

В. В. Доманский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ДАННЫХ

Аннотация. Рассмотрена методика по созданию интеллектуальных систем анализа потерь энергии в тяговых сетях, включая цели, задачи, функциональный состав, структуру, а также информационные базы интеллектуальной системы. Выделены направления исследований по оптимизации режимов электропотребления, структуры баз данных и баз знаний. Разработаны методы и средства для измерения потерь энергии в тяговых сетях и тяговых трансформаторах современными микропроцессорными счетчиками. В рамках разрабатываемой интеллектуальной системы исследована задача оценки потерь энергии в тяговых сетях и трансформаторах и эффективности системы электроснабжения тяги поездов. Выявлены факторы, влияющие на составляющие электропотребления, получены обобщающие зависимости потерь энергии для включения их в базы знаний экспертных систем.

Ключевые слова: потери энергии, тяговая сеть, тяговые трансформаторы.

Для цитирования: Доманский, В. В. Интеллектуальная система анализа потерь энергии в тяговых сетях переменного тока для наполнения баз данных / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 176–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_176.

Введение

Реализация интеллектуальных систем управления электроснабжением (ИСУЭ) позволяет обеспечить экономию электроэнергии в процессе перевозок, повышение энергетической эффективности и надежности тяговых сетей, максимальное снижение потерь и улучшение качества электроэнергии. Важнейшей задачей минимизации потерь является выбор рациональных масс поездов и интервалов в движении и энергоэффективных режимов систем электроснабжения тяги [1–4]. Тип структуры ИСУЭ выбран иерархический трехуровневый. Нижний уровень – технологическое управление объектами и процессами на тяговых подстанциях и электротяговой сети. Средний – дистанции электроснабжения. Верхний уровень – оперативно-диспетчерское, организационно-экономическое и техническое управление службы электроснабжения дороги.

Устройства электроснабжения железных дорог с начала внедрения электрической тяги непрерывно совершенствовались [4–7]. В настоящее время этот процесс становится более эффективным и целенаправленным на ресурсо- и энергосбережение [5]. Все большее внимание уделяется средствам измерения, системам учета и управления, позволяющим экономить электроэнергию при реализации процесса перевозок. К таким средствам относятся и микропроцессорные многотарифные счетчики расходов и потерь энергии, которые при дистанционном считывании накопленной в них информации и обработки её экспертными системами способствуют формированию оптимальных управляющих решений [8–10]. Измеряя потери энергии в тяговой сети счетчиками потерь, можно фиксировать время неявных перетоков и ставить вопрос перед энергосистемой о снижении тарифов за оплату электроэнергии, учитывая эксплуатацию устройств тягового электроснабжения.

Целью работы является разработка метода и аппаратуры для расчета в сложных схемах питания потерь энергии в тяговых сетях и трансформаторах.

Модель расчета энергопотерь в электротяговой сети

Для любых схем питания в электротяговой сети переменного тока потеря энергии определяется по формуле (1):

$$\Delta W = \int_0^T \Delta \dot{S}(t) dt, \quad (1)$$

где $\Delta S = \Delta \dot{I}_t Z_b I_t^*$ – потери мощности в момент времени t . Здесь I_t^* – сопряженный вектор тока в ветвях схемы.

Структурное построение исходных матриц графа электротяговой сети с последовательной нумерацией ветвей по фидерам позволяет выделить потери мощности и энергии на любом участке, в том числе и отдельно по каждому пути. Как известно [4–6], потери мощности на каждом пути по физической сущности можно разделить на две составляющие:

$$\Delta \dot{S}_j = \Delta \dot{S}_{c_j} + \Delta \dot{S}_{m_j}, \quad (2)$$

где $\Delta \dot{S}_{c_j}$ – потери мощности от нагрузок своего пути; $\Delta \dot{S}_{m_j}$ – потери мощности, вызванные влиянием электромагнитной связи.

Подробное рассмотрение каждой из составляющих поможет выявить специфику вычисления для тяговой сети энергопотерь. Рассмотрим для простоты схему раздельного консольного питания m -путного участка. Схема замещения этого участка представлена на рис. 1, векторные диаграммы нагрузок, расположенных в узлах n , показаны на рис. 2.

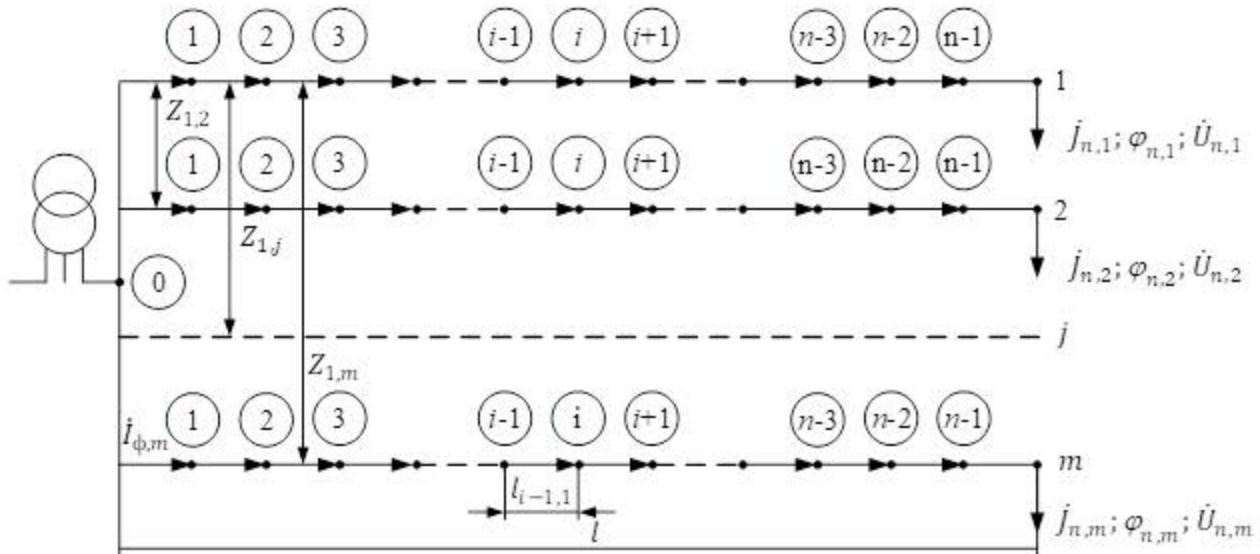


Рис. 1. Схема замещения m -путного участка

На первом пути при влиянии нагрузок других путей равновесное состояние напряжений имеет вид:

$$\dot{U}_{\phi 1} = \dot{U}_{\Sigma n} + \dot{I}_{\phi 1} Z_{c1} + \dot{I}_{\phi 2} Z_{m1,2} + \dots + \dot{I}_{\phi m} Z_{m1,m}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{\phi 1}$ – напряжение на шинах подстанции; $\dot{I}_{\phi 1}, \dot{I}_{\phi 2}, \dots, \dot{I}_{\phi m}$ – токи фидеров пути $i = \overline{1, m}$ соответственно; Z_{c1} – собственное сопротивление пути 1; $Z_{m1,2}, \dots, Z_{m1,m}$ – сопротивления взаимной индукции между подвесками пути $i = \overline{1, m}$.

Полная мощность на первом фидере составит следующую величину:

$$\dot{S}_{\phi 1} = \dot{S}_{\Sigma n} + \Delta \dot{S}_{c1} + \sum_{j=1}^m \Delta \dot{S}_{m_j}. \quad (4)$$

Выразив из (2) потери мощности $\Delta \dot{S}_{m_j}$ с учетом (3) и (4) и обобщая выражения для любого количества нагрузок на каждом пути, получим

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_1 &= \sum_{i=1}^n \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{ci1} + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^n \dot{J}_i \dot{J}_{i+jn}^* Z_{mi i+jn}; \\ \Delta \dot{S}_k &= \sum_{i=(j-1)n+1}^{jn} \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{cii} + \sum_{j=k}^{m-1} \sum_{i=(j-1)n}^{jn} \dot{J}_i \dot{J}_{i+(j-1)n}^* Z_{mi i+(j-1)n} + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=(j-1)n}^{jn} \dot{J}_i \dot{J}_{i-jn}^* Z_{mi i-jn}; \\ \Delta \dot{S}_m &= \sum_{i=(m-1)n+1}^{m \cdot n} \dot{J}_i \dot{J}_i^* Z_{cii} + \sum_{j=1}^{m-1} \dot{J}_j \dot{J}_{i-jn}^* Z_{mi i-jn}, \end{aligned}$$

где J_i – нагрузки поездов в узлах схемы, $Z_{mi,j}$ – взаимные сопротивления между ветвями i и j электропневмотрикатной сети; при $j=i$ Z_{cii} – собственное сопротивление ветви i ; n – число узлов однопутного участка; m – число путей или питающих фидеров, связанных электромагнитным полем, на многопутном участке; k – номер пути многопутного участка.

Нагрузки поездов в общем случае будут иметь разные $\cos\varphi$ и поэтому составляющие потерь на каждом пути, вызванные электромагнитной связью, могут иметь разные знаки. Действительно, полагая $m=2$ и $n=1$, $J_1 = J e^{j\varphi_1}$, $J_2 = J e^{j\varphi_2}$, $Z = r_m + jX_m$, получим

$$S_{12} = r_m J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + jr_m J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + jX_m J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - X_m J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$S_{21} = r_m J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - jr_m J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + jX_m J_1 J_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + X_m J_1 J_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1).$$

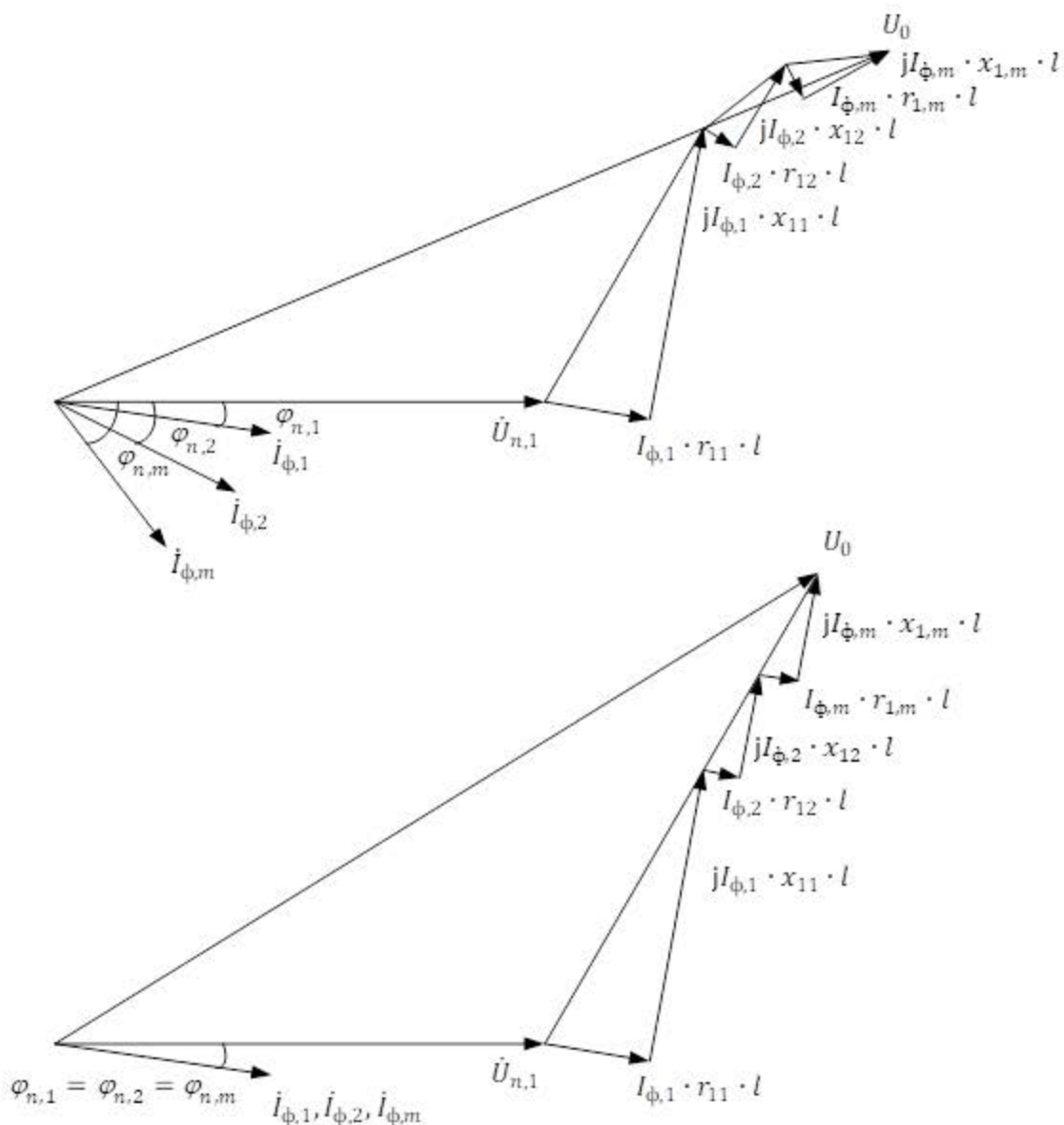


Рис. 2. Векторные диаграмма падений напряжения

Аналогичные выражения получены в работе [7]. Следует отметить, что при $\pi > \varphi_1 - \varphi_2 > 0$ активная мощность, определяемая слагаемым $X_m J_1 J_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$, передается с первого пути на второй и, наоборот, со второго пути на первый, если $\pi > \varphi_2 - \varphi_1 > 0$. Согласно расчетам при токах $J_1 = 201,9 e^{j214}$ (А),

$j_2 = 96,5e^{j220}$ (А), напряжении на шинах подстанции $\dot{U} = -13,75 - j23,8$ (кВ), сопротивлениях 20 км участка электротяговой сети с подвеской ПБСМ70 + МФ100 и рельсах Р65 – $Z_{11} = Z_{22} = 2,2 + j8,9$ (Ом); $Z_{12} = Z_{21} = 0,9 + j3,2$ (Ом), активная мощность в размере 6,8 кВт передается со второго пути на первый.

На основании изложенного можно сделать ряд полезных выводов, которые необходимо учитывать при анализе режимов работы электротяговых сетей, а также при разработке аппаратуры для вычисления энергопотерь в них при наличии переменного тока:

– обмен активной энергией между подвесками обоих путей возможен только при отличающихся коэффициентах мощности электровозов;

– в тяговых сетях переменного тока существуют потери энергии в активном сопротивлении земли, обусловленные созданием магнитного поля.

Исследование потерь энергии и сопутствующих им значений ампер-квадрат-часов питающих фидеров на имитационной модели и на реальном участке позволили установить сильную корреляционную связь между ними [1, 4]. Как правило, эпюра квадратов среднеквадратичных токов, построенная по длине питающей линии, имеет вид параболы с максимумами по краям. При создании счетчиков энергопотерь и учитывается данная закономерность. При этом величина потерь по счетчику j -го питающего фидера в момент времени t при мгновенном значении коэффициента настройки счетчика K , означающему в физическом смысле сопротивление тяговой сети на плече приложения эквивалентной нагрузки, вычисляется по формуле:

$$\Delta W_j = \int_0^T K(t) i_{\Phi}^2(t) dt,$$

где $i_{\Phi}^2(t) dt$ – ампер-квадрат-часы, измеряемые счетчиком в момент времени t ; T – период измерения.

Потери энергии на фидерной зоне определяются по показаниям счетчиков всех m фидеров, питающих эту зону. В момент времени t коэффициент $K(t)$ будет для всех фидеров один и тот же.

$$\Delta W = \int_{j=1}^m \Delta W_j.$$

Изменяя программное обеспечение микропроцессорных счетчиков «Альфа Плюс», с достаточной точностью ампер-квадрат-часы можно измерять по приведенной ниже формуле

$$i_{\Phi}^2(t) dt = \left(U_i i(t) / U_{\Delta t} = \text{const} \right)^2 dt,$$

где $U_{\Delta t} = \text{const}$ – напряжение на шинах тяговой подстанции в период времени $\Delta t = 1$ мин.

Таким образом, функции счетчиков потерь энергии могут выполнять микропроцессорные счетчики «Альфа Плюс».

Установившееся значение коэффициента настройки определяется на имитационной модели. При этом рассчитываются потери энергии на межподстанционной зоне и ампер-квадрат-часы на питающих фидерах. Установившееся значение настройки \bar{K} вычисляется по формуле:

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^N \text{Re} \Delta \dot{S}_i / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m I_{\Phi j}^2,$$

где $\text{Re} \Delta \dot{S}_i$ – активные потери мощности для i -й моментной схемы; $I_{\Phi j}^2$ – квадрат тока j -го питающего фидера для i -й моментной схемы; N – число рассчитанных моментных схем, соответствующее заданному времени моделирования T .

Исследования мгновенных значений коэффициента настройки $K(t)$ позволили сделать вывод об устойчивости характера его изменения. Однако влияние целого ряда факторов на установившееся значение коэффициента \bar{K} не позволяет снизить погрешность при измерении потерь ниже 7,5 %. Снижение погрешности измерения возможно при пересчете в режиме реального времени коэффициента настройки. Такой вариант возможен при реализации измерения потерь энергии микропроцессорными счетчиками «Альфа Плюс». Потери энергии могут корректироваться по формуле:

$$\Delta W' = \Delta W \frac{K_d}{K},$$

где K_d – коэффициент настройки, рассчитанный на модели или выбранный из соответствующих файлов (с наборами рассчитанных заранее коэффициентов) и соответствующий реальному режиму работы электротяговых сетей, потоку поездов и т.д. в данный момент времени Δt .

Определение потерь энергии в тяговых трансформаторах

Расчет потерь активной и реактивной энергии в тяговых трансформаторах можно вести на имитационной модели, описание которой приведено [5]. Действительно, структурное построение графа $G_{st} = (V_{st}, L_{st})$ электротяговой сети и сети внешнего электроснабжения позволяет выделить в векторе токораспределения I_b и матрице сопротивлений Z_b соответствующие ветви, относящиеся к схеме замещения i -го трансформатора. Тогда, применяя формулу (1) для ограниченного схемой замещения количества ветвей i -го трансформатора, получим

$$\Delta \dot{W}_T = \int_0^T \Delta \dot{S}_T(t) dt,$$

где $\Delta \dot{S}_T(t) = \dot{I}_T(t) Z_b \dot{I}_T(t)$ – потери мощности в трансформаторе в момент времени t .

Данный подход требует моделирования схем замещения трансформаторов по методике [1, 2] или [6, 7].

Очень часто в условиях эксплуатации для расчета активных потерь энергии в тяговых трансформаторах применяют формулу:

$$\Delta W_T = \left\{ \Delta P_x + k_{\text{ин}} \Delta Q_x + \sum_{i=1}^3 k_{zi}^2 k_x^2 (\Delta P_{ki} + k_{\text{ин}} \Delta Q_{ki}) \right\} n_T T,$$

где ΔP_k , ΔP_x , ΔQ_k , ΔQ_x – нагрузочные потери, потери холостого хода, реактивные потери намагничивания и рассеяния трансформатора, коэффициент роста энергопотерь $k_{\text{ин}}$ равен затратам активной мощности на выработку и передачу одного кВАр, принимает значения в зависимости от характеристики питающей ЛЭП $0,02 \leq k_{\text{ин}} \leq 0,08$ и выражается в кВт; k_{zi} – коэффициент эффективности графика нагрузки i -й обмотки; k_x – коэффициент загрузки i -й обмотки, n – количество трансформаторов; T – время начала работы трансформатора.

Здесь $\Delta Q_x = I_x \% / 100 S_n$; $\Delta Q_k = U_k \% / 100 S_n$, где S_n – мощность трансформатора, определяемая в момент времени t как произведение токов и напряжений соответствующих обмоток; U_k – напряжение короткого замыкания в %; I_x – ток холостого хода в %.

Согласно [6, 7] активные (нагрузочные) потери мощности в обмотках трансформатора можно определять методом симметричных составляющих. Для тягового трехобмоточного трансформатора нагрузочные потери ΔP_k по этому методу определяют по формуле (5):

$$\Delta P_k = \Delta P_{\text{кп}} + \Delta P_{\text{кт}} + \Delta P_{\text{кр}} = 3(I_{(1)\text{п}}^2 + I_{(2)\text{п}}^2)R_{\text{п}} + 3(I_{(1)\text{т}}^2 + I_{(2)\text{т}}^2)R_{\text{т}} + 3I_{\text{р}}^2 R_{\text{р}}, \quad (5)$$

где индексы п, т, р – первичная, тяговая, районная обмотки; R – сопротивление одной фазы соответствующей обмотки. $I_{(1)}$, $I_{(2)}$ – токи прямой и обратной последовательностей.

Здесь токи обратной последовательности в районной обмотке не учитываются, т. е. нагрузка района считается симметричной. Активные сопротивления обмоток определяются по формулам (6):

$$R_{\text{п}} = \frac{\Delta P_{\text{к1}} U_{\text{л1}}^2}{S^2} 10^3, \text{ Ом}; \quad R_{\text{т}} = \frac{3 \Delta P_{\text{к2}} U_{\text{л2}}^2}{S_{\text{н2}}^2} 10^3, \text{ Ом}; \quad R_{\text{р}} = \frac{3 \Delta P_{\text{к3}} U_{\text{л3}}^2}{S_{\text{н3}}^2} 10^3, \text{ Ом}. \quad (6)$$

Определяя значения ΔP_k , ΔP_x , ΔQ_k , ΔQ_x в момент времени t , можно получить среднесуточные или среднечасовые потери тягового трансформатора.

С некоторой погрешностью можно определить нагрузочные потери мощности в трансформаторе и по средним значениям нагрузок. Так, в результате суточного моделирования работы системы электроснабжения были получены следующие средние токи плеч питания т.п. Хапры Северо-Кавказской железной дороги: $\dot{I}_{\text{п}} = -200 + j17$, А; $\dot{I}_{\text{т}} = -157 + j413$, А. Левое плечо питается фазой «ас», а правое – «вс».

$$\dot{I}_C = (-2/3\dot{I}_{II} - 1/3\dot{I}_{II}) / K_{T1-2} + \dot{I}_{cp} / K_{T1-3} = 113 - j166, \text{ A.}$$

Токи прямой и обратной последовательности определяются для суммарного тока первичной обмотки и составляют:

$$I_{A(1)} = -157 - j1/157, \text{ A;}$$

$$I_{A(2)} = 15 + j45/47, \text{ A.}$$

Нагрузочные потери можно определить по формуле (5)

$$\Delta P_k = 3 \{ 1,49(157^2 + 47^2) + 0,134(211^2 + 123^2) + 0,045 \cdot 429^2 \} 10^{-3} = 165 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Здесь активные сопротивления обмоток на фазу вычислены по формулам (6) $R_{II} = 1,49 \text{ Ом}$; $R_I = 0,134 \text{ Ом}$; $R_p = 0,045 \text{ Ом}$. Токи фаз обмоток связаны через коэффициенты трансформации $K_{T1-2} = U_{\phi 1}/U_{\phi 2} = 2,23$; $K_{T1-3} = U_{\phi 1}/U_{\phi 3} = 6,4$. Коэффициент загрузки района принят равным 0,6 при $\cos\varphi_p = 0,8$.

Нагрузочные потери при номинальном токе согласно паспортным данным трансформатора т.п. Хапры равны 255 кВт.

Потери холостого хода трансформатора – величина достаточно стабильная и с погрешностью 5–10 % может быть взята по паспортным данным ($\Delta P_x = 125 \text{ кВт}$).

Аналогичные расчеты, проведенные различными методами для тяговых трансформаторов Северо-Кавказской железной дороги, показали, что при составлении энергетического баланса нагрузочные потери завышаются в 1,8–2 раза, т. к. учитываются в предположении работы трансформаторов с номинальной нагрузкой. В этой связи было бы целесообразно измерять нагрузочные потери энергии в трансформаторах соответствующей аппаратурой [4, 11].

При определении энергопотерь в тяговых трансформаторах способом ампер-квадрат-часов используют трехфазные микропроцессорные счетчики «Альфа Плюс», которые вычисляют значения нагрузочных потерь ΔW_k и потерь холостого хода трансформатора ΔW_x при коэффициенте настройки счетчика K_M в соответствии с формулами:

$$\Delta W_k = K_M \left(\int_0^T i_a^2 dt + \int_0^T i_b^2 dt + \int_0^T i_c^2 dt \right); \quad \Delta W_x = \int_0^T \Delta P_x dt,$$

где K_M соответствует приведенному к первичному напряжению активному сопротивлению трех обмоток трансформатора; ΔP_x – потери мощности холостого хода трансформатора в момент времени t (с течением времени изменяются незначительно, т. е. $\Delta P_x = \Delta P_{xx}$); i_a, i_b, i_c – токи фаз первичной обмотки.

Существуют следующие формулы для расчета коэффициента настройки счетчика при определении нагрузочных потерь:

$$K_M = \frac{\Delta P_{кн} 10^3}{I_H^2} = \frac{\Delta P_{кн} U_1^2 10^3}{S_H^2}, \text{ Ом,}$$

где $\Delta P_{кн}$ – активные (нагрузочные) потери мощности в обмотках трансформатора при номинальном токе; U_1 – линейное первичное напряжение, кВ; S_H – номинальная мощность, кВА; I_H – номинальный ток первичной обмотки, А.

Для трехобмоточных трансформаторов завод-изготовитель дает нагрузочные потери мощности в обмотках, определяемые при отключении одной из обмоток и нагрузки двух других номинальным током: $\Delta P_{к1-2}$, $\Delta P_{к1-3}$, $\Delta P_{к2-3}$. Используя эти данные, можно найти потери по отдельным обмоткам:

$$\Delta P_{к1} = 0,5(\Delta P_{к1-2} + \Delta P_{к1-3} - \Delta P_{к2-3}),$$

$$\Delta P_{к2} = 0,5(\Delta P_{к1-2} + \Delta P_{к2-3} - \Delta P_{к1-3}),$$

$$\Delta P_{к3} = 0,5(\Delta P_{к1-3} + \Delta P_{к2-3} - \Delta P_{к1-2}).$$

Тогда суммарные потери в обмотках при номинальном токе будут равны:

$$\Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{к1}} + \Delta P_{\text{к2}} + \Delta P_{\text{к3}} = 0,5(\Delta P_{\text{к1-2}} + \Delta P_{\text{к1-3}} - \Delta P_{\text{к2-3}}), \text{ Ом.}$$

Если известна только небольшая величина потерь $\Delta P_{\text{кн}}$ обмоток, потери для отдельных обмоток можно получить по приближенным формулам: $\Delta P_{\text{к1}} = 0,48\Delta P_{\text{кн}}$; $\Delta P_{\text{к2}} = 0,23\Delta P_{\text{кн}}$; $\Delta P_{\text{к3}} = 0,29\Delta P_{\text{кн}}$.

Настройка программного обеспечения счетчика «Альфа Плюс» позволяет определять нагрузочные потери энергии в трансформаторе.

Параметры трансформатора ТДНТГ, установленного на подстанции, следующие: $S_{\text{н}} = 31500$ кВА; $U_1 = 110$ кВ; $U_2 = 27,5$ кВ; $U_3 = 10$ кВ; $\Delta P_{\text{кн}} = 255$ кВт; $I_{\text{x}} = 5$ %; $U_{\text{к1-2}} = 10,5$ %; $U_{\text{к1-3}} = 16,8$ %; $U_{\text{к2-3}} = 5,9$ %.

Измерительные трансформаторы тока имеют коэффициенты трансформации $K_{\text{T1}} = 200/5$; $K_{\text{T2}} = 800/5$; $K_{\text{T3}} = 1000/5$.

Результаты измерений и вычислений энергопотерь для тягового трансформатора представлены на рис. 4.

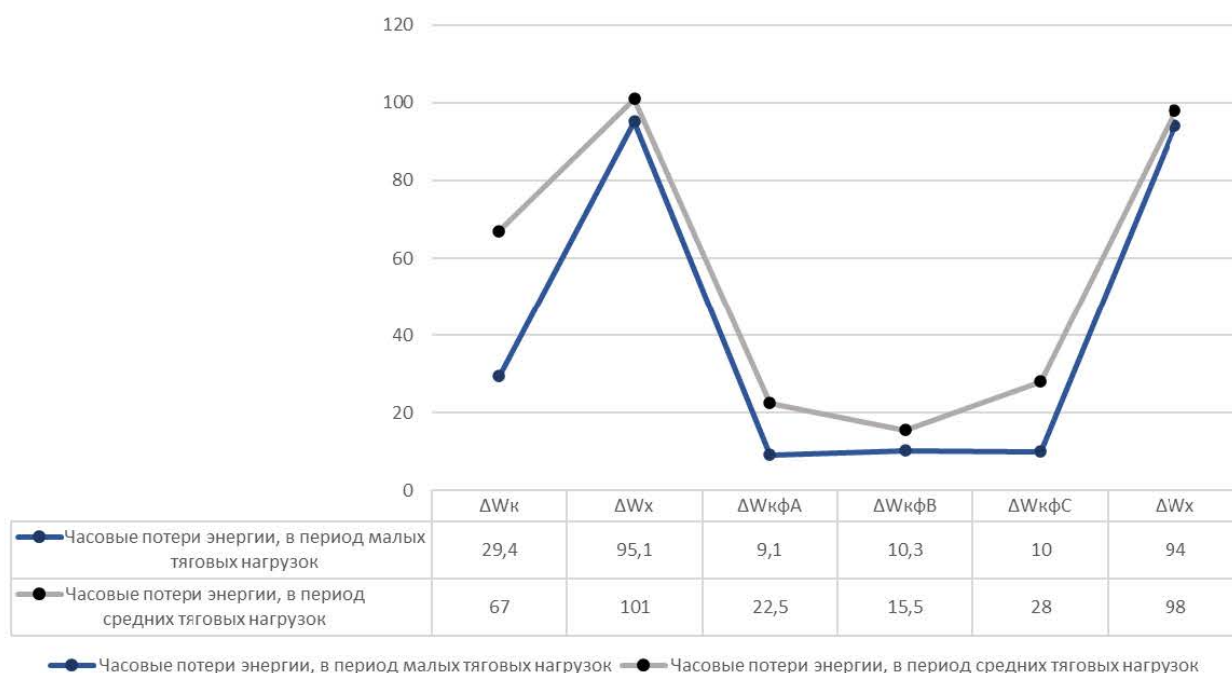


Рис. 4. Динамика энергопотерь в тяговом трансформаторе:

$\Delta W_{\text{к}}$ – суммарные потери, кВт·ч;

$\Delta W_{\text{кфА}}$, $\Delta W_{\text{кфВ}}$, $\Delta W_{\text{кфС}}$ – потери по фазам, кВт·ч

При этом суточные потери энергии суммарно составили $\Delta W_{\text{к}} = 1152$; $\Delta W_{\text{x}} = 2340$ кВт·ч; по фазам соответственно $\Delta W_{\text{кфА}} = 346$; $\Delta W_{\text{кфВ}} = 329$; $\Delta W_{\text{кфС}} = 477$; $\Delta W_{\text{x}} = 2328$ кВт·ч.

Погрешность при измерении нагрузочных потерь энергии по сравнению с вычисленными на ЭВМ по данным графиков нагрузок лежит в пределах 2,42–7,09 %. Часовые потери энергии холостого хода тягового трансформатора практически не меняются и близки к паспортным данным трансформатора, а нагрузочные потери значительно отличаются от паспортных данных. В периоды малых тяговых нагрузок или их отсутствия нагрузочные потери энергии незначительны. Можно заметить тенденцию к выравниванию по фазам нагрузочных потерь.

Анализ потерь энергии в трансформаторе показывает, что в периоды малых нагрузок процент нагрузочных потерь не превышает 0,5 %. Интересным является и факт равномерности потерь по фазам в периоды малых нагрузок. Это явление происходит за счет увеличения симметричной районной нагрузки. Косвенно этот факт подтверждает гипотезу о выравнивании нагрузок электрифицированных линий при малых грузопотоках и указывает на возможность повышения эффективности применения дифференцированных тарифов оплаты за электроэнергию.

Выводы

Экономия электроэнергии в перевозочном процессе требует соответствующих соотношений между массой поезда, количеством и типами поездов. Необходимые параметры можно получить, моделируя различные режимы работы электротяговых систем. Применительно к актуальным микропроцессорным счетчикам построена методика и представлены средства измерения энергопотерь в тяговых сетях и трансформаторах. Определены признаки, по которым можно оценить степень влияния на образующие компоненты электропотребления. Найденные общие зависимости энергопотерь могут быть использованы для включения их в базы знаний экспертных систем.

Список литературы

- 1 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.
- 2 Повышение энергетической эффективности электрических систем с тяговыми нагрузками / В. Т. Доманский, И. В. Доманский, В. В. Доманский, Г. А. Доманская // Zbornik radova XIII međunaroni naučno-stručni skup Informacione tehnologije za e-obrazovanje, Banja Luka, 24 – 25. 9. 2021 / Panevropski univerzitet Apeiron. – Bosna i Hercegovina/RS, Banja Luka, 2021. – С. 99–113. – ISBN 978-99976-34-80-1.
- 3 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.
- 4 Доманский, В. В. Информационные технологии минимизации оплаты за электропотребления тяговых подстанций при дифференцированных тарифах : монография / В. В. Доманский. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – 114 с. – ISBN 978-5-88814-519-7.
- 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 Марквард, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквард. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
- 7 Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – 2-е изд. перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1987. – 279 с.
- 8 Осипова, В. Э. Применение нейросетевых методов прогнозирования электропотребления на железнодорожном транспорте / В. Э. Осипова,

References

- 1 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.
- 2 Improving the energy efficiency of electrical systems with traction loads / V. T. Domansky, I. V. Domansky, V. V. Domansky, G. A. Domanskaya // Proceedings of the 13th International Scientific and Expert Meeting on Information Technology for e-Education, Banja Luka, 24 – 25. 9. 2021 / Pan-European University Apeiron. – Bosnia and Herzegovina/RS, Banja Luka, 2021. – P. 99–113. – ISBN 978-99976-34-80-1.
- 3 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.
- 4 Domansky, V. V. Information technologies of minimization of payment for electric power consumption of traction substations at differentiated tariffs : monograph / V. V. Domansky. – Rostov-on-Don : RSTU, 2017. – 114 p. – ISBN 978-5-88814-519-7.
- 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 Markvard, K. G. Electricity supply of electrified railways / K. G. Markvard. – Moscow : Transport, 1982. – 528 p.
- 7 Karyakin, R. N. Traction networks of alternating current / R. N. Karyakin. – 2nd ed., rev. and add. – Moscow : Transport, 1987. – 279 p.
- 8 Osipova, V. E. Application of neural network methods for forecasting power consumption in railway transport / V. E. Osipova, D. A. Yakovlev

Д. А. Яковлев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18, – № 1. – С. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118.

9 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.

10 Доманский, В. В. Параметры электроснабжения тяги поездов для наполнения баз данных имитационных моделей / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

11 Доманский, В. В. Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1 (89). – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

// Modern information technologies and IT education. – 2022. – Vol. 18, – No. 1. – P. 107–118. – DOI 10.25559/SITITO.18.202201.107-118

9 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.

10 Domansky, V. V. Parameters of electric power supply of train traction for filling databases of simulation models / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 91–99. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_91.

11 Domansky, V. V. Information technologies and a method for calculating the risk of failure in case of drift of the technical condition of a traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1 (89). – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_1_264.

V. V. Domansky

INTELLIGENT SYSTEM FOR ANALYSIS OF ENERGY LOSS FOR AC TRACTION NETWORKS FOR DATABASE UPDATING

Abstract. The paper considers methodology for creating intelligent systems for analyzing energy losses in traction networks including goals, objectives, functional composition, structure, as well as information bases of the intelligent system. The directions of research on optimization of power consumption modes, the structure of databases and knowledge bases are highlighted. In order of the developed intelligent system, the problem of assessing energy losses in traction networks and transformers and the efficiency of the train traction power supply system was studied. Factors influencing the components of power consumption have been identified, generalizing dependences of energy losses have been obtained for inclusion in the knowledge bases of expert systems.

Keywords: energy losses, electric traction network, traction transformers.

For citation: Domansky, V. V. Intelligent system for analysis of energy loss for ac traction networks for database updating / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 1. – P. 176–185. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_1_176.

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