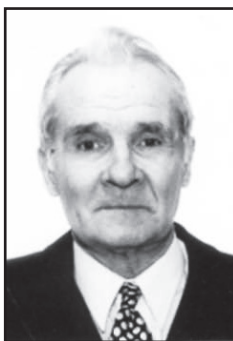




Токораспределение в автотрансформаторной системе



Юрий ЧЕРНОВ

Yuri A. CHERNOV

Изложен метод расчета токораспределения в автотрансформаторной системе электроснабжения однопутной и двухпутной железнодорожных линий с напряжением между контактной сетью и рельсами, отличающимся от напряжения между питающим проводом и рельсами. На основе представленных уравнений получены упрощенные формулы, помогающие рассчитать нагрузку элементов автотрансформатора.

Ключевые слова: железная дорога, система электроснабжения, автотрансформатор, токораспределение, тяговая сеть.

Чернов Юрий Антонович — доктор технических наук, профессор кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

В статье [1] предложена методика расчета нагрузок элементов трехпроводной автотрансформаторной системы электроснабжения однопутной железнодорожной линии, когда напряжение «контактная сеть — рельсы» отличается от напряжения «питающий провод — рельсы». При этом были приняты допущения: автотрансформаторы (АТ) на линии имеют одинаковую мощность, а следовательно, и равные сопротивления; напряжения на шинах соседних подстанций при двустороннем питании фидерной зоны равны; при определении нагрузки прилегающих к подстанции АТ падения напряжения в обмотках трансформаторов подстанции, присоединенных к контактной сети и питающему проводу, также равны.

В действительности на дорогах применены АТ разных мощности (10 МВА и 16 МВА) и конструкции (с регулированием напряжения и без регулирования), имеющие разные сопротивления.

Использование в [1] обобщенного метода расчета тяговой сети, предложенного профессором Г. Г. Марквардтом [2], вносит погрешность в определение сопротивлений контуров автотрансформаторной системы и затрудняет понимание физических процессов в тяговой

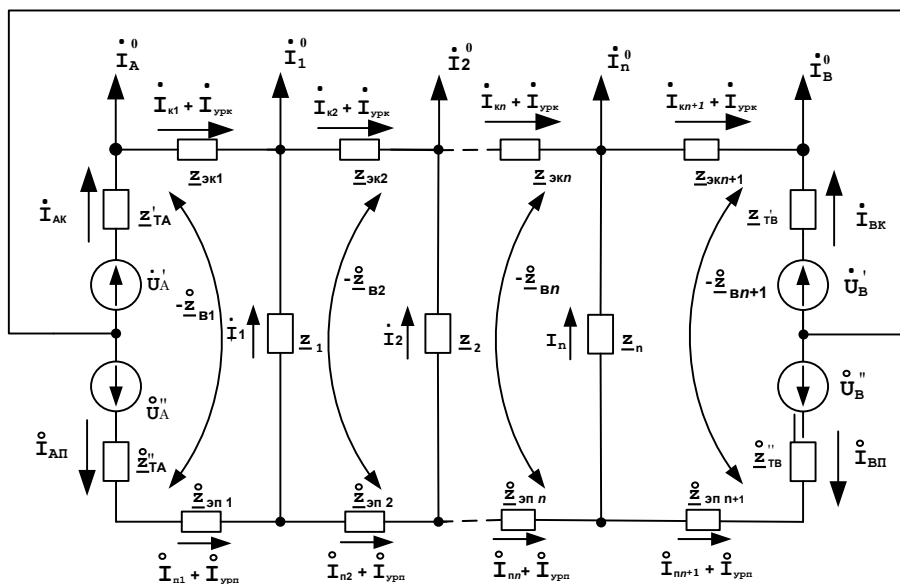


Рис. 2. Схема замещения системы с АТ для расчета напряжения.

между последним автотрансформатором и подстанцией В. При этом, учитывая, что

$$\dot{I}_{BK} = \dot{I}_B^0 - \dot{I}_{kn+1} - \dot{I}_{урк} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{ВП} = -\dot{I}_{pn+1} - \dot{I}_{урп},$$

имеем

$$\frac{\underline{Z}'_{ТВ}(\dot{I}_{kn+1} + \dot{I}_{урк}) - \underline{Z}''_{ТВ}(\dot{I}_{pn+1} + \dot{I}_{урп})}{\ell_{n+1}} + \left(\frac{\underline{Z}_n}{\ell_{n+1}} + \frac{\underline{Z}_n}{\ell_n} + \underline{Z}_{ок} + \underline{Z}_{оп}^0 \right) \dot{I}_n - \frac{\underline{Z}'_{n-1} \dot{I}_{n-1}}{\ell_n} = \underline{Z}_{ок} \dot{I}_n^0 + \frac{\underline{Z}'_{ТВ} \dot{I}_B^0}{\ell_{n+1}}. \quad (5)$$

Нагрузки промежуточных автотрансформаторов i помогает найти уравнение, связывающее нагрузку трех АТ. Уравнение для замкнутого контура между АТ i и $i+1$ определяется выражением (2) с заменой индекса $i-1$ на i , а индекса i на $i+1$. Вычитая уравнение для контура $i+1$ из уравнения (2), после преобразований, аналогичных преобразованиям при выводе формулы (4), имеем для случаев $1 < i < n$:

$$-\frac{\underline{Z}_{i-1}}{\ell_i} \dot{I}_{i-1} + \left(\frac{\underline{Z}_i}{\ell_i} + \frac{\underline{Z}_i}{\ell_{i+1}} + \underline{Z}_{ок} + \underline{Z}_{оп}^0 \right) \dot{I}_i - \frac{\underline{Z}_{i+1}}{\ell_{i+1}} \dot{I}_{i+1} = \underline{Z}_{ок} \dot{I}_i^0. \quad (6)$$

Из рис. 1 ясно, что для расчета тока распределения при двустороннем питании в случае n АТ на фидерной зоне достаточно решить систему $n+2$ уравнений. Из них n

уравнений определяются выражениями (4), (5) и (6). Недостающие два уравнения определим из выражений, связывающих УТ в контактной сети и питающем проводе с токами АТ.

При известных нагрузках АТ токи фидеров подстанций в случае равенства напряжений на шинах соседних подстанций можно найти переносом нагрузок в точки подключения АТ в точки подключения подстанций. В результате с учетом УТ нагрузки полуобмоток трансформаторов равны:

$$\dot{I}_{AK} = \dot{I}_A^0 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{Bi}}{L} (\dot{I}_i^0 - \dot{I}_i) + \dot{I}_{урк}; \quad (7)$$

$$\dot{I}_{АП} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{Bi}}{L} \dot{I}_i + \dot{I}_{урп}; \quad (8)$$

$$\dot{I}_{BK} = \dot{I}_B^0 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{Ai}}{L} (\dot{I}_i^0 - \dot{I}_i) - \dot{I}_{урк}; \quad (9)$$

$$\dot{I}_{ВП} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{Ai}}{L} \dot{I}_i - \dot{I}_{урп}, \quad (10)$$

где $\dot{I}_{урк}, \dot{I}_{урп}$ — уравнивающие токи соответственно в контурах «контактная сеть — рельсы» и «питающий провод — рельсы»;

L — расстояние между подстанциями;

L_{Ai} — расстояние от автотрансформатора с номером i до подстанции А;

L_{Bi} — расстояние от автотрансформатора с номером i до подстанции В.

С целью определения уравнивающего тока, исходя из схемы замещения на рис. 2, запишем уравнения для верхнего и нижнего контуров между подстанциями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_A - \dot{U}'_B &= \underline{Z}'_{\text{ж}} \dot{I}_{\text{AK}} + \underline{Z}_{\text{ок}} \dot{L}_{\text{урк}} - \\ &\underline{Z}_{\text{ов}}^0 \dot{L}_{\text{урп}}^0 - \underline{Z}'_{\text{TB}} \dot{I}_{\text{BK}}; \\ \dot{U}''_A - \dot{U}''_B &= \underline{Z}''_{\text{ж}} \dot{I}_{\text{АП}} + \\ &\underline{Z}_{\text{оэл}}^0 \dot{L}_{\text{урп}}^0 - \underline{Z}_{\text{ов}}^0 \dot{L}_{\text{урк}}^0 - \underline{Z}''_{\text{TB}} \dot{I}_{\text{ВП}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Подставив (7) – (10) в (11), после преобразований имеем:

$$\begin{aligned} (\underline{Z}'_{\text{ТА}} + \underline{Z}_{\text{ок}} \underline{L} + \underline{Z}'_{\text{TB}}) \dot{I}_{\text{урк}} - \underline{Z}_{\text{ов}}^0 \dot{L}_{\text{урп}}^0 &= \Delta \dot{U}_{\text{К}}; \quad (12) \\ -\underline{Z}_{\text{ов}}^0 \dot{L}_{\text{урк}} + (\underline{Z}''_{\text{ТА}} + \underline{Z}_{\text{оэл}}^0 \underline{L} + \underline{Z}''_{\text{TB}}) \dot{I}_{\text{урп}} &= \Delta \dot{U}_{\text{П}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{К}} &= \dot{U}'_A - \dot{U}'_B + \underline{Z}'_{\text{TB}} [\dot{I}_B^0 + \sum_{i=1}^n (\dot{I}_i^0 - \dot{I}_i) \frac{L_{\text{Ai}}}{L}] - \\ &\underline{Z}'_{\text{ТА}} [\dot{I}_A^0 + \sum_{i=1}^n (\dot{I}_i^0 - \dot{I}_i) \frac{L_{\text{Bi}}}{L}]; \\ \Delta \dot{U}_{\text{П}} &= \dot{U}''_A - \dot{U}''_B + \frac{\underline{Z}''_{\text{TB}}}{L} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i L_{\text{Ai}} - \frac{\underline{Z}''_{\text{ТА}}}{L} \sum_{i=1}^n \dot{I}_i L_{\text{Bi}}. \end{aligned}$$

Уравнения (12) и (13) являются дополнительными к уравнениям, связывающим нагрузки АТ.

При одностороннем питании фидерной зоны для расчёта токораспределения необходима система уравнений с n неизвестными. В этом случае $n-1$ уравнение записывается на основании выражения (6). Последнее уравнение можно получить, приняв $\ell_{n+1} = \infty$ в (5). В результате:

$$-\frac{\underline{Z}_{n-1} \dot{I}_{n-1}}{\ell_n} + (\frac{\underline{Z}_n}{\ell_n} + \underline{Z}_{\text{ок}} + \underline{Z}_{\text{оп}}^0) \dot{I}_n = \underline{Z}_{\text{ок}} \dot{I}_n^0. \quad (14)$$

Токи $\dot{I}_{\text{AK}}$ и $\dot{I}_{\text{АП}}$ определяются по формулам (7) и (8), приняв $L_{\text{Bi}} = L$, $\dot{I}_{\text{урк}} = 0$ и $\dot{I}_{\text{урп}} = 0$.

УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ

Изложенная методика, основанная на решении системы уравнений, позволяет получить простые выражения для расчёта токораспределения в системе с автотрансформаторами.

Пренебрегая малым сопротивлением всех других автотрансформаторов ($Z_i = 0$) в уравнении (6), имеем [1]:

$$\dot{I}_i = \frac{\underline{Z}_{\text{ок}}}{\underline{Z}_{\text{ок}} + \underline{Z}_{\text{оп}}^0} \dot{I}_i^0. \quad (15)$$

Обозначим для краткости

$$\alpha = \frac{\underline{Z}_{\text{ок}}}{\underline{Z}_{\text{ок}} + \underline{Z}_{\text{оп}}^0}.$$

Используя эту формулу для $\dot{I}_{i-1}$ и $\dot{I}_{i+1}$ в уравнении (6), получаем формулу определения нагрузки промежуточных автотрансформаторов с номером i ($1 < i < n$), отличающуюся от аналогичной формулы в работе [1] учетом различия сопротивлений АТ и другим способом нахождения сопротивлений тяговой сети

$$\dot{I}_i = \frac{\frac{\underline{Z}_{i-1} \dot{I}_{i-1}^0 \alpha}{\ell_i} + \underline{Z}_{\text{ок}} \dot{I}_i^0 + \frac{\underline{Z}_{i+1} \dot{I}_{i+1}^0 \alpha}{\ell_{i+1}}}{\frac{\underline{Z}_i}{\ell_i} + \frac{\underline{Z}_i}{\ell_{i+1}} + (\underline{Z}_{\text{ок}} + \underline{Z}_{\text{оп}}^0)}. \quad (16)$$

Последняя формула дает приемлемые для практических расчетов результаты при $i \neq 1$. Приведенная в [1] формула для первых от подстанций автотрансформаторов демонстрирует большую погрешность, поскольку не учитывает существенное влияние на их нагрузку значительного сопротивления трансформаторов подстанции и изменяющуюся разность нагрузок полуобмоток трансформатора при перемещении поезда от подстанции к первому АТ, что заметно сказывается на первом слагаемом формулы (4).

Получим более точную формулу для определения нагрузки первого автотрансформатора. С этой целью, выразив в уравнении (4) ток $\dot{I}_2$ через $\dot{I}_2^0$ в соответствии с (15) и приняв $\underline{Z}'_{\text{ТА}} \dot{I}_{\text{урк}} = \underline{Z}''_{\text{ТА}} \dot{I}_{\text{урп}}$, имеем:

$$\begin{aligned} -\frac{(\underline{Z}'_{\text{ТА}} \dot{I}_{\text{AK}} - \underline{Z}''_{\text{ТА}} \dot{I}_{\text{АП}})}{\ell_1} + \frac{\underline{Z}_1}{\ell_1} + \frac{\underline{Z}_1}{\ell_2} + \\ (\underline{Z}_{\text{ок}} + \underline{Z}_{\text{оп}}^0) \dot{I}_1 = \underline{Z}_{\text{ок}} \dot{I}_1^0 + \frac{\underline{Z}_{\text{ок}} \dot{I}_2^0 \alpha}{\ell_2}. \end{aligned} \quad (17)$$

С учетом последнего допущения запишем

$$\dot{I}_{\text{AK}} = \dot{I}_A^0 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{Bi}}}{L} (\dot{I}_i^0 - \dot{I}_i); \quad (18)$$

$$\dot{I}_{\text{АП}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{\text{Bi}}}{L} \dot{I}_i. \quad (19)$$





$$\dot{I}_1 = \frac{\frac{Z'_{TA}(\dot{I}_A^0 + a_1 \dot{I}_1^0)}{\ell_1} + \frac{Z'_{TA}(1-\alpha) - \frac{Z''_{TA}}{\ell_1} \alpha \sum_{i=2}^n a_i \dot{I}_i^0 + Z_{OK} \dot{I}_1^0 + \frac{\alpha Z_2}{\ell_2} \dot{I}_2^0}{\frac{a_1(Z'_{TA} + \frac{Z''_{TA}}{\ell_1}) + Z_1}{\ell_1} + \frac{Z_1}{\ell_2} + (Z_{OK} + \frac{Z_{ON}}{\ell_2})}} \quad (20)$$

$$\dot{I}_{урк} = \frac{\Delta \dot{U}_K (\frac{Z''_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z''_{TB}}{\ell_2}) + \Delta \dot{U}_П \frac{Z_{OB}}{\ell_2} L}{(\frac{Z'_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z'_{TB}}{\ell_2})(\frac{Z''_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z''_{TB}}{\ell_2}) - (\frac{Z_{OB}}{\ell_2} L)^2} \quad (21)$$

$$\dot{I}_{урп} = \frac{\Delta \dot{U}_П (\frac{Z'_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z'_{TB}}{\ell_2}) + \Delta \dot{U}_K \frac{Z_{OB}}{\ell_2} L}{(\frac{Z'_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z'_{TB}}{\ell_2})(\frac{Z''_{TA}}{\ell_1} + \frac{Z_{ON}}{\ell_1} L + \frac{Z''_{TB}}{\ell_2}) - (\frac{Z_{OB}}{\ell_2} L)^2} \quad (22)$$

$$- \frac{Z'_{TA}(\dot{I}_{к11} + \dot{I}_{к21} + 2\dot{I}_{урк}) - \frac{Z''_{TA}}{\ell_1}(\dot{I}_{п11} + \dot{I}_{п21} + 2\dot{I}_{урп})}{\ell_1} + (\frac{Z_{11}}{\ell_1} + \frac{Z_{11}}{\ell_2} + Z_{OK} + \frac{Z_{ON}}{\ell_2})\dot{I}_{11} - \quad (23)$$

$$- \frac{Z_{12}\dot{I}_{12}}{\ell_2} + (Z_{ОВК} + \frac{Z_{ОВВ}}{\ell_2})\dot{I}_{21} = Z_{OK}\dot{I}_{11} + \frac{Z'_{TA}}{\ell_1}(\dot{I}_{A1}^0 + \dot{I}_{A2}^0) + \frac{Z_{ОВК}}{\ell_2}\dot{I}_{21}^0;$$

$$- \frac{Z_{li-1}}{\ell_i}\dot{I}_{li-1} + (\frac{Z_{li}}{\ell_i} + \frac{Z_{li}}{\ell_{i+1}} + Z_{OK} + \frac{Z_{ON}}{\ell_{i+1}})\dot{I}_{li} - \frac{Z_{i+1}}{\ell_{i+1}}\dot{I}_{i+1} + (Z_{ОВК} + \frac{Z_{ОВП}}{\ell_{i+1}})\dot{I}_{2i} = Z_{OK}\dot{I}_{li}^0 + \frac{Z_{ОВК}}{\ell_{i+1}}\dot{I}_{2i}^0 \quad (24)$$

Подставив (18) и (19) в формулу (17) и заменив нагрузки всех автотрансформаторов, кроме первого, приближенным соотношением (15), после преобразования получим (20).

В формуле (20) и последующих для краткости дополнительно обозначено $a_i = L_{Bi}/L$.

При одностороннем питании фидерной зоны в формуле (20) $a_i = 1$, а нагрузка последнего АТ определяется по формуле (16), приняв $\ell_{i+1} = \infty$.

При известных нагрузках АТ нагрузку трансформаторов подстанции при одностороннем питании можно определить по формулам (18) и (19), положив в них $\ell_{Bi} = L$. Для случая двустороннего питания, решив систему двух уравнений (12) и (13), имеем (21, 22).

При известных нагрузках АТ и уравнительных токах нагрузка фидеров подстанций находится по формулам (7) – (10).

ДВУХПУТНАЯ ЛИНИЯ

Воспользовавшись упрощенной схемой замещения системы с АТ двухпутной линии [3], которая отличается от схемы на рис. 1

наличием контактной сети, питающего провода и автотрансформаторов на втором пути. Для двухпутной линии введены дополнительные цифровые индексы 1 и 2, указывающие, что соответствующее значение отнесено к первому или второму пути.

Записав уравнения для замкнутых контуров между подстанцией и первым АТ, а также между АТ $i-1$ и i для первого пути с учетом взаимоиндукции между путями после аналогичных преобразований, как и на однопутной линии при выводе формул (4) и (6), имеем (23, 24).

Уравнение (23) связывает нагрузку контактной сети и питающих проводов обоих путей у подстанции А, а также нагрузку первого и второго АТ на первом пути с нагрузкой первого АТ на втором пути. Уравнение (24) связывает нагрузку трех АТ первого пути и АТ с номером i второго пути.

В последних формулах, кроме обозначений номера пути, дополнительно обозначено влияние между путями:

$$\frac{Z_{ОВК}}{\ell_1} = \frac{Z_{ОВКК}}{\ell_1} + \frac{Z_{ОВК2П1}}{\ell_1};$$

$$\frac{Z_{ОВП}}{\ell_1} = \frac{Z_{ОВПП}}{\ell_1} + \frac{Z_{ОВК1П2}}{\ell_1}.$$

При $Z_{пер} = \infty$

$$\begin{aligned} Z_{\text{овкк}} &= Z_{\text{окк}} + Z_{\text{ор}} - 2Z_{\text{окр}}; \\ Z_{\text{овпп}}^0 &= (Z_{\text{опп}} + Z_{\text{ор}} - 2Z_{\text{опр}}) \frac{1}{K^2}; \\ Z_{\text{овк1п2}}^0 &= (Z_{\text{ок1п2}} + Z_{\text{ор}} - Z_{\text{окр}} - Z_{\text{опр}}) \frac{1}{K}. \end{aligned} \quad (25')$$

При $Z_{\text{пер}} = 0$

$$\begin{aligned} Z_{\text{овкк}} &= Z_{\text{окк}} - \frac{Z_{\text{окр}}^2}{Z_{\text{ор}}}; \\ Z_{\text{овпп}}^0 &= (Z_{\text{опп}} - \frac{Z_{\text{опр}}^2}{Z_{\text{ор}}}) \frac{1}{K^2}; \\ Z_{\text{овк1п2}}^0 &= (Z_{\text{ок1п2}} - \frac{Z_{\text{окр}} Z_{\text{опр}}}{Z_{\text{ор}}}) \frac{1}{K}, \end{aligned} \quad (25'')$$

где $Z_{\text{окк}}$, $Z_{\text{опп}}$, $Z_{\text{ок1п2}}$ — удельные взаимные сопротивления между контурами «контактная сеть — земля» двух путей, между контурами «питающий провод — земля» двух путей, а также между контуром «контактная сеть — земля» одного пути и контуром «питающий провод — земля» второго пути; $Z_{\text{ор}}$, $Z_{\text{окр}}$, $Z_{\text{опр}}$ — удельное сопротивление эквивалентного рельса двух путей и удельные взаимные сопротивления между контурами «контактный провод — земля», а также «питающий провод — земля».

РАЗДЕЛЬНОЕ ПИТАНИЕ ПУТЕЙ

На двухпутной линии обозначим $i_A^0 = i_{A1}^0 + i_{A2}^0$,

где i_{Aj}^0 — нагрузка в точке присоединения к подстанции пути j , полученная в результате переноса в эту точку нагрузки поездов между подстанцией А и первым АТ на пути j .

Нагрузки полюбомоток трансформатора любой подстанции равны сумме нагрузок присоединенных соответствующих фидеров. При одинаковых контактных подвесках по путям и симметричном расположении питающих проводов на опорах контактной сети уравнительные токи в проводах обоих путей равны. Обозначив как $I_{\text{урк}}$ и $I_{\text{урп}}$ уравнительный ток одного пути, получим нагрузки фидеров пути j подстанции А:

$$i_{\text{Афк}j} = i_{\text{А}j}^0 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{Bi}}{L} (i_{ji}^0 - i_{ji}) + i_{\text{урк}}; \quad (26)$$

$$i_{\text{Афп}j} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{Bi}}{L} i_{ji}^0 + i_{\text{урп}}. \quad (27)$$

Следовательно, при определении нагрузок элементов системы с автотрансформаторами имеем $2n+2$ неизвестных, где n — число АТ на одном пути. Выражения (23) и (24) позволяют составить $2n$ уравнений, поменяв для второго пути соответственно индексы 1 и 2. Недостающие два уравнения получим при обходе замкнутых контуров между подстанциями (рис. 2) по контактной сети-рельсам и по питающему проводу-рельсам первого пути с учетом взаимной индукции токов в контактной сети и питающем проводе второго пути:

$$\left. \begin{aligned} &[2(Z'_{\text{ТА}} + Z'_{\text{ТВ}}) + \\ &(Z_{\text{окк}} + Z_{\text{овкк}})L]i_{\text{урк}} - \\ &(Z_{\text{овк1п1}}^0 + Z_{\text{овк1п2}}^0)Li_{\text{урп}} = \Delta\dot{U}_{\text{К}j}; \\ &-(Z_{\text{овк1п1}}^0 + Z_{\text{овк2п1}}^0)Li_{\text{урк}} + \\ &[2(Z''_{\text{ТА}} + Z''_{\text{ТВ}}) + \\ &(Z_{\text{озп}}^0 + Z_{\text{овпп}}^0)L]i_{\text{урп}} = \Delta\dot{U}_{\text{П}j}, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}_{\text{К}j} &= \dot{U}'_A - \dot{U}'_B + Z'_{\text{ТВ}} i_B^0 - Z'_{\text{ТА}} i_A^0 + \\ &\frac{1}{L} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n (i_{ji}^0 - i_{ji})(Z'_{\text{ТВ}} L_{Ai} - Z'_{\text{ТА}} L_{Bi}); \\ \Delta\dot{U}_{\text{П}j} &= \dot{U}''_A - \dot{U}''_B + \\ &\frac{1}{L} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^n i_{ji}^0 (Z''_{\text{ТВ}} L_{Ai} - Z''_{\text{ТА}} L_{Bi}). \end{aligned}$$

УЗЛОВАЯ СХЕМА С ОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДОВ ТЯГОВОЙ СЕТИ

В случае узловой схемы, когда автотрансформаторный пункт питания не совмещен с постом секционирования, следует разнести токи поездов, находящихся у поста, между четырьмя ближайшими автотрансформаторами, расположенными слева и справа от поста на каждом пути. Разнос осуществляется как при обычной узловой схеме, предположив, что в точках подключения этих автотрансформаторов имеются подстанции с равными напряжениями. После этого находится токораспределение, как и в случае раздельного питания путей.

При совмещении автотрансформаторного пункта с постом секционирования, нагрузка фидеров определяется по формулам (26) и (27). При этом следует иметь в виду, что токи в узловой точке поста



$$i_{li} = \frac{\frac{Z_{li-1}}{\ell_i} i_{li-1} + \frac{Z_{li+1}}{\ell_{i+1}} i_{li+1} + Z_{ок} i_{li}^0 + Z_{овк} i_{2i}^0 - (Z_{овк} + Z_{овп}) i_{2i}^0}{\frac{Z_{li}}{\ell_i} + \frac{Z_{li}}{\ell_{i+1}} + Z_{ок} + Z_{оп}}. \quad (31)$$

секционирования ($i_y^0 - i_y$) в контактной сети и i_y в питающем проводе делятся на равные части. Поэтому в выражения (26) и (27) следует подставлять $0,5(i_y^0 - i_y)$ и $0,5i_y$. В формулах надо учитывать УТ одного пути, определяемый выражениями (12) и (13), так как согласно (3) он не влияет на нагрузку промежуточных АТ.

При узловом схеме имеем $(2n-1) + 2$ неизвестных. В этом случае составляются $2n-2$ уравнения, связывающие нагрузки промежуточных автотрансформаторов (кроме подключенного на посту), по формулам (23) и (24), как и при раздельном питании проводов тяговой сети.

Уравнение с индексом «у» получаем, записав по выражению (24) уравнения, связывающие ток автотрансформатора в узле с токами прилегающих автотрансформаторов для обоих путей, и сложив эти уравнения. После преобразований с учетом очевидных соотношений

$$(i_{kly} + i_{k2y}) - (i_{kly+1} + i_{k2y+1}) = i_y^0 - i_y;$$

$$(i_{nly} + i_{n2y}) - (i_{nly+1} + i_{n2y+1}) = i_y$$

имеем:

$$\begin{aligned} & - \frac{Z_{ly-1} i_{ly-1} + Z_{2y-1} i_{2y-1}}{\ell_y} + \\ & \left(\frac{2Z_y}{\ell_y} + \frac{2Z_y}{\ell_{y+1}} + Z_{ок} + Z_{овк} + Z_{оп} + Z_{овп} \right) i_y - \\ & - \frac{Z_{ly+1} i_{ly+1} + Z_{2y+1} i_{2y+1}}{\ell_{y+1}} = \\ & (Z_{ок} + Z_{овк}) i_y^0. \end{aligned} \quad (29)$$

Два недостающих уравнения определяются, как и при раздельном питании путей, выражениями (28).

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДОВ

При одинаковых подвесках по путям и симметричном расположении питающих проводов на опорах контактной сети токи в проводах тяговой сети обоих путей в расчетной схеме равны. В этом случае расчет

токораспределения при параллельном соединении проводов тяговой сети сводится к расчету токораспределения на однопутной линии, если за i_k и i_n принять суммарный ток двух путей, а вместо значений для однопутной линии $Z_{ок}$, $Z_{оп}$, $Z_{ов}$ и i_i^0 в уравнения подставить соответствующие значения для двухпутной линии

$$\frac{Z_{ок} + Z_{овкк}}{2}, \frac{Z_{оп} + Z_{овпп}}{2}, \frac{Z_{овк1п1} + Z_{овк1п2}}{2}, i_{li}^0 + i_{2i}^0. \quad (30)$$

УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ И РАЗДЕЛЬНОЕ ПИТАНИЕ ПУТЕЙ

Уравнение (24) для определения нагрузки промежуточного АТ с номером i первого пути запишем в вышеприведенном виде (31).

Первые два слагаемых числителя (31) показывают, какую часть нагрузки двух соседних АТ берёт на себя i -й автотрансформатор.

Если допустить в (31), что $Z_i = 0$, то приближенно

$$i_{li} = \frac{Z_{ок} i_{li}^0 + Z_{овк} i_{2i}^0 - (Z_{овк} + Z_{овп}) i_{2i}^0}{Z_{ок} + Z_{оп}}. \quad (32)$$

Второе и третье слагаемые (32) учитывают влияние нагрузки второго пути на нагрузку АТ первого пути. Рассмотрим их отдельно для оценки указанного влияния. С этой целью примем приближенно:

$$i_{2i} = \frac{i_{2i}^0}{K+1}.$$

Тогда с учетом (32) и (25)

$$Z_{овк} i_{2i}^0 - (Z_{овк} + Z_{овп}) i_{2i} = B i_{2i}^0, \quad (33)$$

где

$$B = Z_{овкк} - \frac{Z_{овкк} + Z_{овпп}}{K+1} + \frac{Z_{овк1п2}(K-1)}{K+1}.$$

Для системы 2х25кВ $K=1$ и согласно (25) можно принять, что $Z_{овкк} \approx Z_{овп}$. При этом $B \approx 0$ и влиянием второго пути можно пренебречь.

При $K > 1$, приняв при определении i_{2i} по (32) $B=0$, получим из (33)

$$\dot{I}_{11} = \frac{\left[\frac{Z'_{TA}}{\ell_1} (\dot{I}_{k11} + \dot{I}_{k21}) - \frac{Z''_{TA}}{\ell_1} (\dot{I}_{n11}^0 + \dot{I}_{n21}^0) \right] + \frac{Z'_{TA}}{\ell_1} (\dot{I}_{A1}^0 + \dot{I}_{A2}^0) + \frac{Z_{12}}{\ell_2} \alpha \dot{I}_{12}^0 + Z_{ок} \dot{I}_{11}^0 + B \dot{I}_{21}^0}{\frac{Z_{11}}{\ell_1} + \frac{Z_{11}}{\ell_2} + Z_{ок} + Z_{оп}}. \quad (37)$$

$$B = Z_{ок} - (Z_{ок} + Z_{оп}^0) \alpha, \quad (34)$$

где α находится формулой (15), как и в случае однопутной линии.

Получим формулы для более общего случая, когда $K \neq 1$ с учетом влияния второго пути. При этом нагрузку АТ другого пути при учете влияния ее на нагрузку рассматриваемого АТ будем определять по приближенной формуле

$$\dot{I}_{li} = \alpha \dot{I}_{li}^0 + B \dot{I}_{2i}^0, \quad (35),$$

а влияние других автотрансформаторов – по формуле (15).

При этих условиях вместо (31) имеем:

$$\dot{I}_{li} = \frac{\frac{Z_{li-1}}{\ell_i} \alpha \dot{I}_{li-1}^0 + \frac{Z_{li+1}}{\ell_{i+1}} \alpha \dot{I}_{li+1}^0 + Z_{ок} \dot{I}_{li}^0 + B \dot{I}_{2i}^0}{\frac{Z_{li}}{\ell_i} + \frac{Z_{li}}{\ell_{i+1}} + Z_{ок} + Z_{оп}^0}. \quad (36)$$

Для определения нагрузки первого от подстанции автотрансформатора воспользуемся уравнением (23), которое аналогично (36) запишем в виде (37):

Допущение, что выражение в квадратных скобках формулы (37) равно нулю, даёт, как уже показано выше, погрешность на однопутной линии. На двухпутной линии погрешность существенно увеличивается, ибо согласно формуле (37) при отсутствии нагрузки на первом пути через шины подстанции первый от подстанции АТ на первом пути нагружается за счет нагрузки второго пути.

При определении нагрузок первых от подстанции АТ на обоих путях рассмотрены уравнения замкнутых контуров между подстанцией и первым АТ. Для первого пути это уравнение (23). Для второго имеем аналогичное уравнение с заменой индексов путей.

Заменой в них нагрузок проводов каждого пути у подстанции в соответствии с выражениями (18), (19), а нагрузок всех автотрансформаторов, кроме ближайших к подстанции, по формуле (15) получена система двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \dot{I}_{11} + A_{12} \dot{I}_{21} &= \Delta \dot{U}_1 \\ A_{21} \dot{I}_{11} + A_{22} \dot{I}_{21} &= \Delta \dot{U}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (38)$$

где

$$A_{11} = \frac{a_1 (Z'_{TA} + Z''_{TA})}{\ell_1} + \frac{Z_{11}}{\ell_1} + \frac{Z_{11}}{\ell_2} + Z_{ок} + Z_{оп}^0;$$

$$A_{12} = A_{21} = \frac{a_1 (Z'_{TA} + Z''_{TA})}{\ell_1} + Z_{ок} + Z_{оп}^0;$$

$$A_{22} = \frac{a_1 (Z'_{TA} + Z''_{TA})}{\ell_1} + \frac{Z_{21}}{\ell_1} + \frac{Z_{21}}{\ell_2} + Z_{ок} + Z_{оп}^0;$$

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{Z'_{TA}}{\ell_1} [\dot{I}_A^0 + a_1 (\dot{I}_{11}^0 + \dot{I}_{21}^0)] + Z_{ок} \dot{I}_{11}^0 +$$

$$+ Z_{ок} \dot{I}_{21}^0 + \frac{Z_{12}}{\ell_2} \alpha \dot{I}_{12}^0 + \frac{Z'_{TA} (1 - \alpha) - Z''_{TA} \alpha}{\ell_1}$$

$$\sum_{i=2}^n a_i (\dot{I}_{li}^0 + \dot{I}_{2i}^0);$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{Z'_{TA}}{\ell_1} [\dot{I}_A^0 + a_1 (\dot{I}_{11}^0 + \dot{I}_{21}^0)] + Z_{ок} \dot{I}_{21}^0 +$$

$$+ Z_{ок} \dot{I}_{11}^0 + \frac{Z_{22}}{\ell_2} \alpha \dot{I}_{22}^0 +$$

$$\frac{Z'_{TA} (1 - \alpha) - Z''_{TA} \alpha}{\ell_1} \sum_{i=2}^n a_i (\dot{I}_{li}^0 + \dot{I}_{2i}^0).$$

В случае системы 2х25 кВ можно пренебречь последним слагаемым в правой части двух последних уравнений.

Решив систему (38), имеем:

$$\dot{I}_{11} = \frac{A_{22} \Delta \dot{U}_1 - A_{12} \Delta \dot{U}_2}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2}; \quad (39)$$

$$\dot{I}_{21} = \frac{A_{11} \Delta \dot{U}_2 - A_{21} \Delta \dot{U}_1}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2}. \quad (40)$$

Токи фидеров подстанций каждого пути j определяются по формулам (26) и (27).

Решая систему уравнений (28) аналогично системе двух уравнений (12) и (13) в случае однопутной линии, находим $\dot{I}_{урк}^0$ и $\dot{I}_{урп}$ для одного пути.

Нагрузка фидеров подстанции А определяется по формулам (26) и (27). Для





$$i_y = \frac{\left(\frac{Z_{1y-1} i_{1y-1}^0 + Z_{2y-1} i_{2y-1}^0}{\ell_y} + \frac{Z_{1y+1} i_{1y+1}^0 + Z_{2y+1} i_{2y+1}^0}{\ell_{y+1}} \right) \alpha + (Z_{ок} + Z_{обк}^0) i_y^0}{\frac{2Z_y}{\ell_y} + \frac{2Z_{y+1}}{\ell_{y+1}} + (Z_{ок} + Z_{обк}^0) + (Z_{оп}^0 + Z_{овп}^0)} \quad (41)$$

подстанции В в этих формулах следует заменить А на В, L_{Bi} на L_{Ai} и уравнильный ток взять со знаком «минус».

УЗЛОВАЯ СХЕМА

В данной схеме формулы определения нагрузок всех автотрансформаторов, кроме присоединенного к узловой точке, и уравнильного тока остаются теми же, что и в схеме раздельного питания путей.

Для выявления нагрузки автотрансформатора, присоединенного в узловой точке, воспользуемся уравнением (29). Заменяя нагрузки всех автотрансформаторов, кроме рассматриваемого, нагрузками, приложенными к ним, по формуле (15) имеем (41).

При узловой схеме токи $(i_{ji}^0 - i_{ji}) \delta i_{ji}$, без учета уравнильного, следует разнести соответственно между фидерами контактной сети и фидерами питающего провода, как это делается при узловой схеме в системе 25 кВ.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

В этом случае для той же тяговой сети расчет можно вести по формулам, полученным для однопутной линии, подставив

вместо прежних значений $Z_{ок}^0$, $Z_{оп}^0$, $Z_{об}^0$, i_i^0 соответствующие значения для двухпутной линии, определяемые выражениями (30).

ВЫВОДЫ

1. Предложены формулы для расчета нагрузок элементов автотрансформаторной системы электроснабжения на однопутной и двухпутной линиях.

2. Сделанные по формулам расчеты показывают, что уравнильный ток не влияет на нагрузку промежуточных автотрансформаторов. Нагрузка прилегающего к подстанции автотрансформатора на одном пути зависит от нагрузки в районе прилегающего к подстанции автотрансформатора на втором пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марквардт Г. Г., Чернов Ю. А. Расчет токораспределения в автотрансформаторной системе питания электрифицированных железных дорог // Электричество. — 1981. — № 7. — С. 73–75.
2. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
3. Чернов Ю. А. Моделирование трехпроводной системы электроснабжения // Мир транспорта. — 2012. — № 4. — С. 10–15.

ELECTRIC CURRENT DISTRIBUTION IN AUTOTRANSFORMER SYSTEM

Chernov, Yuri A. – D. Sc. (Tech), professor of the department of electric power supply of electrical railways of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The article exposes a method of calculation of current distribution within autotransformer system of power supply of single and double track railways with voltage between wire network and rails that differs from the voltage between feeding wire and rails. The presented equations result in simplified formulae that allow calculating the load

on transformer's units. The calculations based on formulae show that compensating current doesn't influence the load of transitional autotransformers. The load on the autotransformer which neighbors substation on one track depends on the load on the autotransformer which neighbors the substation on the second track.

Key words: railway, power supply system, autotransformer, current distribution, traction network.

REFERENCES

1. Markvardt G. G., Chernov Yu. A. Calculation of current distribution in autotransformer system of power supply of electrified railways [Расчет токораспределения в автотрансформаторной системе питания электрифицированных железных дорог]. *Elektrichestvo*, 1981, № 7, pp. 73–75.
2. Markvardt K. G. Electric power supply of electrified railways [Электроснабжение электрифицированных железных дорог]. Moscow, Transport publ., 1982, 528 p.
3. Chernov Yu. A. Models of Three-Wire Power Supply System [Моделирование трехпроводной системы электроснабжения]. *Mir transporta* [World of transport and Transportation] *Journal*, 2012, Vol. 42, Iss. 4, pp. 10–15.

Координаты автора (contact information): Чернов Ю. А. (Chernov Yu. A.) – +7 (495) 684–2277.
Статья поступила в редакцию / article received 16.04.2013
Принята к публикации / article accepted 29.04.2013