

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ШИРОКОГО КЛАССА МОЩНОСТИ

Объектом исследования являются компенсирующие устройства для дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Предложена формула для определения мощности конденсаторной батареи в составе фильтров. В качестве примера рассчитана необходимая мощность компенсирующего устройства для комплекса ДСП-10 и агрегата ковш-печь (АКП) сталелитейного завода. Рассмотрены основные виды компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей. Рассчитаны потери активной мощности в элементах компенсаторов и дана оценка эксплуатационных затрат.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, компенсация реактивной мощности, фильтрокомпенсирующие устройства, статический тиристорный компенсатор, потери мощности.

### ВВЕДЕНИЕ

Электрометаллургический процесс получения жидкой стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) является наиболее перспективным и продуктивным. В настоящее время в ДСП выплавляется от 30 до 50% общего производства стали. В этом производстве участвуют как сверхмощные агрегаты, у которых мощность печного трансформатора достигает 200-300 МВА, так и малые ДСП литейных цехов с мощностью 5-10 МВА.

Дуговая сталеплавильная печь, как приемник с нелинейной характеристикой, оказывает негативное влияние на качество электрической энергии питающей сети из-за резкопеременного режима работы и значительного потребления реактивной мощности, что является причиной заметных искажений напряжения по форме и величине от заданных (нормируемых) значений. Нарушение электромагнитной совместимости ухудшает технико-экономические показатели как самой печи, так и смежных потребителей в точке общего подключения.

Одним из эффективных решений проблемы является установка дополнительных компенсирующих устройств.

Отметим, что до настоящего времени в русскоязычной технической литературе не утвердилось устойчивой аббревиатуры различных конструкций и схемных решений компенсирующих устройств (КУ). Наряду с их общим обозначением первые разработки регулируемых КУ, проводимые в Московском энергетическом институте под руководством Веникова В.А., получили название ИРМ – источник реактивной мощности [1].

Рассмотрим несколько современных типов компенсирующих устройств для ДСП различной мощности, которые наиболее часто используются в системах электроснабжения металлургических предприятий (рис. 1).

1. Силовые резонансные фильтры или фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ) представляют собой особый тип конденсаторных установок, задачей которых является фильтрация гармоник совместно с компенсацией реактивной мощности. Состоят из нескольких фильтров высших гармоник, которые могут быть различной конфигурации: узкополосные, широкополосные, режекторные и т.д. Достоинством является

относительно низкая стоимость, простота установки и обслуживания. К недостаткам относится невозможность регулирования реактивной мощности, а значит, и напряжения, и симметрирования нагрузки, что особенно проявляется в сетях с низкой мощностью короткого замыкания.

Включение конденсаторов в составе фильтров технически и экономически оправдано для ДСП малой мощности. При этом установленная мощность конденсаторов выбирается из условия, чтобы при неработающей печи напряжение на высокой стороне печного трансформатора не превышало предельного значения  $1,05U_{ном}$ . Следует также учитывать повышение напряжения на конденсаторной батарее основной частоты  $U_{КБ}/U_{(1)}=K_{пн(1)}$ . Так, для фильтра второй гармоники  $v = 2$  оно составит

$$K_{пн(1)} = \frac{v^2}{v^2 - 1} = 1,33,$$

$$Q_{(1)} = K_{пн} \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C = K_{пн} \cdot Q_{КБ},$$

$$\Delta U = \frac{Q_{(1)}}{S_{КЗ}} \cdot 100 \leq 5\%,$$

$$Q_{КБ} \leq \frac{5 \cdot S_{КЗ}}{100 \cdot K_{пн}} = \frac{0,05 \cdot S_{КЗ}}{1,33},$$

$$Q_{КБ} \leq 3,75 \cdot 10^{-2} \cdot S_{КЗ},$$

где  $S_{КЗ}$  – мощность КЗ в точке подключения печного трансформатора.

В качестве примера рассчитаем необходимую мощность конденсаторов в составе фильтра второй гармоники для комплекса ДСП-10 и АКП сталелитейного завода ЗАО «Конар» г. Челябинск, где мощность КЗ составляет 173,4 МВА.

$$Q_{КБ} \leq 3,75 \cdot 10^{-2} \cdot 173,4 = 6,5 \text{ МВАр.}$$

Для сравнения, мощность ФКЦ, рассчитанная по методике Николаева А.А. [4], составила 6,3 МВАр. Расчет показал, что при установке ФКЦ 6,3 МВАр среднее напряжение на шинах 10 кВ в точке подключения ДСП повышается на 0,28 кВ (с 10,14 до 10,42 кВ, рис. 2), а мощность печи увеличивается за цикл плавки на 1,41 МВт.

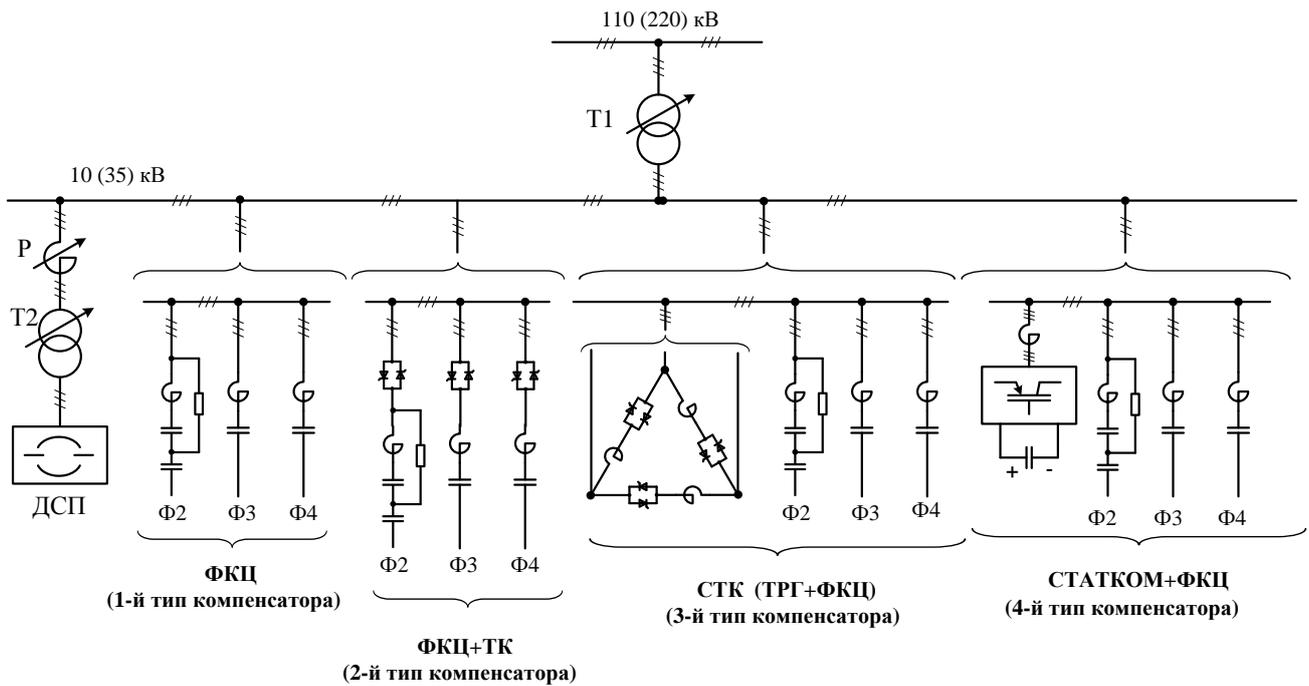


Рис. 1. Однолинейные схемы компенсирующих устройств

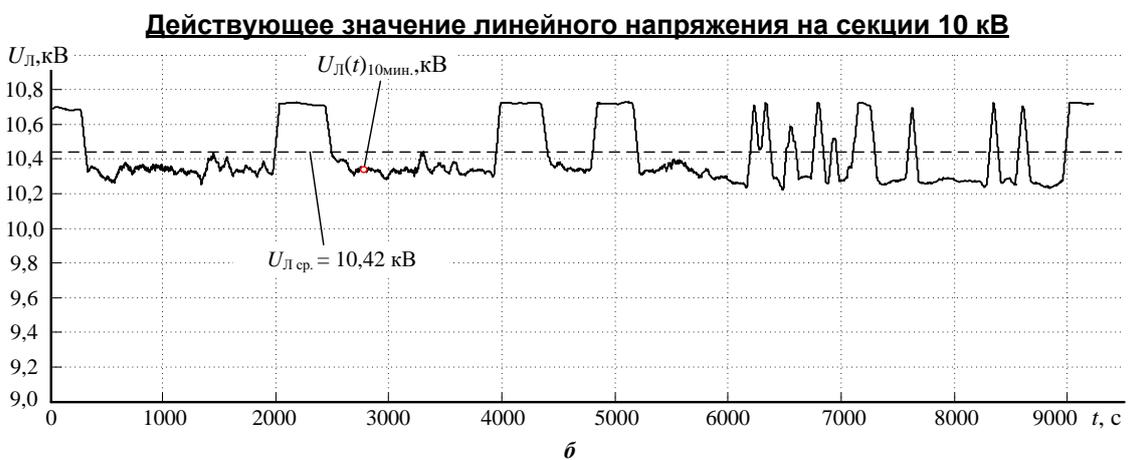
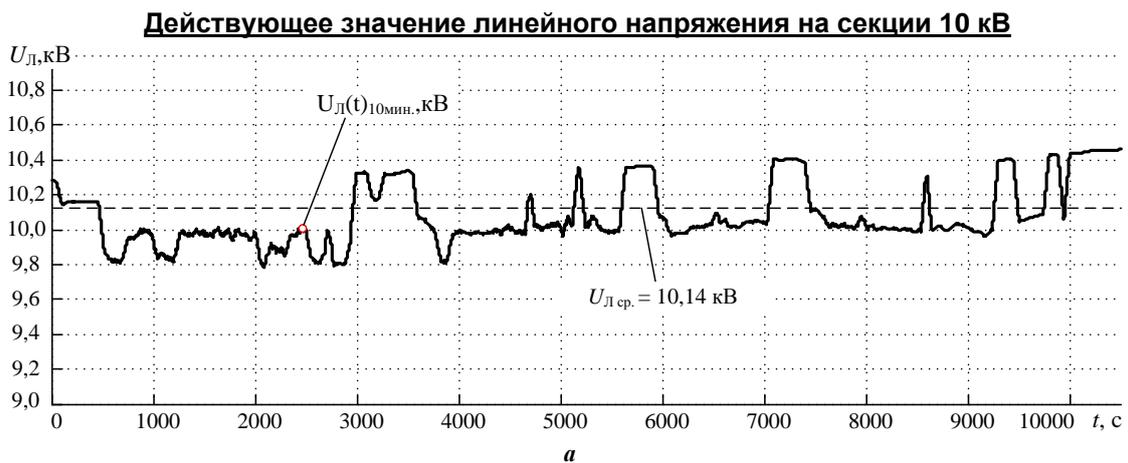


Рис. 2. Графики изменения действующего значения линейного напряжения при работе ДСП-10 без ФКЦ (а), при использовании ФКЦ 6,3 МВАр (б)

2. Конденсаторная батарея, управляемая тиристорами TSC (Thyristor Switched Capacitor). В русскоязычной технической литературе не утвердилась устойчивая аббревиатура данного компенсирующего устройства, поэтому для удобства обозначим его как ФКЦ + ТК (фильтрокомпенсирующие цепи + тиристорный ключ). Тиристорный ключ необходим для бестоковой коммутации конденсаторной батареи, т.к. его включение происходит в момент перехода напряжения через ноль.

Основными достоинствами ФКЦ+ТК являются сравнительно малая масса установки с конденсаторами, а в связи с этим отсутствие необходимости в фундаменте; более простая и дешевая эксплуатация по сравнению с другими установками; отсутствие генерации высших гармоник, высокое быстродействие. Кроме того, выход из строя отдельного конденсатора, при надлежащей его защите, не отражается обычно на работе всей конденсаторной установки. К недостаткам относится невозможность плавного регулирования.

3. Статический тиристорный компенсатор (СТК) – компенсирующее устройство косвенного типа, является основным видом компенсаторов в системах электроснабжения мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных и шахтных печей, а также дуговых печей средней мощности, которые подключены к слабым сетям и (или) имеют на общих шинах чувствительных потребителей электроэнергии, например жилой массив.

СТК состоит из набора фильтрокомпенсирующих цепей и тиристорно-реакторной группы ТГР (TCR - Thyristor Controlled Reactor), благодаря которой данный тип компенсатора способен осуществлять симметрирование нагрузки, эффективно подавлять фликер за счет быстродействующей компенсации реактивной мощности и поддерживать напряжение в точке подключения на заданном уровне. Достоинством СТК является: высокое быстродействие; регулируемая компенсация реактивной мощности; поддержание напряжения на печном трансформаторе на номинальном уровне, что обеспечивает заданную производительность дуговой печи. К недостаткам относится двойная установленная мощность элементов СТК, большие габариты и генерация высших гармоник при работе ТГР.

4. Статический синхронный компенсатор STATCOM (STATic synchronous COMpensator) имеет в своем составе преобразователь напряжения на IGBT-транзисторах и фильтрокомпенсирующие цепи. Из-за высокой стоимости оборудования в настоящее время СТАТКОМ является практически неконкурентоспособным для промышленных предприятий, поэтому к дальнейшему рассмотрению он не принимается [2].

МЕТОДИКА ПРОВДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экономическая оценка компенсирующих устройств осуществляется на основе расчета приведенных затрат [6]:

$$Z = p_n \cdot K + C,$$

где  $p_n$  – нормативный коэффициент экономической эффективности;  $K, C$  – капитальные вложения и эксплуатационные затраты.

В статье приводятся результаты технико-экономических расчетов для трех вариантов КУ – ФКЦ, ФКЦ + ТК и СТК. При этом приняты следующие допущения:

1. Напряжение узла нагрузки, где компенсируется реактивная мощность, равно 10 кВ при генерируемой реактивной мощности до 10 МВАр, и 35 кВ – при  $Q$  выше 10 МВАр.
2. Сравнимые варианты обеспечивают изменение реактивной мощности от нуля до  $Q$ .
3. Мощность КУ первого варианта ограничена в диапазоне 1–10 МВАр, для второго – 1–100 МВАр, для третьего – 1–200 МВАр.
4. В схемах используются фильтры 2-й (широкополосный), 3-й и 4-й (узкополосные) гармоник.
5. В проводимых исследованиях суммарная мощность ФКУ между резонансными фильтрами распределена равномерно:  $Q_{\Phi 2} = Q_{\Phi 3} = Q_{\Phi 4} = 0,333 \cdot Q_{\text{ФКУ}}$ , т.к. вопрос рационального распределения мощности между отдельными фильтрами заслуживает специального рассмотрения.

Ввиду того, что стоимость отдельных элементов компенсирующих устройств является закрытой, их сравнение проводится по эксплуатационным затратам, которые учитывают потери в самих КУ, а также элементах сети:

$$C = b \cdot \Delta W.$$

Для первого варианта при расчете эксплуатационных затрат учитываются потери активной мощности в конденсаторах  $\Delta P_{\text{кб}}$  и реакторах  $\Delta P_{\text{р}}$ .

$$\Delta P_{\text{кб}} = \Delta p_{\text{кб уд}} \cdot Q_{\text{кб уст}};$$

$$\Delta P_{\text{р}} = 3 \cdot I_{\text{р}}^2 \cdot R_{\text{р}},$$

где  $\Delta p_{\text{кб уд}}$  – удельные потери мощности ( $\Delta p_{\text{кб уд}} = 0,0045$  кВт/кВАр);  $I_{\text{р}}$  – ток в цепи реактора.

Потери электроэнергии определялись по формуле [5]

$$\Delta W = \Delta P_{\Sigma} \cdot t_{\text{р}} + Q \cdot k_{\text{ПП}} \cdot (1 - k_{\text{в}}) \cdot t_{\text{ц}},$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  – суммарные потери мощности;  $k_{\text{ПП}}$  – коэффициент изменения потерь;  $k_{\text{в}}$  – коэффициент включения (принимается 0,7);  $t_{\text{ц}}$  – время цикла ДСП (принимается 7000 ч).

Коэффициент изменения потерь учитывает потери электроэнергии в сети от перетока реактивной мощности, рассчитывается только для первого варианта КУ, т.к. во втором и третьем обеспечивается условие  $Q_{\Sigma} = Q_{\text{ку}} + Q_{\text{ДСП}} \rightarrow 0$ .

Для второго варианта учитываются потери активной мощности в конденсаторах  $\Delta P_{\text{кб}}$ , реакторах  $\Delta P_{\text{р}}$  и тиристорах  $\Delta P_{\text{тир}}$  [3].

$$\Delta P_{\text{тир}} = N_{\text{тир}} \left( I_{\text{тир}} \cdot \Delta U_{\text{тир}} + I_{\text{тир}}^2 \cdot R_{\text{тир}} \right) =$$

$$= N_{\text{тир}} \left( \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{\text{р(к)}} \cdot \Delta U_{\text{тир}} + I_{\text{р(к)}}^2 \cdot R_{\text{тир}} \right),$$

где  $N_{\text{тир}}$  – общее число тиристоров в схеме;  $I_{\text{тир}}$ ,  $I_{\text{тир ср}}$  – действующее и среднее значение тока тиристора;

$I_{p(k)}$  – ток в цепи реактора или конденсатора;  $\Delta U_{\text{тир}}$  – пороговое значение напряжения;  $R_{\text{тир}}$  – внутреннее сопротивление тиристора.

Количество тиристорov рассчитывается по формуле

$$N_{\text{тир}} = 6 \cdot n_{\text{послед}} \cdot n_{\text{парал}},$$

где  $n_{\text{послед}}$ ,  $n_{\text{парал}}$  – количество тиристорov, включенных последовательно и параллельно.

$$n_{\text{послед}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{\text{л}}}{U_{\text{обр}}},$$

$$n_{\text{парал}} = \frac{0,45 \cdot Q_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{ср}}},$$

где  $U_{\text{обр}}$ ,  $I_{\text{ср}}$  – обратное напряжение и средний ток тиристора.

Потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P_{\Sigma} \cdot t_{\text{ц}} \cdot k_{\text{в}}.$$

Для третьего варианта КУ учитываются потери активной мощности в конденсаторах  $\Delta P_{\text{кб}}$ , реакторах  $\Delta P_{\text{р}}$ , тиристорах  $\Delta P_{\text{тир}}$  и реакторах ТРГ  $\Delta P_{\text{рТРГ}}$ .

$$\Delta P_{\text{рТРГ}} = I_{\text{р}}^2 \cdot \frac{X_{\text{р}}}{q},$$

где  $I_{\text{р}}$ ,  $X_{\text{р}}$ ,  $q$  – ток, индуктивное сопротивление и добротность реактора.

Потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P_{\text{ФКЦ}} \cdot t_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{рТРГ}} \cdot (1 - k_{\text{в}}) \cdot t_{\text{ц}}.$$

Для сравнения эксплуатационных затрат по трем рассмотренным вариантам получены зависимости  $C = f(Q_{\text{КУ}})$ .

Для большей наглядности на **рис. 3** и **4** представлены два графика: при  $Q_{\text{КУ}} = 1-10$  МВАр и  $Q_{\text{КУ}} = 1-200$  МВАр.

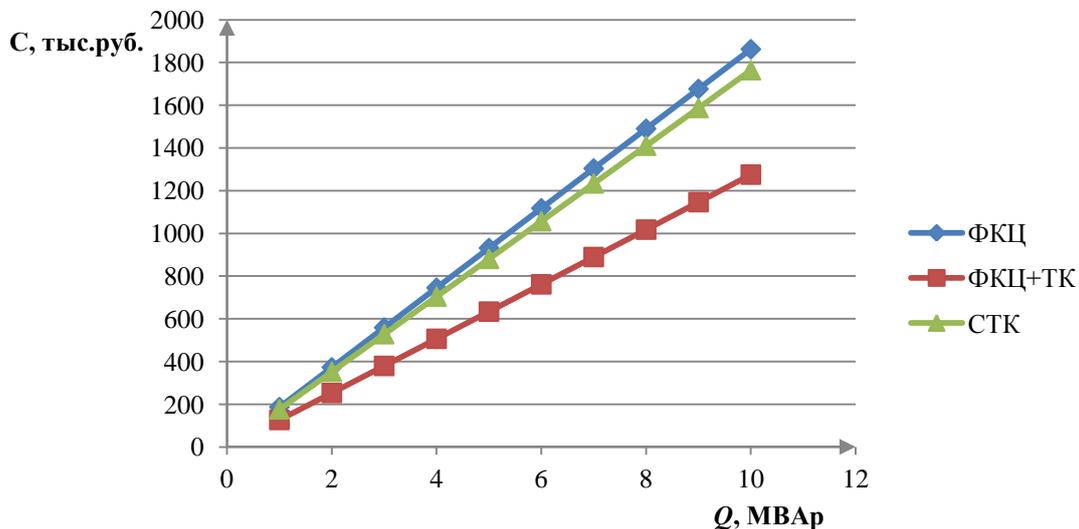


Рис. 3. График зависимости эксплуатационных затрат КУ от генерируемой мощности ( $Q_{\text{КУ}} = 1-10$  МВАр)

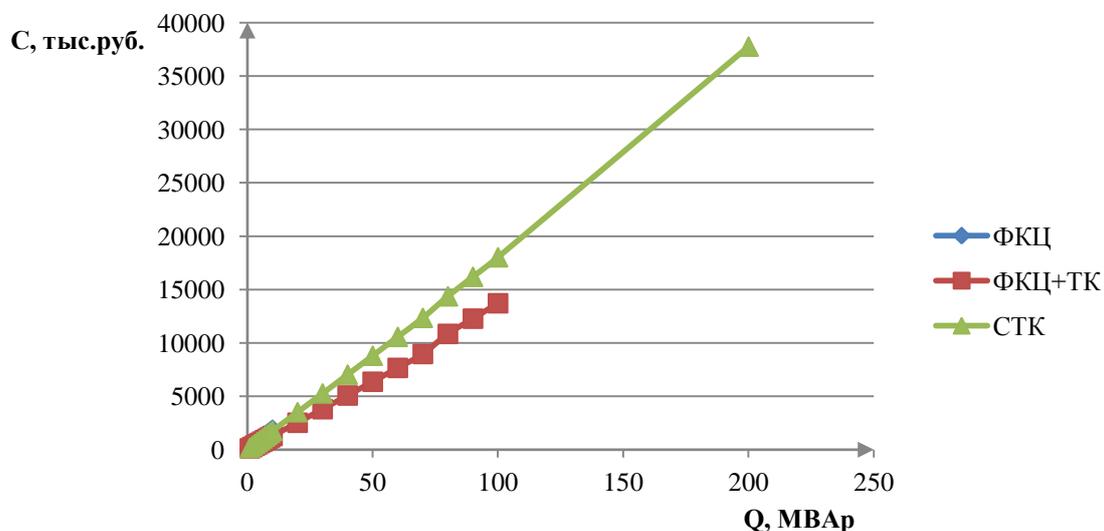


Рис. 4. График зависимости эксплуатационных затрат КУ от генерируемой мощности ( $Q_{\text{КУ}} = 1-200$  МВАр)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- 1) эксплуатационные затраты рассмотренных компенсирующих устройств монотонно увеличиваются с увеличением генерируемой реактивной мощности;
- 2) наиболее экономичным в отношении эксплуатационных расходов является второй рассматриваемый вариант компенсирующего устройства – фильтрокомпенсирующая цепь, управляемая тиристорным ключом, а наиболее затратным – статический тиристорный компенсатор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В.А. Веников, Л.А. Жуков, И.И. Карташев, Ю.П. Рыжов. М.: «Энергия», 1975. 136 с.
2. Компенсирующие устройства в системах промыш-

ленного электроснабжения / Корнилов Г.П., Карандаев А.С., Николаев А.А., Шеметов А.Н., Храмшин Т.Р., Храмшин В.Р., Медведев А.Г. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 235 с.

3. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 248 с.
4. Разработка фильтрокомпенсирующего устройства дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.С. Зайцев, С.В. Скакун, Ф.Ф. Урманова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. №5/6. С. 58-63.
5. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: «Энергия», 1979. 408 с.
6. Федоров А.А., Корнилов Г.П., Клецкий Н.И. Выбор источников реактивной мощности на основе технико-экономических расчетов // Промышленная энергетика. 1979. № 10. С. 20-22.

INFORMATION IN ENGLISH

TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF COMPENSATING DEVICES FOR ARC FURNACES IN BROAD CLASS OF POWER

Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Yu.

The object of the study is compensating devices for electric arc furnaces (EAFs). The formula for determining the power capacitor banks as part of the filter was offered. As an example, the research group calculated the required power of the compensating device for complex including an EAF-10 and a ladle furnace at a steel-making enterprise. The main types of compensating devices for arc furnaces are considered in the article. The authors calculated active power losses in the elements of compensating devices and offered the evaluation of operating costs.

**Keywords:** electric arc furnace, reactive power compensation, filter balancing devices, static var compensator, power loss.

REFERENCES

1. Venikov V.A., Zhukov L.A., Kartashov I.I., Ryzhov Yu.P. *Sticheskie istochniki reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh setyah* [Static Reactive Power Sources in Electric Grids], Moscow, Energy, 1975, 136 p.
2. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Shemetov A.N., Khramshin T.R., Khramshin V.R., Medvedev A.G. *Kompensiruyushhie ustroystva v sistemah promyshlennogo*

*elektrosnabzheniya* [Compensating Devices for Industrial Power Systems], Magnitogorsk: NMSTU, 2012, 235 p.

3. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh setyah energosistem i predpriyatii* [Application of Static Var Compensator in Electric Networks of Power and Enterprises], Moscow, NTs ENAS, 2002, 248 p.
4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Zaitsev A.S., Skakun S.V., Urmanova F.F. *Razrabotka filtrokompensiruyushhego ustroystva dugovoy staleplavilnoy pechi* [Design of Filter Compensating Device in Electric Arc Steel-making Furnace]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electric equipment: maintenance and repair], 2015. no.5/6, pp. 58-63.
5. Fedorov A.A., Kameneva V.V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Fundamentals of Industrial Power], Moscow, Energy, 1979, 408 p.
6. Fedorov A.A., Kornilov G.P., Kleckij N.I. *Vybor istochnikov reaktivnoy moshhnosti na osnove tehniko-ekonomicheskikh raschetov* [Choice of Reactive Power Sources on the Basis of Technical and Economic Calculations], *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering], 1979, no.10, pp. 20-22.