

6. Патент на полезную модель RU 117772. Машина для плющения стеблей скошенных трав: 21.12.2011 / Кокунова И. В., Стречень М. В., Смирнов Р. Н. – Текст: непосредственный.

7. Шкляр, М. Ф. Основы научных исследований / М. Ф. Шкляр. – Москва: ИТК «Дашков и К», 2017. – 208 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Popov, V.D. Sposoby i tekhnologicheskie protsessy zagotovki vysokokachestvennogo sena v usloviyakh povyshennogo uvlazhneniya / V.D. Popov, A.N. Perekopskiy, M.Sh. Akhmetov, A.V. Terentev. – Sankt-Peterburg: GNU SZNIIMESKh Rosselkhozakademii, 2012. – 72 s.

2. Kokunova, I.V. Osobennosti zagotovki vysokokachestvennykh travyanykh kormov v prirodno-klimaticheskikh usloviyakh Severo-Zapada Rossii / I.V. Kokunova, M.V. Strechen, V.A. Ruzhev // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – No. 36. – S. 230-236.

3. Kokunova, I.V. Vliyaniye klimaticheskikh riskov na protsess proizvodstva rastitelnykh

kormov v regione Pskovsko-Chudskogo ozera / I.V. Kokunova, V.V. Morozov, M.V. Strechen, O.S. Titenkova // Sbornik materialov KhVII Mezhdunarodnogo ekologicheskogo foruma «Den Baltiyskogo morya». – Sankt-Peterburg: ООО «Svoe izdatelstvo», 2016. – S. 29-30.

4. Kokunova I.V., Titenkova O.S. (2016). Foraggio di qualita - la base della produzione di prodotti animali ecologicamente puliti. *Italian Science Review*. 1 (34): 35-37.

5. Strechen, M.V. Raschet parametrov pritsepnoy mashiny dlya plyushcheniya rastitelnoy massy / M.V. Strechen, Yu.I. Voloshin, I.V. Kokunova, V.G. Ignatenkov // Tekhnika v selskom khozyaystve. – 2013. – No. 2. – S. 7-8.

6. Патент на полезную модель RU 117772. Машина для плющения стеблей скошенных трав: 21.12.2011 / Кокунова И. В., Стречень М. В., Смирнов Р. Н.

7. Шкляр, М. Ф. Основы научных исследований / М. Ф. Шкляр. – Москва: ИТК «Дашков и К», 2017. – 208 с.



УДК 621.3.064

**А.С. Серебряков, В.Л. Осокин, С.А. Капусткин**  
A.S. Serebryakov, V.L. Osokin, S.A. Kapustkin

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА РАЗНЫХ СТУПЕНЯХ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

### ENERGY SAVING AT DIFFERENT LEVELS OF VOLTAGE AT COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN DISTRIBUTION NETWORKS

**Ключевые слова:** емкостная компенсация реактивной мощности, система внешнего электропитания, распределительные сети, энергосбережение, фильтрокомпенсирующие установки, активная мощность, напряжение, сопротивление.

**Keywords:** capacitive compensation of reactive power, external power supply system, distribution networks, energy saving, filter compensating installations, active power, voltage, resistance.

Рассмотрено применение установок поперечной емкостной компенсации реактивной мощности для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях с распределенной переменной нагрузкой. Показано, что снижение потерь электроэнергии в электрических сетях с распределенной переменной нагрузкой зависит от выбора места расположения установок емкостной компенсации. При компенсации реактивной мощности в распределительных сетях чаще всего больший эффект снижения потерь активной мощности наблюдается в системе внешнего электроснабжения, меньший – в распределительных сетях. Наглядно показаны соотношения, которые следует учитывать при разработке стратегии развития электроэнергетических сетей и систем. В качестве примера рассмотрена схема замещения распределительной сети с двухсторонним питанием и с установкой компенсации реактивной мощности в эквивалентном центре распределенных нагрузок, которые используются в системах тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе с напряжением 25 кВ. Приведено решение в интегрированном пакете MATHCAD системы уравнений для определения энергосбережения в рассматриваемой системе. По результатам исследования сделаны выводы об эффективности применения установок компенсации реактивной мощности для снижения потерь электроэнергии в

электрических сетях с распределенной переменной нагрузкой.

The application of transverse capacitive reactive power compensation systems for reducing power losses in electric networks with distributed variable load is studied. It is shown that the reduction of electricity losses in electric networks with distributed variable load depends on the choice of location of capacitive compensation units. When reactive power is compensated in distribution networks, most often the greater effect of reducing active power losses is observed in the external power supply system, and less - in distribution networks. The relationships that should be taken into account when developing a strategy for the development of electric power networks and systems are clearly shown. As an example, we consider the equivalent circuit of a distribution network with two-way power supply and with the installation of reactive power compensation in the equivalent center of distributed loads which are used in traction power supply systems of railways, electrified with alternating current with a voltage of 25 kV. A solution is given in the integrated MATHCAD package of the system of equations for determining energy conservation in the system under consideration. Based on the results of the study, conclusions are drawn about the effectiveness of the use of reactive power compensation plants to reduce electricity losses in electric networks with distributed variable load.

**Серебряков Александр Сергеевич**, д.т.н., проф., Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Тел.: (83166) 4-15-50. E-mail: a.sereb@mail.ru.

**Осокин Владимир Леонидович**, к.т.н., доцент, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Тел.: (83166) 4-15-50. E-mail: osokinvl@mail.ru.

**Капусткин Сергей Александрович**, аспирант, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Тел.: (83166) 4-15-50. E-mail: sk-89@mail.ru.

**Serebryakov Aleksandr Sergeyeovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. Ph.: (83166) 4-15-50. E-mail: a.sereb@mail.ru.

**Osokin Vladimir Leonidovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. Ph.: (83166) 4-15-50. E-mail: osokinvl@mail.ru.

**Kapustkin Sergey Aleksandrovich**, post-graduate student, Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. Ph.: (83166) 4-15-50. E-mail: sk-89@mail.ru.

## Введение.

### Постановка задачи исследования

Установки компенсации реактивной мощности (КУ) являются одним из важнейших и эффективных средств энергосбережения в электрических сетях [1, 2]. Одновременно с повышением качества электроэнергии за счет компенсации высших гармонических составляющих и нормализации режима напряжения в сети они снижают потери ак-

тивной мощности и электроэнергии [3-5]. Однако снижение потерь электроэнергии в электрических сетях с распределенной переменной нагрузкой зависит от выбора места расположения установок компенсации. При компенсации реактивной мощности в распределительных сетях чаще всего больший эффект снижения потерь активной мощности наблюдается в системе внешнего электроснабжения, меньший – в распреде-

лительных сетях [6-9]. Цель статьи – наглядно показать эти соотношения, чтобы учитывать их при разработке стратегии развития электроэнергетических сетей и систем.

### Материалы и методы.

#### Принятые допущения

Схема замещения распределительной сети с двухсторонним питанием и с установкой емкостной компенсации реактивной мощности (КУ) в эквивалентном центре распределенных нагрузок приведена на рисунке 1. Такие схемы используют в системах тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе с напряжением 25 кВ. В указанных системах установки емкостной компенсации реактивной мощности устанавливают на посту секционирования, как правило, в середине межподстанционной зоны. Возможны случаи такой конфигурации также и в трехфазных распределительных сетях напряжением 6-10 и 35 кВ. В этом случае на схеме изображается одна фаза трехфазной сети.

На рисунке 1 введены следующие обозначения:  $\underline{ZZ}$  – сумма приведенного к напряжению распределительной сети сопротивления  $\underline{ZC}$  системы внешнего электроснабжения (СВЭ) и сопротивления короткого замыкания  $\underline{ZT}$  тягового трансформатора Т1 (или Т2), т.е.:  $\underline{ZZ} = \underline{ZC} + \underline{ZT}$ ,  $\underline{Z1}$ ,  $\underline{Z2}$  – сопротивления эквивалентных сосредоточенных нагрузок – электровозов,  $\underline{Z3}$  – сопротивление КУ, включающей в себя батарею конденсаторов и реактор,  $\underline{z}$  – сопротивления отдельных участков распределительной (тяговой) сети, Т1, Т2 – питающие трансформаторы 110/27,5 кВ,  $\underline{U}_{T1}$  и  $\underline{U}_{T2}$  – напряжения на шинах первой и второй тяговых подстанций, В – выключатель КУ.

При анализе процессов в схеме на рисунке 1 для наглядности и упрощения расчетов приняты следующие допущения. Будем счи-

тать, что нагрузка, распределенная равномерно вдоль межподстанционной зоны, заменена двумя одинаковыми эквивалентными сосредоточенными нагрузками  $\underline{Z1} = \underline{Z2}$ , расположенными в середине каждой межподстанционной полузоны. Это значит, что схема симметрична относительно центра межподстанционной зоны. Сопротивление  $\underline{ZC}$  системы внешнего электроснабжения приведено к ступени распределительной сети 25 кВ. Сопротивление короткого замыкания тягового трансформатора  $\underline{ZT}$  (на схеме замещения (рис. 1) не показано) включено последовательно с сопротивлением  $\underline{ZC}$  (на схеме замещения (рис. 1) тоже не показано). Суммарное сопротивление  $\underline{ZZ} = \underline{ZC} + \underline{ZT}$  включено последовательно с сопротивлением  $\underline{z}$  одной четвертой межподстанционной зоны. Принято, что  $\underline{ZC} = 0,5z$ . Установка емкостной компенсации реактивной мощности КУ включена на посту секционирования в центре межподстанционной зоны. Трансформаторы Т1 и Т2 соединены по схеме Y/D-11 и преобразуют трехфазное напряжение в однофазное. Теоретическое обоснование преобразования трехфазного источника питания в однофазный для этого случая приведено в [10].

#### Математическая модель

Для представленной на рисунке 1 схемы замещения составим по первому и второму законам Кирхгофа следующую систему алгебраических уравнений:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_3 - \underline{I}_5 = 0, \quad (1)$$

$$\underline{I}_3 + \underline{I}_4 - \underline{I}_7 = 0, \quad (2)$$

$$\underline{I}_2 - \underline{I}_4 - \underline{I}_6 = 0, \quad (3)$$

$$(\underline{ZZ} + \underline{z})\underline{I}_1 + \underline{Z1} * \underline{I}_5 = \underline{U}_{T1}, \quad (4)$$

$$(\underline{ZZ} + \underline{z})\underline{I}_2 + \underline{Z2} * \underline{I}_6 = \underline{U}_{T2}, \quad (5)$$

$$\underline{z} * \underline{I}_3 + \underline{Z3} * \underline{I}_7 - \underline{Z1} * \underline{I}_5 = 0, \quad (6)$$

$$\underline{z} * \underline{I}_4 + \underline{Z3} * \underline{I}_7 - \underline{Z2} * \underline{I}_6 = 0. \quad (7)$$

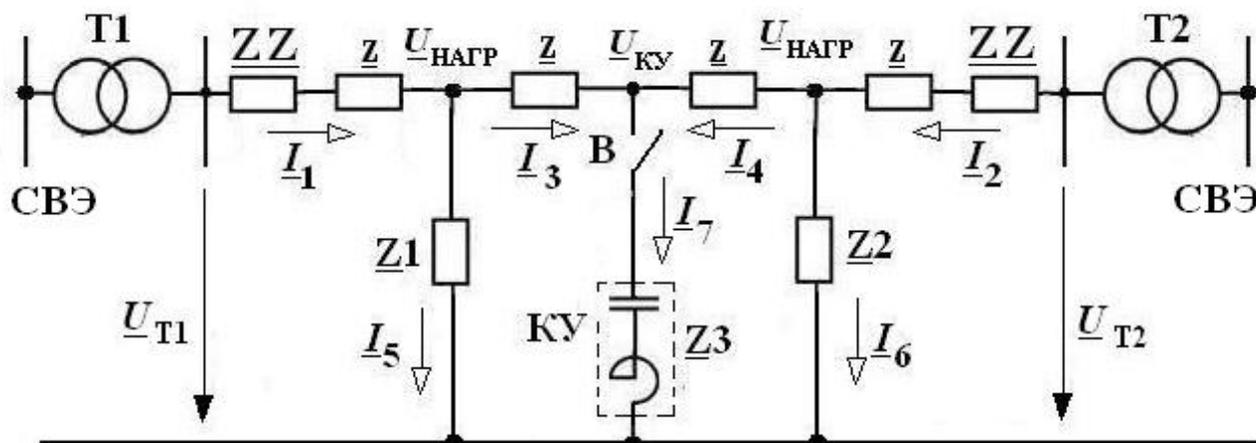


Рис. 1. Схема замещения тяговой сети с двухсторонним питанием и установкой емкостной компенсации реактивной мощности (КУ)

Эта система уравнений в матричной форме запишется так:

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 \underline{ZZ} + \underline{z} & 0 & 0 & 0 & \underline{Z1} & 0 & 0 \\
 0 & \underline{ZZ} + \underline{z} & 0 & 0 & 0 & \underline{Z2} & 0 \\
 0 & 0 & \underline{z} & 0 & -\underline{Z1} & 0 & \underline{Z3} \\
 0 & 0 & 0 & \underline{z} & 0 & -\underline{Z2} & \underline{Z3}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_1 \\
 \underline{I}_2 \\
 \underline{I}_3 \\
 \underline{I}_4 \\
 \underline{I}_5 \\
 \underline{I}_6 \\
 \underline{I}_7
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \underline{U}_{T1} \\
 \underline{U}_{T2} \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (8)$$

На рисунке 2 приведена программа расчета системы уравнений (8) в интегрированном пакете MATHCAD [11]. Программа определяет токи и потери мощности в схеме замещения с выключенной КУ. Обратим внимание на то, что в программе, показанной на рисунке 2, индексы у комплексных токов начинаются, как это принято в пакете MATHCAD, не с 1, а с 0. Поэтому на рисунке 2 индексы токов меньше индексов в формулах (1)-(8) на единицу, т.е. току  $\underline{I}_1$  соответствует ток  $\underline{I}_0$ , току  $\underline{I}_2$  – ток  $\underline{I}_1$  и т.д.

Ради упрощения комплексные величины в пакете MATHCAD записаны без подчеркивания. Выключение КУ моделируется включением вместо сопротивления КУ емкостного сопротивления, равного по модулю  $Z3=10^{10}$  Ом, т.е. практически равного бесконечности.

На рисунке 3 приведено распределение токов в схеме замещения с выключенной КУ, полученное в результате решения системы уравнений (8) в интегрированном пакете MATHCAD. Напомним, что обозначениям токов  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_7$  на рисунках 1, 3 и 5 соответ-

ствуют компьютерные токи  $I_0, I_1 \dots I_6$ . Положение главного контроллера электровоза в программе, приведенной на рисунке 2, учи-

тывается с помощью коэффициента  $n=2,045$ .

**КУ ВЫКЛЮЧЕНА**

$$\begin{aligned}
 & \text{UT1} := 27500 \quad \text{UT2} := \text{UT1} \quad \mathbf{j} := \sqrt{-1} \quad \mathbf{r} := 1.25 \quad \mathbf{x} := 3.75 \\
 & \mathbf{z} := (\mathbf{r} + \mathbf{x} \cdot \mathbf{j}) = 1.25 + 3.75\mathbf{i} \quad \mathbf{n} := 2.045 \quad \mathbf{Z1} := (84 + 72 \cdot \mathbf{j}) \cdot \frac{1}{\mathbf{n}} \\
 & \mathbf{Z2} := \mathbf{Z1} \quad \mathbf{Z3} := -10^{10} \mathbf{j} \quad \mathbf{ZC} := 0.5\mathbf{z} \quad \mathbf{ZT} := 0.4 + 4\mathbf{j} \quad \mathbf{ZZ} := \mathbf{ZC} + \mathbf{ZT} \\
 & \mathbf{Z} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ \mathbf{ZZ} + \mathbf{z} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Z1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{ZZ} + \mathbf{z} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Z2} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{z} & 0 & -\mathbf{Z1} & 0 & \mathbf{Z3} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{z} & 0 & -\mathbf{Z2} & \mathbf{Z3} \end{pmatrix} \quad \mathbf{U} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{UT1} \\ \text{UT2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 & \mathbf{I} := \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} 306.522 - 317.001\mathbf{i} \\ 306.522 - 317.001\mathbf{i} \\ 1.115 \times 10^{-7} + 1.188\mathbf{i} \times 10^{-6} \\ 1.115 \times 10^{-7} + 1.188\mathbf{i} \times 10^{-6} \\ 306.522 - 317.001\mathbf{i} \\ 306.522 - 317.001\mathbf{i} \\ 2.229 \times 10^{-7} + 2.375\mathbf{i} \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad \vec{|\mathbf{I}|} = \begin{pmatrix} 440.959 \\ 440.959 \\ 1.193 \times 10^{-6} \\ 1.193 \times 10^{-6} \\ 440.959 \\ 440.959 \\ 2.386 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \\
 & \mathbf{U}_{\text{НАГР}} := \mathbf{I}_4 \cdot \mathbf{Z1} = 2.375 \times 10^4 - 2.229\mathbf{i} \times 10^3 \quad |\mathbf{U}_{\text{НАГР}}| = 2.386 \times 10^4 \\
 & \mathbf{U}_{\text{КУ}} := \mathbf{I}_6 \cdot \mathbf{Z3} = 2.375 \times 10^4 - 2.229\mathbf{i} \times 10^3 \quad |\mathbf{U}_{\text{КУ}}| = 2.386 \times 10^4 \\
 & \mathbf{S1} := \text{UT1} \cdot \overline{\mathbf{I}_0} = 8.429 \times 10^6 + 8.718\mathbf{i} \times 10^6 \\
 & \mathbf{S}_{\text{НАГР}} := (\mathbf{Z1} \cdot \mathbf{I}_4) \cdot (\overline{\mathbf{I}_4}) = 7.987 \times 10^6 + 6.846\mathbf{i} \times 10^6 \\
 & \text{Re}(\mathbf{S1}) - \text{Re}(\mathbf{S}_{\text{НАГР}}) = 4.424 \times 10^5 \\
 & \Delta P_{\text{TC}} := [ (|\mathbf{I}_0|)^2 \mathbf{r} + (|\mathbf{I}_2|)^2 \mathbf{r} ] = 2.431 \times 10^5 \quad \Delta P_{\text{T}} := (|\mathbf{I}_0|)^2 \cdot 0.4 = 7.778 \times 10^4 \\
 & \Delta P_{\text{ВЭС}} := (|\mathbf{I}_0|)^2 \cdot \text{Re}(\mathbf{ZC}) = 1.215 \times 10^5 \quad \Delta P_{\text{ТСТ}} := \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{T}} = 3.208 \times 10^5 \\
 & \Delta P := \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{ВЭС}} + \Delta P_{\text{T}} = 4.424 \times 10^5 \\
 & \text{KPD} := \frac{\text{Re}(\mathbf{S}_{\text{НАГР}}) \cdot 100}{\text{Re}(\mathbf{S1})} = 94.752 \quad \text{KPDTC} := \frac{\text{Re}(\mathbf{S}_{\text{НАГР}}) \cdot 100}{\text{Re}(\mathbf{S}_{\text{НАГР}}) + \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{T}}} = 96.138
 \end{aligned}$$

*Рис. 2. Программа расчета токов и потерь мощности в схеме замещения с выключенной КУ*

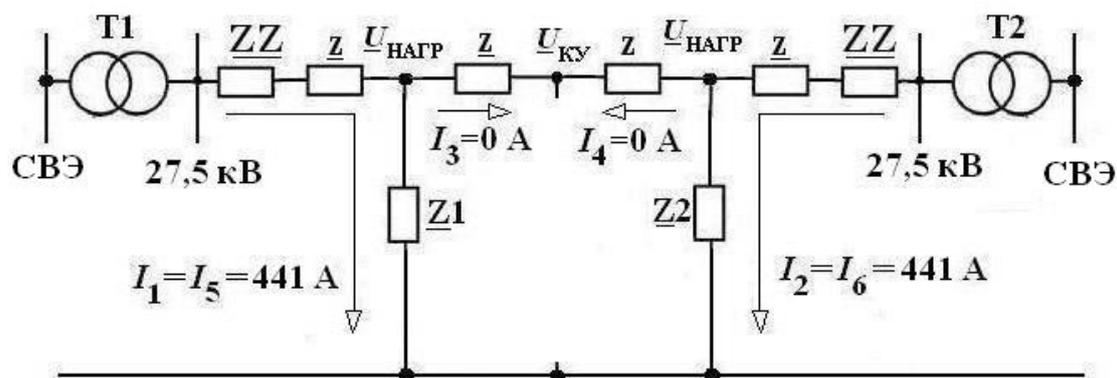


Рис. 3. Распределение токов в схеме замещения с выключенной КУ

Активная мощность тяговой нагрузки, которая определяется массой состава, его скоростью движения и сопротивлением движению, составляет  $7,987 \approx 8$  МВт. Напряжение на нагрузке составляет 23,86 кВ. Потери активной мощности в тяговой сети с учетом потерь в тяговом трансформаторе составляют 320,8 кВт, а общие потери с учетом потерь в системе внешнего электроснабжения – 442,4 кВт.

На рисунке 4 приведена программа расчета системы уравнений (8) в интегрированном пакете MATHCAD в схеме замещения с включенной КУ.

Включение КУ моделируется включением ее реактивного сопротивления, равно  $Z3 = -49j$  Ом. На рисунке 5 приведено распределение токов в схеме замещения с включенной КУ, полученное в результате решения системы уравнений (8).

Напряжение на нагрузке с включенной КУ существенно повысилось и составляет 26,97 кВ. Несмотря на повышение напряжения в тяговой сети, активная мощность тяговой нагрузки, которая определяется массой состава, его скоростью движения и сопротивлением движению, по-прежнему составляет  $7,986 \approx 8$  МВт, так как масса поезда, скорость движения и сопротивление движению остались прежними.

Активная мощность при повышенном напряжении осталась прежней не сама по себе, а за счет изменения позиции главного контроллера электровоза. Напомним, что изменение позиции электровоза учитывается с помощью коэффициента  $n$ . При включении КУ позиция контроллера была изменена, коэффициент  $n$  стал равным 1,6. Напряжение на токоприемнике электровоза увеличилось, ток электровоза уменьшился, активная мощность осталась прежней.

Потери активной мощности в тяговой сети с учетом тягового трансформатора составляют 252,5 кВт, а общие потери с учетом потерь в системе внешнего электроснабжения – 309,3 кВт.

На рисунке 5 показано распределение токов в схеме замещения с включенной КУ. Направления токов показаны с учетом направлений, отображенных на рисунке 1 и принятых за положительные направления.

### Результаты исследования

При выключенной КУ (рис. 1) напряжение в тяговой сети становится равным 23,86 кВ (рис. 2). Как видно из рисунка 2, активная и реактивная мощность, развиваемая системой внешнего электроснабжения (СВЭ) при питании первой подстанции с трансформатором Т1, составляет:

$$P_{ВЭС} = \text{Re}(S1) = 8,429 \text{ МВт},$$

$$Q_{ВЭС} = \text{Im}(S1) = 8,718 \text{ Мвар}.$$

КУ ВКЛЮЧЕНА

$$\begin{aligned}
 &UT1 := 27500 \quad UT2 := UT1 \quad j := \sqrt{-1} \quad r := 1.25 \quad x := 3.75 \\
 &z := (r + x \cdot j) = 1.25 + 3.75i \quad n := 1.6 \quad Z1 := (84 + 72 \cdot j) \cdot \frac{1}{n} \\
 &Z2 := Z1 \quad Z3 := -49j \quad ZC := 0.5z \quad ZT := 0.4 + 4j \quad ZZ := ZC + ZT \\
 &Z := \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ ZZ + z & 0 & 0 & 0 & Z1 & 0 & 0 \\ 0 & ZZ + z & 0 & 0 & 0 & Z2 & 0 \\ 0 & 0 & z & 0 & -Z1 & 0 & Z3 \\ 0 & 0 & 0 & z & 0 & -Z2 & Z3 \end{pmatrix} \quad U := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ UT1 \\ UT2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &I := Z^{-1} \cdot U \\
 &I = \begin{pmatrix} 301.649 - 0.205i \\ 301.649 - 0.205i \\ 34.567 + 284.017i \\ 34.567 + 284.017i \\ 267.082 - 284.221i \\ 267.082 - 284.221i \\ 69.134 + 568.033i \end{pmatrix} \quad \vec{|I|} = \begin{pmatrix} 301.649 \\ 301.649 \\ 286.112 \\ 286.112 \\ 390.019 \\ 390.019 \\ 572.225 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$U_{\text{НАГР}} := I_4 \cdot Z1 = 2.681 \times 10^4 - 2.903i \times 10^3 \quad |U_{\text{НАГР}}| = 2.697 \times 10^4$$

$$U_{\text{КУ}} := I_6 \cdot Z3 = 2.783 \times 10^4 - 3.388i \times 10^3 \quad |U_{\text{КУ}}| = 2.804 \times 10^4$$

$$S1 := UT1 \cdot \bar{I}_0 = 8.295 \times 10^6 + 5.626i \times 10^3$$

$$S_{\text{НАГР}} := (Z1 \cdot I_4) \cdot (\bar{I}_4) = 7.986 \times 10^6 + 6.845i \times 10^6$$

$$\text{Re}(S1) - \text{Re}(S_{\text{НАГР}}) = 3.093 \times 10^5$$

$$\Delta P_{\text{TC}} := [ (|I_0|)^2 r + (|I_2|)^2 r ] = 2.161 \times 10^5 \quad \Delta P_{\text{T}} := (|I_0|)^2 \cdot 0.4 = 3.64 \times 10^4$$

$$\Delta P_{\text{БЭС}} := (|I_0|)^2 \cdot \text{Re}(ZC) = 5.687 \times 10^4 \quad \Delta P_{\text{ТСТ}} := \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{T}} = 2.525 \times 10^5$$

$$\Delta P := \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{БЭС}} + \Delta P_{\text{T}} = 3.093 \times 10^5$$

$$KPD := \frac{\text{Re}(S_{\text{НАГР}}) \cdot 100}{\text{Re}(S1)} = 96.271 \quad KPD_{\text{TC}} := \frac{\text{Re}(S_{\text{НАГР}}) \cdot 100}{\text{Re}(S_{\text{НАГР}}) + \Delta P_{\text{TC}} + \Delta P_{\text{T}}} = 96.936$$

Рис. 4. Программа расчета токов и потерь мощности в схеме замещения с включенной КУ

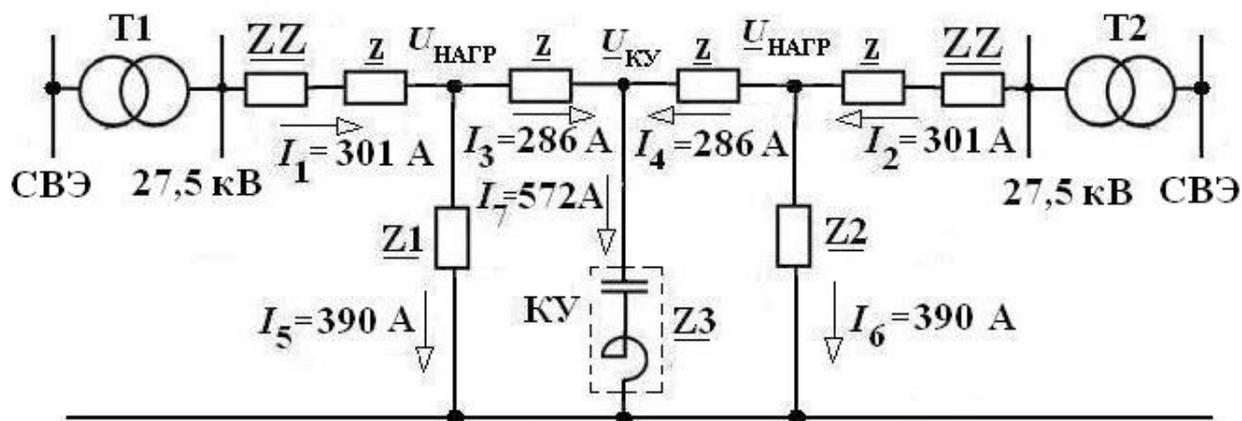


Рис. 5. Распределение токов в схеме замещения с включенной КУ

Мощность первого приемника электрической энергии с сопротивлением  $Z1$  составляет:

$$P_{НАГР} = Re(S_{НАГР}) = 7,987 \approx 8 \text{ МВт},$$

$$Q_{НАГР} = Im(S_{НАГР}) = 6,846 \text{ Мвар}.$$

Потери активной мощности в первой линии СВЭ и в левой половине распределительной сети, т.е. суммарные потери на высшей и низшей ступенях напряжения, составят:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{СВЭ} - P_{НАГР} = 8,429 - 7,987 = \\ &= 0,442 \text{ МВт} = 442 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Отдельно потери для левой половины схемы: в тяговой сети  $\Delta P_{ТС} = 243,1 \text{ кВт}$ , в тяговом трансформаторе  $\Delta P_T = 77,78 \text{ кВт}$ , в системе внешнего электроснабжения  $\Delta P_{ВЭС} = 121,5 \text{ кВт}$ . Коэффициент полезного действия тяговой сети составляет 96,138%.

В режиме полной компенсации реактивной мощности (рис. 4) напряжение в тяговой сети повышается и становится равным 26,97 кВ. Чтобы сохранить прежнюю мощность в нагрузке, позиция главного контроллера изменяется и коэффициент  $n$  становится равным 1,6. Активный ток в нагрузке естественно, уменьшается. Практически становится равным нулю реактивная со-

ставляющая тока. Уменьшаются и потери активной мощности.

Как видно из рисунка 4, активная и реактивная мощность, развиваемая системой внешнего электроснабжения (СВЭ), при питании первой подстанции с трансформатором Т1 составляет:

$$P_{ВЭС} = Re(S1) = 8,295 \text{ МВт},$$

$$Q_{ВЭС} = Im(S1) = 5,626 \text{ Мвар}.$$

Мощность первого приемника электрической энергии с сопротивлением  $Z1$  составляет:

$$P_{НАГР} = Re(S_{НАГР}) = 7,986 \approx 8 \text{ МВт},$$

$$Q_{НАГР} = Im(S_{НАГР}) = 6,845 \text{ Мвар}.$$

Потери активной мощности в первой линии СВЭ и в левой половине распределительной сети, т.е. суммарные потери на высшей и низшей ступенях напряжения, составят:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{СВЭ} - P_{НАГР} = 8,295 - 7,986 = \\ &= 0,309 \text{ МВт} = 309 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Отдельно потери для левой половины схемы: в тяговой сети  $\Delta P_{ТС} = 216 \text{ кВт}$ , в тяговом трансформаторе  $\Delta P_T = 36,4 \text{ кВт}$ , в системе внешнего электроснабжения  $\Delta P_{ВЭС} = 56,87 \text{ кВт}$ . Коэффициент по-

лезного действия тяговой сети составляет 96,936%.

### Выводы

1. Суммарные потери активной мощности при включении КУ уменьшаются на 133 кВт, или 30% от суммарных потерь до компенсации реактивной мощности.

2. Потери активной мощности в СВЭ при включении КУ уменьшаются на 65 кВт, или 54% от потерь до компенсации реактивной мощности.

3. Потери активной мощности в низшей ступени напряжения (в распределительной сети и тяговом трансформаторе) при включении КУ уменьшаются на 68,3 кВт, или 21% от потерь до компенсации реактивной мощности.

### Заключение

При включении установок компенсации реактивной мощности в распределительных сетях с распределенной нагрузкой наибольший выигрыш в процентном отношении от снижения потерь активной мощности получается в сетях высшего напряжения. Уменьшение потерь на стороне низшего напряжения в процентном отношении оказывается меньше.

Чтобы поддерживать заданную активную мощность тяговой нагрузки, можно использовать КУ с плавным регулированием и с помощью регулятора КУ поддерживать нужное напряжение и требуемую постоянную мощность электровоза. Однако более экономичным вариантом является КУ со ступенчатым регулированием и поддержание требуемой постоянной тяговой мощности с помощью главного контроллера электровоза.

Указанные обстоятельства следует учитывать при составлении инвестиционных

проектов компенсации реактивной мощности в распределительных сетях, особенно когда речь идет о дорогих статических КУ с плавным регулированием емкостной мощности.

### Библиографический список

1. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – Москва: Транспорт, 1983. – 183 с. – Текст: непосредственный.

2. Герман, Л.А. Уменьшение потерь электроэнергии установками поперечной емкостной компенсации в тяговой сети / Л. А. Герман. – Текст: непосредственный // Труды МИИТ. – Москва: Транспорт, 1976. – № 302.

3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение железных дорог: учебник / К. Г. Марквардт. – Москва: Транспорт, 1982. – 528 с. – Текст: непосредственный.

4. Dixon, J., Moran, L., Rodriguez, J., Domke, R. (2006). Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE*. 93 (12). 2144-2164. 10.1109/JPROC.2005.859937.

5. Liu, Y., Rau, S., Wu, C., Lee, W. (2018). Improvement of Power Quality by Using Advanced Reactive Power Compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 54, 18-24.

6. Воротницкий, В. Э. Снижение потерь в электроэнергетике - важнейший путь энергосбережения в электрических сетях / В. Э. Воротницкий. – Текст: непосредственный // Энергосбережение. – 2014. – № 4. – С. 52-56.

7. Ковалев, И. Н. О направлениях исследований в области компенсации реактивных нагрузок / И. Н. Ковалев. – Текст: непосредственный

ственный // Электричество. – 1981. – № 10. – С. 61-64.

8. Ковалев, И. Н. Электроэнергетические системы и сети: учебник / И. Н. Ковалев. – Москва: ФГБУ, 2015. – Текст: непосредственный.

9. Ковалев, И.Н. Энергосберегающая синергетика при компенсации реактивной мощности в энергосистемах на современном этапе / И. Н. Ковалев. – Текст: непосредственный // Энергосбережение. – 2019. – № 6. – С. 10-13.

10. Серебряков, А. С. Теоретическое обоснование основных соотношений для информационного обеспечения интеллектуальных систем управления трансформаторными подстанциями / А. С. Серебряков, В. Л. Осокин. – Текст: непосредственный // Известия СПбЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 8. – С. 59-65.

11. Серебряков, А. С. MATHCAD и решение задач электротехники: учебное пособие / А. С. Серебряков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2019. – 568 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. – Moskva: Transport, 1983. – 183 s.

2. German L.A. Umenshenie poter elektroenergii ustanovkami poperechnoy emkostnoy kompensatsii v tyagovoy seti // Trudy MIIT. – No. 302. – Moskva: Transport, 1976.

3. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie zheleznykh dorog: uchebnik. – Moskva: Transport, 1982. – 528 s.

4. Dixon, J., Moran, L., Rodriguez, J., Domke, R. (2006). Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE*. 93 (12). 2144-2164. 10.1109/JPROC.2005.859937.

5. Liu, Y., Rau, S., Wu, C., Lee, W. (2018). Improvement of Power Quality by Using Advanced Reactive Power Compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 54, 18-24.

6. Vorotnitskiy V.E. Snizhenie poter v elektroenergetike – vazhneyshiy put energosberezheniya v elektricheskikh setyakh // Energoberezhenie. – 2014. – No. 4. – S. 52-56.

7. Kovalev I.N. O napravleniyakh issledovaniy v oblasti kompensatsii reaktivnykh nagruzok // Elektrichestvo. – 1981. – No. 10. – S. 61-64.

8. Kovalev I.N. Elektroenergeticheskie sistemy i seti: uchebnik. – Moskva, 2015.

9. Kovalev I.N. Energoberegayushchaya sinergetika pri kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v energosistemakh na sovremenom etape // Energoberezhenie. – 2019. – No. 6. – S. 10-13.

10. Serebryakov A.S., Osokin V.L. Teoreticheskoe obosnovanie osnovnykh sootnosheniy dlya informatsionnogo obespecheniya intellektualnykh sistem upravleniya transformatornymi podstantsiyami // Izvestiya SPbETU «LETI». – 2018. – No. 8. – S. 59-65.

11. Serebryakov A.S. MATHCAD i reshenie zadach elektrotehniki. – 2-e izd., pererab. i dop.: ucheb posobie. – Moskva: FGBU DPO «UMTs ZhDT», 2019. – 568 s.

