

УДК 621.3.064

Л.А. Герман ¹, А.С. Серебряков ², В.Л. Осокин ²

СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОДСТАНЦИИ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ПИТАНИИ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ УСТАНОВКОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

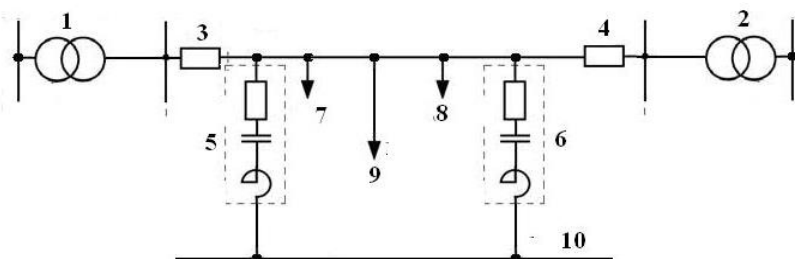
¹ Самарский государственный университет путей сообщения² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет

При необходимости снижения повышенных значений уравнильного тока в тяговой сети применяют раздел по контактной сети с помощью нейтральной вставки у смежной тяговой подстанции. В этом случае одна питающая подстанция осуществляет одностороннее питание контактной сети, в конце которой включена нерегулируемая установка компенсации реактивной мощности (УКРМ). Тогда при снижении тяговой нагрузки повышается напряжение в тяговой сети, а также на шинах конденсаторной установки и отключенной тяговой подстанции. Для решения данной проблемы предложены два инструмента. Во-первых, способ регулирования напряжения на питающей тяговой подстанции путем изменения позиции устройства регулирования напряжения под нагрузкой (УРПН) тягового трансформатора (при одностороннем питании тяговой сети переменного тока с нерегулируемой УКРМ, включенной в конце этого участка. Позиция УРПН определяется на основании расчета напряжения в конце участка. Расчет делается на основании измеренных параметров в начале участка. Во-вторых, алгоритм определения позиции УРПН трансформатора, обеспечивающий нормализацию напряжения на УКРМ для всех режимов работы. Техничко-экономический эффект достигается за счет нормализации напряжения на УКРМ и повышения надежности ее работы.

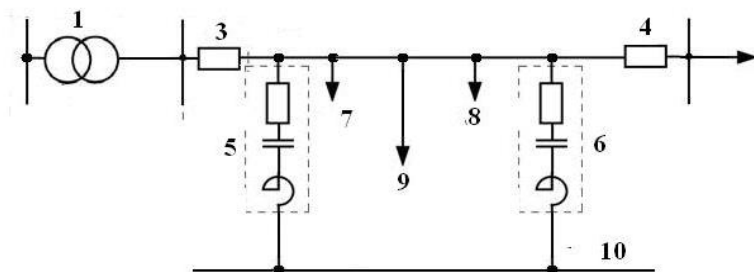
Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, математическое моделирование, MATHCAD, одностороннее питание сети переменного тока, регулирование напряжения трансформатора, тяговая сеть.

1. Введение

В системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта в большинстве случаев применяют двухстороннее питание электрифицированных участков железных дорог с включением на тяговых подстанциях установок поперечной емкостной компенсации – конденсаторных установок (КУ) (рис. 1, а).



а.



б.

Рис. 1. Схема питания электрифицированного участка железной дороги с двухсторонним (а) и односторонним (б) питанием:
 1 и 2 – трансформаторы для питания тяговой сети на первой и второй подстанциях;
 3 и 4 – выключатели питающих линий контактной сети;
 5 и 6 – установки нерегулируемой поперечной емкостной компенсации;
 7 и 8 – реальная распределенная тяговая нагрузка;
 9 – эквивалентная сосредоточенная тяговая нагрузка; 10 – рельс.

В ряде случаев, например, при необходимости снижения повышенных значений уравнивающего тока в тяговой сети [1], применяют раздел по контактной сети с помощью нейтральной вставки у смежной тяговой подстанции, отключая выключатель 4 и оставляя на этой подстанции установку поперечной емкостной компенсации 6. Это значит, что одна питающая подстанция осуществляет одностороннее питание контактной сети, в конце которой включена КУ (рис. 1, б). Основной недостаток такой схемы заключается в том, что при снижении тяговой нагрузки, и в предельном случае при полном ее отсутствии, повышается напряжение в тяговой сети и на шинах КУ отключенной тяговой подстанции.

При мощности КУ 5-7 Мвар напряжение в конце консольного участка повышается на 2-3 кВ, что может привести к повышению напряжения в контактной сети сверх допустимой нормы – 29 кВ. Решение в

этом случае известное – КУ должна быть регулируемой или отключаемой. Однако включение и отключение КУ также связано с возникновением значительных перенапряжений на конденсаторах.

В [2] предложена регулируемая переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ), но ее промышленное производство пока не осуществлено. Статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) на базе статического компенсатора (СТАТКОМ) с управляемыми силовыми транзисторами *IGBT* [2] и [3] имеют высокую стоимость. Стоимость таких установок мощностью в 10 Мвар составляет около 100 млн руб., поэтому массовое внедрение их в ближайшее время вряд ли будет реализовано. В то же время, на отечественных железных дорогах в настоящее время применяются нерегулируемые конденсаторные установки поперечной емкостной компенсации (более 250 установок на сети), стоимость которых на порядок меньше стоимости СГРМ. Поэтому в современных условиях возникает задача обеспечения допустимого режима работы тяговой сети в самом неблагоприятном случае по режиму напряжения при одностороннем питании и с применением существующих нерегулируемых КУ. Отметим, что рассматриваемый способ может быть применен в ряде случаев и для тяговой сети с двухсторонним питанием.

II. Постановка задачи исследования

Установки поперечной емкостной компенсации реактивной мощности представляют собой батарею конденсаторов, последовательно с которой включается реактор (рис. 1). Вывод батареи конденсаторов подключается к шинам тяговой подстанции, а вывод реактора через демпфирующий резистор подключается к рельсу. Колебательный *CL* контур описываемой установки поперечной емкостной компенсации настраивается на частоту наиболее ярко выраженной в тяговой сети третьей гармоники с небольшой расстройкой – 142 Гц. Конденсаторы КУ очень чувствительны к повышению напряжения. Срок службы их при этом резко сокращается, а вероятность выхода из строя увеличивается. Поэтому перенапряжения на конденсаторах недопустимы [4]. С другой стороны, при снижении тяговой нагрузки и наличии КУ напряжение на конденсаторах КУ неизбежно возрастает. В случае регулируемой КУ единственным способом снижения напряжения в тяговой сети и на КУ является регулирование напряжения на выводах питающего тягового трансформатора 1 (рис. 1) с помощью устройства регулирования напряжения под нагрузкой (УРН). Следовательно, при снижении тяговой нагрузки напряжение на шинах питающей подстанции должно снижаться настолько, чтобы напряжение на КУ в конце тяговой сети было бы не выше 29 кВ. При этом напряжение на шинах КУ непосредственно не измеряется, так как расстояние между подстанциями составляет порядка 50 км. Следовательно, значение этого напряжения

необходимо точно вычислить, используя измеренные значения параметров на стороне питающей подстанции.

Цель проведенного исследования – выбрать и обосновать способ регулирования напряжения на тяговой подстанции при одностороннем питании тяговой сети переменного тока с нерегулируемой установкой компенсации реактивной мощности (КУ), включенной в конце этого участка, путем изменения позиции УРПН тягового трансформатора. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи: используя измеренные значения параметров на стороне питающей подстанции, определить напряжение в конце участка тяговой сети с консольным питанием и по его значению определить требуемую позицию УРПН.

III. Математическая модель и принятые допущения

Заменяем распределенную тяговую нагрузку 7 и 8 на рис. 1 одной эквивалентной сосредоточенной нагрузкой 9. Схема замещения такой тяговой сети при одностороннем питании приведена на рис. 2.

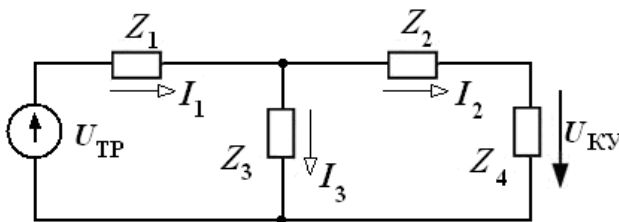


Рис. 2. Схема замещения тяговой сети при одностороннем питании

Здесь резисторы: $Z_1 = R_1 + j \cdot X_1$ и $Z_2 = R_2 + j \cdot X_2$ – эквивалентные сосредоточенные комплексные сопротивления тяговой сети соответственно от питающей подстанции до эквивалентной нагрузки и от эквивалентной нагрузки до КУ; $Z_3 = R_3 + j \cdot X_3$ – комплексное эквивалентное сопротивление сосредоточенной эквивалентной тяговой нагрузки; $Z_4 = -j \cdot X_C$ – комплексное сопротивление КУ с емкостным сопротивлением X_C ; U_{TP} – напряжение на выводах тяговой обмотки питающего трансформатора, снабженного устройством регулирования напряжения под нагрузкой.

Система уравнений для создания математической модели исследуемой сети и нахождения с ее помощью токов в схеме на рис. 2, имеет вид:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (1)$$

$$Z_1 \cdot I_1 + Z_3 \cdot I_3 = U_{TP}; \quad (2)$$

$$(Z_2 + Z_4) \cdot I_2 - Z_3 \cdot I_3 = 0. \quad (3)$$

Все величины в уравнениях (1)-(3) имеют комплексные значения, но ради упрощения, они записаны без подчеркивания. Напряжение в тяговой сети в точке подключения эквивалентной сосредоточенной нагрузки определяется как $U_3 = Z_3 \cdot I_3$, а напряжение на КУ как $U_{КУ} = Z_4 \cdot I_2$.

Необходимо отметить, что с помощью имеющихся измерительных приборов на питающей подстанции можно измерить лишь напряжение $U_{ТР}$ на выводах тягового трансформатора и ток фидера I_1 . Токи I_2 и I_3 не измеряются, они неизвестны. Тем не менее, необходимость и польза создания математической модели по уравнениям (1)-(3) заключается в том, чтобы по ней можно по заданной тяговой нагрузке точно определить ток фидера, ток КУ и напряжение на КУ. После этого можно определить погрешность определения заданных искомым величин по неполным измеренным данным.

На рис. 3 приведено решение системы уравнений (1)-(3) в интегрированном пакете MATHCAD [5]. Исходные данные параметров исследуемой тяговой сети, активные и реактивные сопротивления элементов и напряжение на шинах подстанции, также приведены на рис. 3.

$$\begin{aligned}
 i &:= \sqrt{-1} & U_{ТР} &:= 27500 & Z_1 &:= 2.5 + 7.5i & Z_2 &:= Z_1 \\
 n &:= 3 & \text{n-нагрузочный коэффициент} & & Z_3 &:= (100 + 75 \cdot i) \frac{1}{n} \\
 Z &:= \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ Z_1 & 0 & Z_3 \\ 0 & Z_2 + Z_4 & -Z_3 \end{pmatrix} & U &:= \begin{pmatrix} 0 \\ U_{ТР} \\ 0 \end{pmatrix} & Z_4 &:= -156 \cdot i \\
 I &:= Z^{-1} \cdot U & I &= \begin{pmatrix} 452.782 - 242.155i \\ 21.568 + 164.969i \\ 431.213 - 407.124i \end{pmatrix} & |\vec{I}| &= \begin{pmatrix} 513.469 \\ 166.373 \\ 593.039 \end{pmatrix} \\
 U_3 &:= I_2 \cdot Z_3 = 2.455 \times 10^4 - 2.79i \times 10^3 & |U_3| &= 2.471 \times 10^4 \\
 U_{КУ} &:= I_1 \cdot Z_4 = 2.574 \times 10^4 - 3.365i \times 10^3 & |U_{КУ}| &= 2.595 \times 10^4
 \end{aligned}$$

Рис. 3. Определение параметров сети с односторонним питанием в интегрированном пакете MATHCAD

Нагрузка тяговой сети задается с помощью нагрузочного коэффициента n . Значение коэффициента n зависит от количества составов, их массы и скорости движения. В результате расчета напряжение на КУ получилось равным 25,95 кВ, а напряжение на эквивалентной нагрузке – 24,71 кВ.

На первой подстанции с тяговым трансформатором 1 с помощью штатных измерительных приборов измеряются мгновенные значения тока i и напряжения U_{TP} и вычисляется измеренная активная P_1 и измеренная реактивная Q_1 мощности тяговой обмотки, а также действующее значение напряжения U_{TP} . Далее специальный многофункциональный расчетный блок рассчитывает напряжение на шинах КУ по выражению [6]:

$$U_{KY} = U_{TP} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{TP}} + \frac{(Q_{KY} \cdot X_2)}{U_{KY}}. \quad (4)$$

Третье слагаемое $Q_{KY.HOM} X_{TC.K} / U_{KY}$ в формуле (4) показывает потерю напряжения со знаком «-» от действия КУ на левой половине всей зоны, то есть, за счет третьего слагаемого, напряжение на КУ повышается. Следует обратить внимание на учет потерь напряжения за счет третьего слагаемого только на второй половине участка, так как на первой половине расчет потерь напряжения выполнен уже с учетом КУ.

В формуле (4) значения U_{KY} и Q_{KY} неизвестны. В первом приближении можно подставить их номинальные значения $Q_{KY.HOM} = 4 \cdot 10^6$ Мвар и $U_{TP} = 27,5$ кВ и рассчитать напряжение U_{KY} :

$$\begin{aligned} U_{KY} &= U_{TP} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{TP}} + \frac{(Q_{KY.HOM} \cdot X_2)}{U_{TP}} = \\ &= U_{TP} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1 + Q_{KY.HOM} \cdot X_2)}{U_{TP}} = \\ &= 27500 - \frac{(1,245 \cdot 10^7 \cdot 2,5 + 6,659 \cdot 10^6 \cdot 7,5 + 4 \cdot 10^6 \cdot 7,5)}{27500} = \\ &= 25640 \text{ В} = 25,64 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Погрешность вычисления по сравнению с точными расчетами, приведенными на рис. 3, составляет 1,195 %. Эту погрешность можно сократить, если уравнение (4) решать в интегрированном пакете MATCAD итерационным методом с использованием функции `root`, предварительно задав начальное приближение:

$$\begin{aligned}
 &U_{\text{кв}} = 1 \\
 &\text{root} \left(U_{\text{кв}} - U_{\text{тп}} + \frac{P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1}{U_{\text{тп}}} - \frac{Q_{\text{кв.ном}} \cdot X_2}{U_{\text{кв}}}, U_{\text{кв}} \right) = \quad (6) \\
 &= 25720 \text{ В} = 25,72 \text{ кВ}.
 \end{aligned}$$

В этом случае погрешность составляет 0,886 %.

Более точные результаты можно получить, если формулу (4) представить в виде:

$$U_{\text{кв}} = U_{\text{тп}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{тп}}} + \frac{(U_{\text{кв}} \cdot X_2)}{X_c}. \quad (7)$$

Отсюда напряжение на КУ можно выразить, как:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{кв}} &= \frac{U_{\text{тп}} - \frac{(P_1 \cdot R_1 + Q_1 \cdot X_1)}{U_{\text{тп}}}}{1 - \frac{X_2}{X_c} U_{\text{тп}}} = \\
 &= \frac{27500 - \frac{(1,245 \cdot 10^7 \cdot 2,5 + 6,659 \cdot 10^6 \cdot 7,5)}{27500}}{1 - \frac{7,5}{156} \cdot 27500} = \quad (8) \\
 &= 25790 \text{ В} = 25790 \text{ кВ}.
 \end{aligned}$$

Погрешность по формуле (8) получается равной 0,617 %. Именно эту формулу и применяем для расчета напряжения на КУ. Такую же погрешность дает использование в интегрированном пакете MATHCAD стандартной функции Given (рис. 4). Это минимальная методическая погрешность.

$$\begin{aligned}
 &\textbf{Given} \\
 &\textbf{Uku} = \left(\textbf{UT} - \frac{\textbf{P} \cdot \textbf{R1} + \textbf{Q} \cdot \textbf{X1}}{\textbf{UT}} \right) + \frac{\textbf{Uku} \cdot \textbf{X2}}{\textbf{Xc}} \\
 &\textbf{Uku} > 0 \\
 &\textbf{Find}(\textbf{Uku}) = 2.579 \times 10^4
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Использование стандартной функции Given в интегрированном пакете MATHCAD

IV. Результаты исследований

На рис. 5. приведены зависимости напряжения вдоль тяговой сети от тяговой нагрузки. Тяговая нагрузка в процентах от номинальной составляет: 1-100 %, 2-66 %, 3-33 %, 4-16 %, 5-0 %. На рис. 6 приведены зависимости тока I_1 фидера, питающего подстанции, и тока I_2 компенсирующей установки, от тока тяговой нагрузки I_3 .

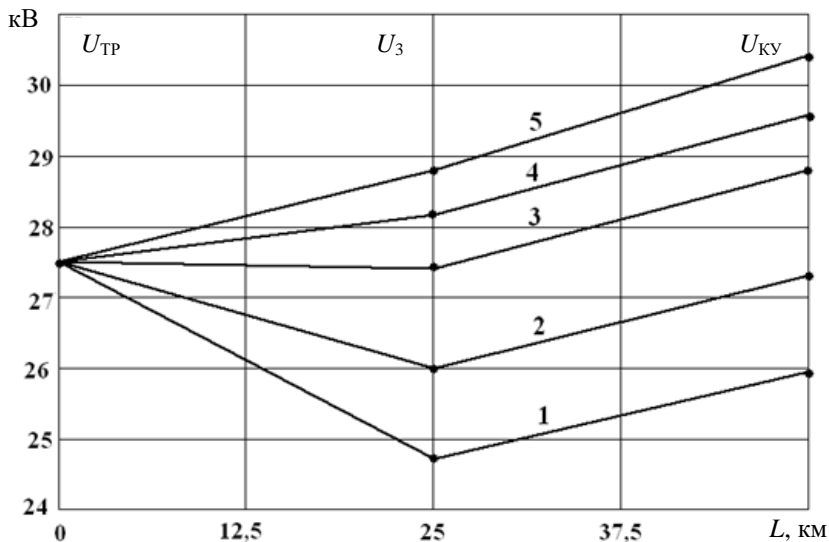


Рис. 5. Зависимости напряжения вдоль тяговой сети от тяговой нагрузки. Тяговая нагрузка составляет: 1 – 100 %, 2 – 66 %, 3 – 33 %, 4 – 16 %, 5 – 0 %

Как видно из рис. 5, напряжение вдоль электрифицированного участка в левой половине может понижаться или повышаться в зависимости от значения тяговой нагрузки. При больших тяговых нагрузках напряжение понижается, а при малых нагрузках, за счет включенной КУ, возрастает. Напряжение вдоль электрифицированного участка в правой половине повышается всегда независимо от значения тяговой нагрузки и может значительно превосходить допустимое значение 29 кВ.

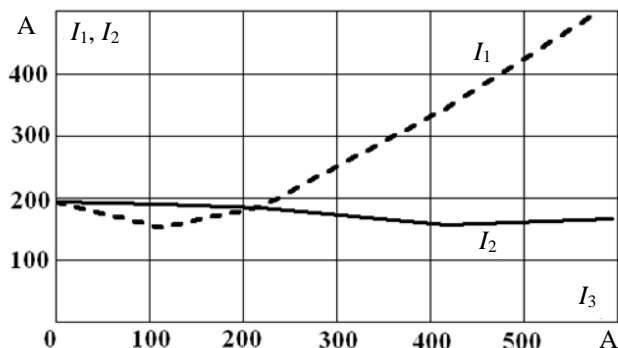


Рис. 6. Зависимости тока I_1 фидера и тока I_2 от тока тяговой нагрузки I_3

После определения напряжения на шинах КУ алгоритм регулирования напряжения строим следующим образом. При напряжении на шинах КУ более 29 кВ с помощью УРПН понижаем напряжение на трансформаторе так, чтобы напряжение на шинах КУ было 28-29 кВ.

Далее, при напряжении на шинах КУ 27-28 кВ, с помощью УРПН стабилизируем напряжение $U_{тр}$ на уровне 25-26 кВ. Если напряжение на шинах КУ установится 27 кВ и ниже, то напряжение на трансформаторе $U_{тр}$ стабилизируем на уровне 27-28 кВ.

Технико-экономический эффект связан с решением задачи осуществления одностороннего (консольного) питания контактной сети с включением нерегулируемой установки компенсации реактивной мощности в конце консольного участка. При этом регулирование мощности установки компенсации осуществлено с помощью УРПН трансформатора питающей подстанции.

V. Заключение

Предложен способ регулирования напряжения на подстанции при одностороннем питании сети переменного тока с нерегулируемой установкой компенсации реактивной мощности в конце консольного участка. Напряжение на шинах КУ с необходимой точностью рассчитывается по измеренным данным на выходе питающей подстанции. Предложен алгоритм определения позиции УРПН трансформатора, обеспечивающий нормализацию напряжения на КУ для всех режимов работы.

Технико-экономический эффект определяется тем, что за счет нормализации напряжения на КУ повышается надежность ее работы.

© Герман Л.А., 2019

© Серебряков А.С., 2019

© Осокин В.Л., 2019

Библиографический список

- [1] Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2018. № 77 (5). С. 288-294.
- [2] Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог. Княгинино: НГИЭУ, 2017. – 402 с.
- [3] Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Мизинцев А.В., Якунин Д.В. Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с биполярным тиристорным ключом // Электроника и Электрооборудование Транспорта. 2014. № 4. С. 24-29.
- [4] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: ГОУ «УМЦ», 2009. – 604 с.
- [5] Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [6] Серебряков А.С., Шумейко В.В. MATHCAD и решение задач электротехники. М.: Маршрут, 2005. – 240 с.

L.A. German ¹, A.S. Serebryakov ², V.L. Osokin ²

**METHOD FOR REGULATING VOLTAGE
AT SUBSTATION WITH SINGLE-SIDED POWER SUPPLY
OF AC NETWORK WITH UNREGULATED
POWER FACTOR CORRECTION DEVICE**

¹ The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics
Knyaginino, Russia

Abstract. The section on the contact network using a neutral insert at an adjacent traction substation is used to reduce the increased values of the equalizing current in the traction network. In this case, one power substation provides single-sided power to the contact network, at the end of which an unregulated power factor correction devices (PFC D) is turned on. When the traction load is reduced, the voltage in the traction network increases, as well as on the tires of the capacitor unit and the disconnected traction substation. A method of regulating the voltage at the supply traction substation with single-ended power supply of the traction AC network with unregulated PFC D included at the end of this section by changing the position of the on-load tap changer (OLTC) of the traction transformer is proposed. The required position of the OLTC is determined based on the calculation of the voltage at the end of the section. The calculation is based on the measured parameters at the beginning of the section. An algorithm for determining the position of the transformer OLTC, providing voltage normalization at PFC D for all oper-

ating modes, is proposed. The technical and economic effect is achieved by normalizing the voltage at PFCD and increasing the reliability of its operation.

Keywords: mathematical modeling, MATHCAD, on-load tap changer, power factor correction, reactive power compensation, single-ended AC power supply, traction network, transformer voltage regulation.

References

- [1] L.A. German, «Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network», *Vestnik of the Railway Research Institute*, vol. 77, no. 5, pp. 288-294, May 2018.
- [2] L.A. German, A.S. Serebryakov and D.E. Dulepov, *Fil'trokompensiruyushchiye usta-novki v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog. Monografiya (Filter-compensating installations in the traction power supply systems of railways)*. Knyaginino: NGIEU, 2017 (in Russian).
- [3] L.A. German, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko, A.V. Mizincev and D.V. Yakunin, «Adjustable installation of a cross capacitance compensation in traction network with bipolar thyristor key», *Electronics and electrical equipment of transport*, vol. 4, pp. 24-29, 2014 (in Russian).
- [4] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita (Relay protection)*, part 2. Moscow: GOU «UMTS», 2009 (in Russian).
- [5] R.I. Karaev, S.D. Volobrinский and I.N. Kovalev, *Elektricheskiye seti i energosistemy (Electric networks and power systems)*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [6] A.S. Serebryakov and V.V. Shumeyko, *MATHCAD i resheniye zadach elektrotehniki (MATHCAD and the solution of problems of electrical engineering)*. Moscow: Marshrut, 2005 (in Russian).