможения, при этом ток составит:

$$I_{pk}(V_k) = 0. \quad (10)$$

Для режима выбега принимается  $I_{dk} = 0$ . При этом учитывается потребление электроэнергии на собственные нужды.

Сущность предлагаемого способа определения энергетических показателей движения поезда и СТЭ проиллюстрирована на следующем примере его реализации для схемы замещения в границах одной межподстанционной зоны (рис. 1). Электроподвижной состав на схеме представлен в виде двух единиц – ЭПС<sub>j</sub> и ЭПС<sub>j+1</sub>, находящихся в режиме рекуперативного торможения и тяги соответственно. Возможность рекуперативного торможения на каждом шаге определяется на основе баланса мощности и условия сохранения напряжения на токоприемниках ЭПС ниже допустимого уровня. Расход электроэнергии по шинам подстанций ТП<sub>i</sub> и ТП<sub>i+1</sub> определяется по расчетным токам шин  $I_{\text{ш}}$ . Расход электроэнергии ЭПС осуществляется отдельно для режима рекуперативного торможения и других режимов на основе токов ЭПС –  $I_{pjk}$ .

Полный ток ЭПС определяется для режимов тяги, выбега и пневматического торможения и для режима рекуперативного торможения в общем виде соответственно по формулам:

$$I_k = I_{dk} + I_{\text{с.н.к}}, \quad (11)$$

$$I_k = I_{pk} - I_{\text{с.н.к}}. \quad (12)$$

### 2.3. Расчет энергетических показателей системы тягового электроснабжения

Для участков переменного тока значение тока во всех ветвях схемы замещения определяется по выражению

$$[L_{mn}] = \{ [K_r] [Z_v] [K_r]^T \}^{-1} [K_r] \{ [E_v] - [Z_v] [J_v] \}, \quad (13)$$

где  $[L_{mn}]$  – матрица контурных токов, представляющая собой вектор размером  $n \times 1$ ;

$[K_r]$  – матрица независимых контуров размером  $n \times v$ , составленная из чисел 0, 1, -1, строки которой соответствуют номеру главного контура схемы замещения, а столбцы – номеру ветви. Если направление обхода контура совпадает с направлением тока в ветви, то в соответствующую ячейку  $[K_r]$  ставят 1, если не совпадает, то -1, если ветвь не обходится, то 0;

$[K_r]^T$  – транспонированная матрица независимых контуров размером  $v \times n$ ;

$[E_v]$  – матрица электродвижущих сил ветвей, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ . Если в одной ветви содержится несколько электродвижущих сил, то результирующее значение определяется как сумма комплексных значений этих электродвижущих сил;

$[J_v]$  – матрица источников тока, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ , составленный из значений токов ЭПС  $J_v$  для соответствующей ветви;

$[Z_v]$  – квадратная матрица комплексных сопротивлений ветвей, размер которой определяется количеством ветвей схемы замещения и равен  $v \times v$ . При этом главная диагональ матрицы содержит собственные сопротивления ветвей  $Z_{11}, Z_{22} \dots Z_{vv}$ , а остальные ячейки – сопротивления взаимной индукции соответствующих ветвей  $Z_{12}, Z_{13}$  и т. д.;

Определяются потенциалы всех узлов схемы замещения  $\phi_q$  (В), в соответствии со вторым законом Кирхгофа или иным способом, учитывая, что известны значения токов и сопротивлений ветвей схемы замещения.

Определяется значение напряжения на токоприемнике ЭПС как разность потенциалов узлов схемы в комплексном виде:

$$U = \phi_{\text{к.п}} - \phi_{\text{р}}, \quad (14)$$

где  $\phi_{\text{к.п}}$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и контактный провод, В;  $\phi_{\text{р}}$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и рельс, В.

Составляется матрица напряжений на токоприемнике ЭПС, представляющая собой вектор размером  $1 \times v$ .

Если расчетное время  $t_{k+1} \geq 24$  ч (или больше заданного в расчетах интервала времени) расчет для данного участка завершается.

Для участков постоянного тока электрические расчеты проводятся аналогично по выражению

$$[I_{mn}] = \{ [K_r] [R_v] [K_r]^T \}^{-1} [K_r] \{ [E_v] - [R_v] [J_v] \}, \quad (15)$$

где  $[R_v]$  – квадратная матрица сопротивлений ветвей, размер которой определяется количеством ветвей схемы замещения и равен  $v \times v$ .

Расход электроэнергии по шинам группы  $i$ -х тяговых подстанций определяется по выражению

$$W_{\text{ш ТП } k+1} = W_{\text{ш ТП } k} + \sum_i I_{\text{ш } ik} U_{\text{ш } ik} \Delta t, \quad (16)$$

где  $W_{\text{ш ТП } k}$  – расход электроэнергии на  $k$ -м шаге расчетов, определяемый как сумма с накоплением;

$I_{\text{ш } ik}$  – суммарный ток тяговой нагрузки  $i$ -й подстанции на  $k$ -м шаге расчетов;

$U_{\text{ш } ik}$  – напряжение на шинах  $i$ -й тяговой подстанции на  $k$ -м шаге расчетов.

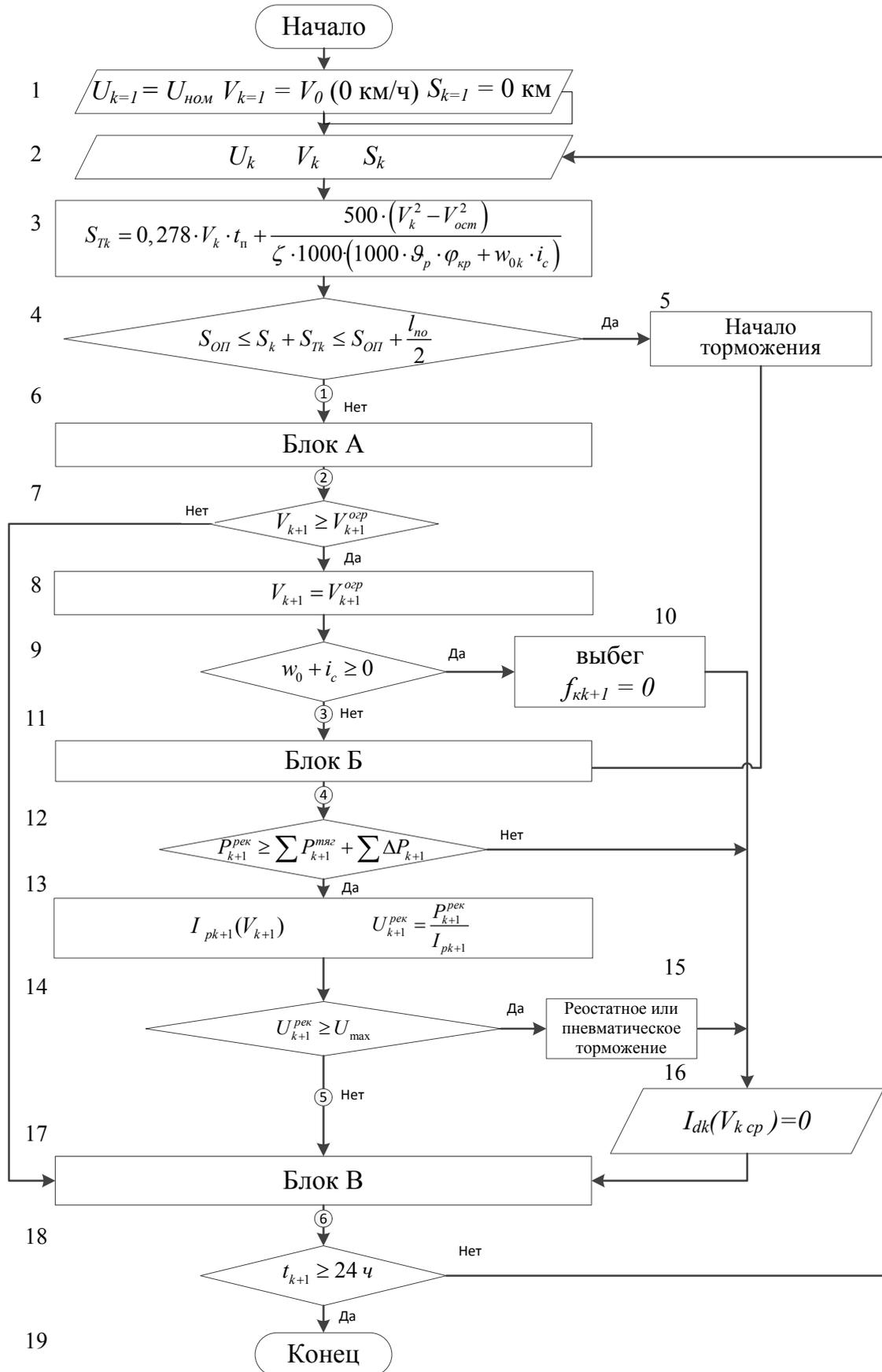


Рис. 2. Алгоритм предлагаемого способа расчета

Расход электроэнергии по группе  $j$ -х ЭПС определяется на  $k$ -м шаге расчетов отдельно для рекуперативного торможения и других режимов по выражению

$$W_{\text{ЭПС}j \text{ рек(тяг) } k+1} = W_{\text{ЭПС}j \text{ рек(тяг) } k} + \sum_j U_{\text{ТП}j k} I_{d \text{ рек(тяг) } j k} \Delta t, \quad (17)$$

где  $U_{\text{ТП}j k}$  – напряжение на токоприемнике  $j$ -го ЭПС на  $k$ -м шаге расчетов;

$I_{d \text{ рек(тяг) } j k}$  – ток  $j$ -го ЭПС на  $k$ -м шаге расчетов для тяги (рекуперации) соответственно.

Потери в тяговой сети на  $k$ -м шаге расчетов определяются по выражению

$$\Delta W_{k+1 \text{ т.с}} = \Delta W_{k \text{ т.с}} + \sum_n \sum_n I_{k \text{ nn}}^2 R_{k \text{ nn}} \Delta t, \quad (18)$$

где  $I_{k \text{ nn}}$  – контурный ток в  $nn$ -й ветви схемы замещения на  $k$ -м шаге расчета.

#### 2.4. Обобщенный порядок расчета

В общем виде предлагаемый порядок расчета можно представить в виде алгоритма, представленного на рис. 2.

На начальном этапе расчетов осуществляется задание начальных значений напряжения, скорости и ординаты движения поезда (блок 1). В блоке 3 на основании данных о напряжении, скорости и ординате каждого поезда (блок 2) определяется тормозной путь поезда на  $k$ -м шаге расчетов. В случае, если величина тормозного пути недостаточна для остановки поезда (блок 4), осуществляется торможение (блок 5, блок 11), в противном случае – осуществляется расчет тягового усилия для поезда (блок 6), определяются значения токов и скоростей движения каждого поезда.

По окончании расчетов по определению приращения скорости выполняется проверка соблюдения ограничения скорости движения (блок 7). При превышении ограничения скорость принимается равной скорости ограничения, и режим тяги сменяется режимом выбега (блок 10) или торможения (блок 11). Выбор режима торможения в блоке 11 осуществляется исходя из мощности рекуперативного торможения и создания условий для его применения на межподстанционной зоне. Условия определяются при выполнении неравенства мощностей рекуперативного торможения и мощности потребления ЭПС (блок 12). При соблюдении условий для применения рекуперативного торможения по тяговым характеристикам ЭПС определяются токи и напряжение на токоприемнике (блок 13). При допустимом напряжении на токоприемнике расчеты переходят к определению энергетических параметров СТЭ (блок 17), в случае превышения напряжения сверх допустимого – выполняется электрическое, пневматическое или комбинированное торможение (блок 15), при этом ток поезда принимается равным току собственных нужд.

Блок 17 расчетов позволяет на основе метода контурных токов определить токи и напряжения элементов схемы замещения на  $k$ -м шаге и определить расход и потери электроэнергии по шинам тяговых подстанций и ЭПС (в том числе в режиме рекуперативного торможения) как сумму с накоплением.

Предложенный усовершенствованный способ определения энергетических показателей движения поезда и СТЭ, позволяет учитывать изменяющийся уровень напряжения при проведении тяговых расчетов и корректировать тяговые нагрузки в электрическом расчете на последующих шагах моделирования, уровень напряжения в узлах СТЭ, потери и расход электроэнергии, а также значения коэффициента реактивной мощности в системах тягового электроснабжения переменного тока и может быть использован с различными устройствами повышения напряжения в контактной сети [18–20]. Предложенный способ позволяет повысить точность тяговых и электрических расчетов и может применяться при моделировании СТЭ, в частности, при рассмотрении различных схем питания и секционирования и вариантов усиления СТЭ, а также для оценки эффективности применения различных устройств.

#### Выводы

Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения направлено на повышение адекватности и точности расчетов. Фактор учета напряжения на токоприемнике, в том числе при применении рекуперации, оказывает существенное влияние на точность расчетов при сравнении их с экспериментальными данными. Использование представленного подхода при имитационном моделировании в существующих пакетах прикладных программ позволяет снять ряд присущих им недостатков.

#### Литература

1. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. / под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с.
2. Марский, В.Е. Методика и программа расчета параметров многопроводных тяговых сетей переменного тока на ЭВМ серии ЕС / В.Е. Марский // Трансэлектропроект: Инструктивно-методические указания. – 1985. – № 2. – С. 4–42.
3. Крюков, А.В. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.А. Абрамов // Управление большими системами: сб. тр. – 2010. – № 29. – С. 201–213.
4. Пат. № 2559408 Российская Федерация, МПК В60L3/00 (2006.01), G01R21/133 (2006.01). Способ определения расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произволь-

ной зоны учета / А.Л. Каишанов, В.Л. Незевак, М.М. Никифоров и др. (РФ) – № 2014110567/11; заявл. 19.03.14; опублик. 10.08.15, Бюл. № 22.

5. Пат. № 2014 110 999 Российская Федерация, МПК В60L 3/00 (2006.01) G01R 21/133 (2006.01). Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта / А.Л. Каишанов, В.Л. Незевак, М.М. Никифоров и др. (РФ) – № 2014110999/11; заявл. 21.03.14; опублик. 27.09.15, Бюл. № 27.

6. Пат. № 2014 110 565 Российская Федерация, МПК В60L 3/00 (2006.01) G01R 21/133 (2006.01). Способ определения технологических потерь электроэнергии на тягу на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта / А.Л. Каишанов, В.Л. Незевак, М.М. Никифоров и др. (РФ). – № 2014110565/11; заявл. 19.03.14; опублик. 27.09.15, Бюл. № 27.

7. Черемисин, В.Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения / В.Т. Черемисин, А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 106–111.

8. Незевак, В.Л. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга участка постоянного тока / В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 87–96.

9. Бакланов, А.А. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения / А.А. Бакланов, В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 26–33.

10. Вильгельм, А.С. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце московской железной дороги с использованием инверторов / А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак, В.Т. Черемисин // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (42). – С. 90–94.

11. Гателюк, О.В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения / О.В. Гателюк, В.Л. Незевак, А.П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 59–69.

12. Istomin, S.G. Analyse des Betriebs der Loko-

motive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn / S.G. Istomin, V.L. Nezevak // Elektrische Bahnen. – München: Oldenbourg Industrie-Verlag GmbH, 2015. – № 4. – P. 186–189.

13. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / А.С. Вильгельм, В.А. Квацук, В.Т. Черемисин и др. // Локомотив. – 2013. – № 8. – С. 5–8.

14. Марквардт, Г.Г. Алгоритм тягового расчета при заданном времени хода по участку постоянного тока с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / Г.Г. Марквардт // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – М.: ВНИИЖТ, 1974. – Вып. 520.

15. Тарута, П.В. Алгоритм расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока при наличии рекуперации электрической энергии / П.В. Тарута // Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности: тр. науч.-практ. конф. – Хабаровск: ДВГУПС, 2003. – С. 76–80.

16. Вильгельм, А.С. Учет фактора изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава постоянного тока при проведении тяговых расчетов / А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. Научный журнал. – 2015. – № 2 (4). – С. 21–25.

17. Вильгельм, А.С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока / А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак, А.А. Комяков // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 54–65.

18. Аржанников, Б.А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / Б.А. Аржанников, И.О. Набойченко // Екатеринбург: УрГУПС, 2015. – 258 с.

19. Cheremisin, V.T. Evaluation of The Energy Efficiency of Energy Storage for Electric Rolling Stock of Railways DC / V.T. Cheremisin, V.L. Nezevak, A.P. Shatohin // International Journal of Advanced Railway (The Korean Society for Urban Railway) Korea: Seoul. – Vol. 1, no. 2. – 2013. – P. 53–56.

20. Незевак, В.Л. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В.Л. Незевак, В.Т. Черемисин, А.П. Шатохин // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 10. – С. 54–64.

**Вильгельм Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской части, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, vilgelm87@gmail.com.

**Незевак Владислав Леонидович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской части, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, nezevakwl@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 мая 2016 г.

## IMPROVED METHOD FOR DETERMINING ENERGY INDICATORS MOVEMENT OF TRAINS AND SYSTEMS TRACTION POWER SUPPLY

A.S. Vilgelm, vilgelm87@gmail.com,

V.L. Nezevak, nezevakwl@mail.ru

Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

The article deals with improving the method for determining the energy performance of the train and the traction power supply system based on the time schedule for a certain railway section. Refinement of calculation for the trains in regenerative braking mode was selected as one of directions of improving this method. Traction calculations are currently carried out under the assumption that the voltage at the pantograph of electric rolling remains constant in all train modes. The above assumption introduces a certain error into calculation of the energy performance of the train and traction power supply system.

In order to increase the calculation accuracy, it is proposed to change the order of calculation and to complete it with check of regenerative braking application conditions. For this purpose, traction calculations are supposed to perform at each step of computing energy performance of the traction power supply system to take account of the voltage level on the current collector. This train regenerative braking mode is used in calculation for provision of appropriate conditions only based on test of the current collector voltage and power balance between substations and traction power supply adjacent areas.

*Keywords:* motion train, timetable, traction power supply system, the calculation of energy indicators, the method of calculation, the regenerative braking conditions, the voltage at the pantograph of electric rolling.

### References

1. Markvardt K.G. (Ed.) *Spravochnik po elektrosnabjениyu jeleznyh dorog. V 2 t. T. 1* [Railway Power Supply Reference Book. In 2 v. V. 1]. Moscow, Transport, 1980. 256 p.
2. Marsky, V.E. (Ed) *Metodika i programma rascheta parametrov mnogoprovodnyh tyagovyh setei peremennogo toka na EVM serii ES* [Methodology and Program for Calculating Parameters of Multi-Wire AC Tractions Using EU Computers]. *Transelektroproekt: Instruktivno-metodicheskie ukazaniya*. [Transelectroproject: Instructions and Guidelines], 1985, no. 2, pp. 4–42.
3. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. [Traction Railway System Management]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Managing Large Systems: Proceedings], 2010, no. 29, pp. 201–213. (in Russ.)
4. Kashtanov A.L., Nezevak V.L., Nikiforov M.M. *Sposob opredeleniya rashoda elektroenergii elektropodviznym sostavom v granichah proizvol'noi zony ucheta* [A Method of Determining the Power Consumption of Electric Rolling Stock Within the Boundaries of Arbitrary Accounting]. Patent RF, no. 2559408, 2015.
5. Kashtanov A.L., Nezevak V.L., Nikiforov M.M. et al. *Sposob opredeleniya tehnologicheskikh poter' elektroenergii v tyagovoi seti jeleznodorojnogo transporta* [Method for Determining Power Losses in Traction Network of Railway Transportation]. Patent RF, no. 2014110999/11, 2015.
6. Kashtanov A.L., Nezevak V.L., Nikiforov M.M. et al. *Sposob opredeleniya tehnologicheskikh poter' elektroenergii na tyagu na tyagovyh podstanciyah postoyannogo toka jeleznodorojnogo transporta* [Method of Determining Process Traction Power Losses at DC Railway Substations]. Patent RF, no. 2014110565/11, 2015.
7. Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Nezevak V.L. [Evaluation of Process Losses in Traction Network with Electric Stock Regenerative Braking]. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University], 2014, no. 2, pp. 106–111. (in Russ.)
8. Nezevak V.L., Shatohin A.P. [Monitoring Specific Recovery Ratings within Arbitrary Area Monitoring Coverage of DC Area]. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 87–96. (in Russ.)
9. Baklanov A.A., Nezevak V.L., Shatohin A.P. [Classification of Methods of Assessment Efficiency of Regenerative Braking]. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University], 2016, no. 1, pp. 26–33. (in Russ.)
10. Vilgelm A.S., Nezevak V.L., Cheremisin V.T. [Ways to Improve Energy Efficiency within Small Ring of Moscow Railway Using Inverters]. *Transport Urala* [Ural Transport], 2014, no. 3 (42), pp. 90–94. (in Russ.)
11. Gatulyuk, O.V., Nezevak V.L., Shatohin A.P. [Optimization of Time Schedule Based on Traction Power Consumption Criterion with Use of Regenerative Braking]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2015, no. 1 (21), pp. 59–69. (in Russ.)

12. Istomin S.G., Nezevak V.L. [Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn]. *Elektrische Bahnen*, 2015, no. 4, pp. 186–189.
13. Cheremisin V.T., Vilgelm A.S., Kvaschuk V.A., Prokhorikhin G.V. [Influence of Regenerative Braking on Traction Power Supply System]. *Locomotive*, 2013, no. 8, pp. 5–8. (in Russ.)
14. Markvardt G.G. [Algorithm of Traction Calculation at Specified DC Area Travel Time with Due Regard to Voltage Variation at Locomotive Bow Collector in Traction and Recovery Modes]. *Sb. nauch.tr. VNIIZhT* [Proceedings of Railway Research Institute]. Moscow, VNIIZhT, 1974, vol. 520.
15. Taruta P.V. [Algorithm for Calculating the DC Traction Power Supply System with Power Recovery]. *Sovremennye tehnologii – jeleznodorozhnomu transportu i promyshlennosti: tr. nauch.-prakt. konf.* [Modern Technology – Rail Transport and Industry: Proceedings of Scientific and Practical Conference]. Khabarovsk, FESTU, 2003, pp. 76–80. (in Russ.)
16. Vilgelm A.S., Nezevak V.L. [Accounting DC Voltage Change Factor at Electric Stock Baw Collector at Traction Power Calculations]. *Asia and Pacific Transport. Scientific Journal*. Khabarovsk, FESTU, 2015, no. 2 (4), pp. 21–25. (in Russ.)
17. Vilgelm A.S., Nezevak V.L., Komyakov A.A. [Improving Method of Calculation of AC Traction Power Supply]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2014, no. 3 (19), pp. 54–65. (in Russ.)
18. Arzhannikov B.A., Naboichenko I.O. [Concept of 3.0 kV DC Traction Power Supply System Gain]. Ekaterinburg, USURT, 2015. 258 p.
19. Cheremisin V.T., Nezevak V.L., Shatohin A.P. [Evaluation of the Energy Efficiency of Energy Storage for Electric Rolling Stock of Railways DC]. *International Journal of Advanced Railway (The Korean Society for Urban Railway)*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 53–56.
20. Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatohin A.P. [Improving Power Efficiency of Traction Power Supply System at Section Pillar Operation with Power Storage]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2015, no. 10, pp. 54–64. (in Russ.)

*Received 30 May 2016*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Вильгельм, А.С. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения / А.С. Вильгельм, В.Л. Незевак // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 32–40. DOI: 10.14529/power160304

### FOR CITATION

Vilgelm A.S., Nezevak V.L. Improved Method for Determining Energy Indicators Movement of Trains and Systems Traction Power Supply. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 32–40. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160304

---