

УДК 621.314.22.08

## ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПРОДОЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В СХЕМЕ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Н.П. Бадалян, Г.П. Колесник, С.Г. Соловьёва

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

Исследованы вопросы изменения параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации. На основании анализа схемы замещения устройства продольной компенсации с трансформатором продольного включения решаются вопросы оценки приращения значений модуля и аргумента реального коэффициента трансформации трансформатора продольного включения и их зависимости от тока нагрузки. Получены соотношения для оценки влияния приращения модуля коэффициента трансформации на значение емкости приведенного к обмотке низшего напряжения компенсирующего конденсатора и реактивной мощности компенсирующей установки в схеме продольной компенсации короткой сети электродуговой печи. Показана независимость аргумента коэффициента трансформации от значения напряжения на компенсирующем конденсаторе и тока нагрузки. Результаты исследований показали, что для решения вопросов энергоэффективности и энергосбережения линейной нагрузки большой мощности при синусоидальном режиме целесообразно использовать схемы продольной компенсации реактивной мощности токопроводов и нагрузки большой мощности с включением компенсирующих конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Такое схемное решение позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, скорректировать параметры рабочего режима и уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи.

**Ключевые слова:** коррекция, коэффициент мощности, напряжения вольтодобавки, продольная компенсация, трансформатор.

**Введение.** Коррекцию коэффициента мощности системы электроснабжения электродуговой печи при питании от трехобмоточного трансформатора можно выполнить компенсацией реактивной мощности на стороне высшего напряжения (ВН), либо на стороне среднего (СН) или низшего напряжения (НН). Однако наиболее целесообразной оказывается последовательная компенсация реактивной мощности на стороне СН, поскольку включением компенсирующей установки на стороне ВН можно выполнить основные требования к коэффициенту мощности управлением по энергосбережению, но

это не решает проблему потерь мощности в короткой сети печного трансформатора. Техническая реализация компенсирующей установки на стороне низшего напряжения связана с увеличением габаритных размеров и усложнением монтажа из-за больших значений тока компенсации НН в несколько десятков тысяч ампер, но может повысить эффективность печного трансформатора [1].

Последовательную компенсацию на стороне СН принято называть продольной компенсацией, поскольку компенсационные электрические емкости оказываются включенными последовательно с нагрузкой в главном токовом контуре. Дополнительная параллельная компенсация в обмотке НН способствует решению проблемы потерь мощности в короткой сети печного трансформатора, при этом коэффициент мощности может достигать 0,92.

**Методы исследования.** Упрощенная на одну фазу схема включения компенсирующей емкости в обмотку СН трехобмоточного трансформатора без дополнительных элементов защиты от коммутационных перенапряжений на конденсаторе показана на рис. 1.

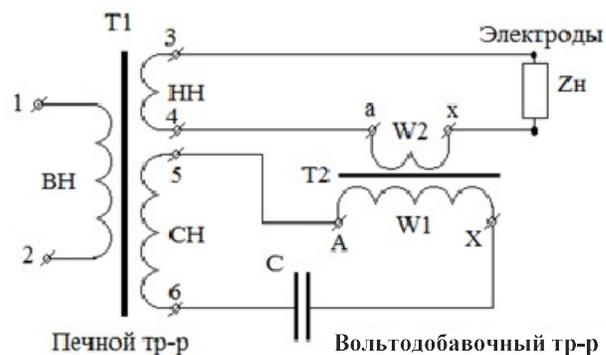


Рис. 1. Упрощенная схема включения компенсирующей емкости в обмотку СН трехобмоточного трансформатора

Для определения реактивной мощности конденсаторов устройства продольной компенсации по схеме рис.1 и влияния коэффициента трансформации на её значение составим схему замещения устройства продольной компенсации с трансформатором продольного включения по схеме рис. 1 при питании обмотки ВН от постороннего источника синусоидального напряжения (рис. 2).

Напряжение  $U_1$  снимается с одной из обмоток трансформатора (условно назовем его средним напряжением) и используется для формирования напряжения вольтодобавки. В принципе, напряжение СН может быть

регулируемым для обеспечения заданного рабочего режима нагрузки по напряжению и мощности.

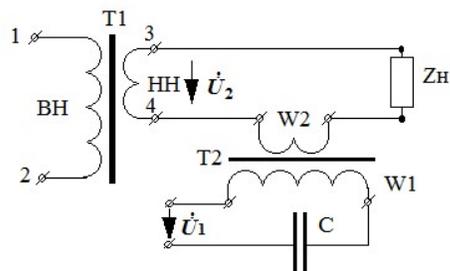


Рис. 2. Продольная компенсация реактивной мощности с использованием трансформатора продольного включения

Схема замещения устройства продольной компенсации по схеме рис. 2 представлена на рис. 3, элементы которой приведены к обмотке НН трансформатора T2, поэтому проводимости  $B_m$ ,  $G_m$  умножаются на  $(U_{вн}/U_{нн})^2$ , а сопротивления  $R_m$ ,  $X_m$ ,  $X_c$  учитываются в  $(U_{вн}/U_{нн})^2$  раз меньшими.

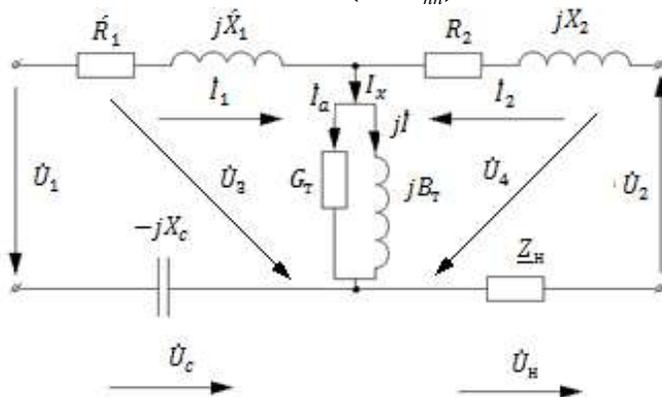


Рис. 3. Схема замещения устройства продольной компенсации с трансформатором продольного включения

**Результаты исследования.** В полнофазном режиме двухобмоточного трансформатора потери мощности в трех фазах равны утроенному значению фазных потерь, т.е.  $\Delta P_k = 3 \cdot \Delta P_{кф}$ , линейное напряжение  $U_{ном} = \sqrt{3} \cdot U_{ф ном}$ , номинальная мощность трансформатора  $S_{ном} = 3 \cdot S_{ф ном}$ . Тогда суммарное

активное сопротивление обмоток двухобмоточного трансформатора можно определить по паспортным данным,  $O_M$ , по формуле [2,3]

$$R_{m2} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}^2} \cdot 10^{-3},$$

где мощности потерь выражаются в киловаттах, напряжение - в киловольтах, а номинальная мощность трансформатора - в мегавольтамперах.

Индуктивное сопротивление трансформатора  $X_{m2}$  определяется напряжением короткого замыкания  $u_K$ . Тогда полное сопротивление трансформатора,  $O_M$ , будет

$$Z_{m2} = R_{m2} + jX_{m2} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном}} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}.$$

По результатам опыта холостого хода можно определить проводимости схемы замещения трансформатора. Ток холостого хода трансформатора составляет от 0,7 до 3,0% от номинального значения, поэтому потери мощности в активном сопротивлении первичной обмотки незначительны, и все потери холостого хода с небольшой погрешностью переносят как бы в стальной сердечник и приравнивают к общим потерям холостого хода  $\Delta P_{ст} \cong \Delta P_x$ . Для одной фазы трансформатора имеем

$$\Delta P_{ст \phi} = U_{\phi \text{ ном}}^2 \cdot G_m = \frac{U_{ном}^2 G_m}{3};$$

для трехфазного трансформатора:

$$G_m = \frac{3\Delta P_{ст \phi}}{U_{ном}^2} = \frac{\Delta P_{ст}}{U_{ном}^2}, \text{ Ом}^{-1}.$$

Активная составляющая тока холостого хода, отражающая потери в стальном магнитопроводе трансформатора, примерно на порядок меньше реактивной. Практически реактивная составляющая равна всему току холостого хода  $I_\mu = I_x$ , поэтому реактивную проводимость  $B_m$  ветви намагничивания можно определить по формуле

$$B_m = \frac{\Delta Q_x}{U_{ном}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{I_x}{100} \cdot \frac{S_{ном}}{U_{ном}^2} \cdot 10^{-3},$$

где  $I_x$  – ток холостого хода, %;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Ток холостого хода трансформатора составляет менее 3% от номинального, поэтому в первом приближении можно пренебречь ветвью намагничивания и привести схему замещения к виду, показанному на рис. 4.

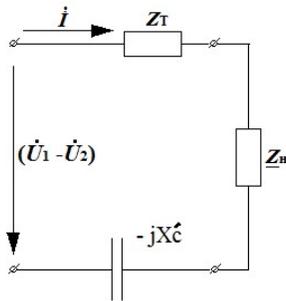


Рис. 4. Упрощенная схема замещения устройства продольной компенсации без учета ветви намагничивания трансформатора

Из рассмотрения схемы замещения рис. 4 следует, что применение продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсатора в обмотку ВН трансформатора продольного включения позволяет компенсировать реактивности нагрузки и трансформатора, включенных в главную токовую цепь. При этом решаются задачи минимизации потерь мощности и реализации коэффициента мощности устройства на уровне 0,92...0,95.

Сопротивление компенсирующего конденсатора приведено к обмотке НН трансформатора продольного включения. В этом случае в соответствии с рис. 2 приведенное сопротивление будет

$$\dot{X}_c = \frac{X_c}{\left(\frac{U_3}{U_4}\right)^2},$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C_k} = \frac{U_c^2 \cdot 10^{-3}}{Q_k},$$

где  $U_c$  – напряжение на зажимах конденсатора, кВ;  $Q_k$  – реактивная мощность конденсатора, кВАр.

Напряжения  $U_3$  и  $U_4$  определяют реальное значение коэффициента трансформации трансформатора продольного включения  $k_{T2}$  и, в свою очередь, зависят от значений напряжений на конденсаторе и нагрузке, а также входных напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ .

Согласно принятым условным положительным направлениям токов и напряжений на схеме рис. 3, можно записать

$$\dot{k}_{T2} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_4} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_c}{-(\dot{U}_2 + \dot{U}_N)} = k_{T2} e^{j\varphi_{кт}},$$

или

$$\begin{aligned} k_{\tau 2} &= \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_4} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_c}{-(\dot{U}_2 + \dot{U}_H)} = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} + U_c e^{j\varphi_c}}{-(U_2 e^{j\varphi_2} + U_H e^{j\varphi_H})} = \frac{U_1 e^{j\varphi_1} + U_c e^{j\varphi_c}}{U_2 e^{j\varphi_2} + U_H e^{j\varphi_H}} = \\ &= k_{\tau 2} e^{j(\varphi_{\text{кт}} - 180^\circ)}, \end{aligned}$$

где  $k_{\tau 2} = |k_{\tau 2}(j\omega)|$  – и  $\varphi_{\text{км}} = \varphi_{\text{км}}(\omega)$  – амплитудно-частотная и фазочастотные характеристики.

После преобразований для момента времени  $t = 0$  получим

$$\dot{k}_{\tau 2} = \frac{U_1 \cos \varphi_1 + jU_1 \sin \varphi_1 + U_c \cos \varphi_c + jU_c \sin \varphi_c}{U_2 \cos \varphi_2 + jU_2 \sin \varphi_2 + U_H \cos \varphi_H + jU_H \sin \varphi_H}.$$

Тогда выражения для модуля и аргумента реального значения коэффициента трансформации трансформатора продольного включения можно представить в виде

$$\begin{aligned} k_{\tau 2} &= \frac{\sqrt{(U_1 \cos \varphi_1 + U_c \cos \varphi_c)^2 + (U_1 \sin \varphi_1 + U_c \sin \varphi_c)^2}}{\sqrt{(U_2 \cos \varphi_2 + U_H \cos \varphi_H)^2 + (U_2 \sin \varphi_2 + U_H \sin \varphi_H)^2}} = \\ &= \frac{\sqrt{U_1^2 + U_c^2 + 2U_1 U_c \cos(\varphi_1 - \varphi_c)}}{\sqrt{U_2^2 + U_H^2 + 2U_2 U_H \cos(\varphi_2 - \varphi_H)}} \\ \varphi_{\text{кт}} &= \arctg \frac{U_1 \sin \varphi_1 + U_c \sin \varphi_c}{U_1 \cos \varphi_1 + U_c \cos \varphi_c} - \arctg \frac{U_2 \sin \varphi_2 + U_H \sin \varphi_H}{U_2 \cos \varphi_2 + U_H \cos \varphi_H}. \end{aligned}$$

Если напряжения  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  снимаются со вторичных обмоток трансформатора, то можно предположить равенство их начальных фаз и различие действующих значений. При чисто активной нагрузке, что характерно для мощных электродуговых печей, фазовый сдвиг векторов напряжения на компенсирующем конденсаторе и нагрузке составит 90 электрических градусов.

Тогда, принимая значения начальных фаз питающих напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  равными, т.е.  $\varphi_1 = \varphi_2$  и  $\varphi_c - \varphi_H = 90^\circ$ , получим

$$\begin{aligned} k_{\tau 2} &= \frac{\sqrt{U_1^2 + U_c^2 + 2U_1 U_c \cos(\varphi_1 - \varphi_c)}}{\sqrt{U_2^2 + U_H^2 + 2U_2 U_H \cos(\varphi_2 - \varphi_H)}} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_c^2 + 2U_1 U_c \cos(\varphi_1 - \varphi_c)}}{\sqrt{U_2^2 + U_H^2 + 2U_2 U_H \cos(\varphi_1 - \varphi_c + 90^\circ)}} = \\ &= \frac{\sqrt{U_1^2 + U_c^2 + 2U_1 U_c \cos(\varphi_1 - \varphi_c)}}{\sqrt{U_2^2 + U_H^2 + 2U_2 U_H \sin(\varphi_1 - \varphi_c)}}. \end{aligned}$$

При условии  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$  выражения для  $k_{\tau 2}$  и  $\varphi_{\text{кт}}$  принимают вид

$$k_{\tau 2} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_c^2 - 2U_1 U_c \cos(\varphi_c)}}{\sqrt{U_2^2 + U_H^2 - 2U_2 U_H \cos(\varphi_H)}}$$

$$\varphi_{\text{кт}} = \arctg(\text{tg } \varphi_c) - \arctg(\text{tg } \varphi_n) = \varphi_c - \varphi_n.$$

Последнее выражение свидетельствует о независимости аргумента реального значения коэффициента трансформации трансформатора продольного включения от значения напряжения на компенсирующем конденсаторе.

При полной компенсации индуктивного сопротивления в главной токовой цепи действующее значение тока будет ограничено активным сопротивлением трансформатора  $T_2$  и нагрузки:

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R_T + R_H} = \frac{U_1 - U_2}{\frac{\Delta P_k \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^{-3} + R_H}.$$

Напряжения на конденсаторе и нагрузке определяются током главной цепи (рис.4) и в общем случае зависят от режимных параметров нагрузки. Поэтому значение коэффициента трансформации трансформатора продольного включения  $k_{T2}$  также зависит от тока нагрузки, и, следовательно, значение емкости компенсирующего конденсатора не является постоянной величиной. Оценку отклонения напряжения на конденсаторе и его влияние на значение коэффициента трансформации трансформатора продольного включения, а также изменение его емкости можно провести по формулам чувствительности:

$$S_{U_c}^{k_{m2}} = S_{U_c}^{\ln k_{m2}} + jS_{U_c}^{\varphi_{km}}.$$

Чувствительность модуля коэффициента трансформации трансформатора продольного включения равна

$$S_{U_c}^{\ln k_{T2}} = \text{Re} \left[ \frac{1}{k_{T2}(j\omega)} \cdot \frac{\partial k_{T2}(j\omega)}{\partial U_c} \right],$$

чувствительность аргумента:

$$S_{U_c}^{\varphi_{\text{кт}}} = \text{Im} \left[ \frac{1}{k_{T2}(j\omega)} \cdot \frac{\partial k_{T2}(j\omega)}{\partial U_c} \right].$$

После проведения математических операций и элементарных преобразований получим выражение для оценки чувствительности модуля и аргумента реального значения коэффициента трансформации трансформатора продольного включения:

$$S_{U_c}^{\ln k_{T2}} = \frac{1}{U_c},$$

$$S_{U_c}^{\varphi_{\text{кт}}} = 0.$$

Отклонение модуля реального значения коэффициента трансформации трансформатора продольного включения определим по формуле

$$\Delta k_{T2} = S_{U_c}^{\ln k_{T2}} \cdot \Delta U_c.$$

Отклонение аргумента определяется по формуле  $\Delta \varphi_{k_{T2}} = S_{U_c}^{\varphi_{k_{T2}}} \cdot \Delta U_c$ , но для данного случая будет нулевым.

Тогда приращение приведенного емкостного сопротивления можно определить по формуле

$$\dot{X}_c \pm \Delta \dot{X}_c = \frac{X_c}{(k_{T2} \pm \Delta k_{T2})^2}.$$

Значение фактической реактивной мощности компенсирующего конденсатора, сопротивление которого приведено к обмотке низшего напряжения трансформатора Т2, составит

$$\dot{Q}_{к\phi} = \frac{U_c^2 \cdot 10^{-3}}{\dot{X}_c \pm \Delta \dot{X}_c} = \frac{U_c^2 \cdot 10^{-3} \cdot (k_{T2} \pm \Delta k_{T2})^2}{X_c} = Q_{к} \cdot (k_{T2} \pm \Delta k_{T2})^2,$$

или

$$\dot{Q}_{к\phi} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_1 (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) \cdot (k_{T2} \pm \Delta k_{T2})^2,$$

где  $\cos \varphi_1$  – коэффициент мощности некомпенсированной короткой сети;  $U$  – напряжение на входе некомпенсированной короткой сети;  $I$  – ток короткой сети;  $\operatorname{tg} \varphi_2$  соответствует значению реализуемого коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$  после компенсации.

Численные значения параметров схемы замещения установки продольной компенсации с учетом вышеизложенного можно получить по паспортным данным конкретного типа печного трансформатора, трансформатора продольного включения или трансформаторного агрегата, состоящего из главного трансформатора, вольтодобавочного и переключающего устройств реакторного типа, размещенных в одном корпусе, и предназначенного для электропитания рудотермических печных установок, работающих со схемой продольно-емкостной компенсации. Упомянутые трансформаторные агрегаты относятся к разряду комбинированных и имеют в шифре букву К, например, ЭОЦНК-16000/10К.

**Заключение.** Для решения вопросов энергоэффективности и энергосбережения линейной нагрузки большой мощности при синусоидальном режиме целесообразно использовать схемы продольной компенсации реактивной мощности токопроводов и нагрузки большой мощности с включением компенсирующих конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Такое схемное решение позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, скорректировать параметры рабочего режима и уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи.

## Լիտերատուրա

1. **Суворин А.В.** Электротехнологические установки [Электронный ресурс]: Учеб. пособие.- Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. - 376 с.
2. **Герасименко А.А., Федин В.Т.** Передача и распределение электрической энергии: Учеб. пособие.- 3-е изд., перераб.- М.: КНОРУС, 2012. – 648 с.
3. **Серебряков А.С.** Трансформаторы [Электронный ресурс]: Учеб. пособие.- М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 360 с.

*Поступила в редакцию 28.09.2017.*

*Принята к опубликованию 13.12.2017.*

### ԵՐԿԱՅՆԱԿԱՆ ՄԻԱՑՎՈՂ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՓՈՓՈԽՈՒՄԸ ԵՐԿԱՅՆԱԿԱՆ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՄԱՆ ՍԽԵՄԱՅՈՒՄ

**Ն.Պ. Բաղայան, Գ.Պ. Կոլեսնիկ, Ս.Գ. Սոլովյովա**

Հետազոտվել են երկայնական կոմպենսացման սխեմայում երկայնական միացման տրանսֆորմատորի պարամետրերի փոփոխման հարցերը: Երկայնական կոմպենսացման սարքավորման՝ երկայնական միացման տրանսֆորմատորով փոխարինման սխեմայի վերլուծության հիման վրա որոշվում են երկայնական միացման տրանսֆորմատորի կերպափոխման իրական գործակցի մոդուլի և արգումենտի արժեքների աճի և բեռի հոսանքից դրանց կախվածության հարցերը: Ստացվել են կերպափոխման գործակցի մոդուլի աճի վրա ազդեցության գնահատման և ցածր լարման կոմպենսացնող կոնդենսատորի փաթույթին բերված ունակության ու երկայնական կոմպենսացման կարճ ցանցի էլեկտրաաղեղային վառարանի սխեմայում կոմպենսացնող սարքավորման ռեակտիվ հզորության հարաբերակցությունները: Ցույց է տրված կերպափոխման գործակցի արգումենտի անկախությունը կոմպենսացնող կոնդենսատորի լարման արժեքից և բեռի հոսանքից: Հետազոտությունների արդյունքները ցույց են տվել, որ սինուսոիդային ռեժիմում մեծ հզորությամբ գծային բեռնվածքի էներգաարդյունավետության և էներգախնայողության հարցերի լուծման համար նպատակահարմար է օգտագործել երկայնական միացվող տրանսֆորմատորի բարձր լարման փաթույթում կոմպենսացնող կոնդենսատորների ներառմամբ երկայնական կոմպենսացման ռեակտիվ հզորության հոսանքատարների և մեծ հզորությամբ բեռի սխեմաները: Սխեմային այսպիսի լուծումը հնարավորություն է տալիս մեծացնելու էլեկտրաաղեղային վառարանի էլեկտրասնուցման սարքի օ.գ.գ-ն, ճշտելու աշխատանքային ռեժիմի պարամետրերը և փոքրացնելու հզորության կորուստները վառարանի կարճ ցանցի և էլեկտրամատակարարման համակարգում:

**Առանցքային բառեր.** ճշգրտում, հզորության գործակից, վոլտալրացման լարումներ, երկայնական կոմպենսացում, տրանսֆորմատոր:

## CHANGING THE PARAMETERS OF THE LONGITUDINAL INCLUSION IN TRANSFORMER IN THE LONGITUDINAL COMPENSATION CIRCUIT

N.P. Badalyan, G.P. Kolesnik, S.G. Solovyeva

Issues on changing the parameters of the longitudinal inclusion transformer in the longitudinal compensation circuit are investigated. Based on the analysis of the equivalent circuit of longitudinal compensation device with the longitudinal inclusion transformer, the problems of estimating the increment of the module values and the argument of the real transformer ratio of the longitudinal inclusion transformer and their dependence on the load current are solved.

Results are obtained for estimating the influence of the increment of the transformation coefficient modulus on the capacitance value of the compensating capacitor reduced to the winding of the lower voltage and the reactive power of the compensating unit in the scheme for longitudinal compensation of a short arc-furnace network. The dependence of the argument of the transformation coefficient on the value of the voltage on the compensating capacitor and the load current is shown.

The investigation results have shown that to solve the problems of power efficiency and power saving of high power linear loading at the sinusoidal mode, it is expedient to use the longitudinal compensation schemes of the wire reactive power and a high power loading by including compensating capacitors in the winding of high voltage of the longitudinal inclusion transformer. Such a schematic solution allows to increase the efficiency of power devices of electric arc furnaces, correct the operation mode parameters and decrease the power losses in the power supply system and the furnace short network.

**Keywords:** correction, power factor, voltage add-ons, longitudinal compensation, transformer.