

# Сравнительный анализ подавления фликера статическим тиристорным компенсатором и активным фильтрокомпенсирующим устройством

МАТИНЯН А.М., КИСЕЛЕВ А.Н., ДРОЗДОВ А.В.

*Приведены причины возникновения фликера, проведен анализ алгоритмов и принципов работы фликеркомпенсаторов на базе статических тиристорных компенсаторов (СТК) и активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ). Для случаев, нормированных ГОСТ, получены аналитические зависимости эффективности подавления фликера от параметров нагрузки и компенсирующих устройств. Рассмотрено влияние на фликер пассивных фильтров. На разработанных цифровых моделях фликеркомпенсаторов проведена верификация полученных зависимостей. На цифровых моделях СТК и АФКУ получены зависимости эффективности подавления фликера от мощности фликеркомпенсатора для реальных замеров нагрузочного тока дугowych сталеплавильных печей. Показано, что при определенных условиях работа СТК может приводить к увеличению фликера. За счет большего быстродействия АФКУ технически эффективнее (имеет больший коэффициент ослабления фликера), чем СТК. При этом АФКУ для достижения того же технического эффекта требуется меньшая установленная мощность оборудования, что обуславливает его большую экономическую эффективность по сравнению с СТК.*

**Ключевые слова:** эффективность подавления фликера, СТК, АФКУ, ДСП, компьютерное моделирование

Фликер — воспринимаемое человеческим глазом колебание освещенности от искусственных источников освещения. Длительное воздействие фликера на человека приводит к повышенной утомляемости, снижению внимания и, в конечном итоге, к повышению травматизма и брака на производстве. Наиболее часто фликер возникает в узлах, близких к резкопеременным нагрузкам, таким как металлургические предприятия с дугowymi сталеплавильными печами (ДСП). Основная причина фликера — колебания реактивной мощности и тока обратной последовательности нагрузки. Для уменьшения фликера применяются компенсирующие устройства (КУ). Традиционно используют статические тиристорные компенсаторы (СТК). Однако, как показывает практика [1, 2], данное решение может приводить в некоторых случаях к обратному эффекту — усилению фликера. Это связано как с запаздыванием в КУ [2], так и с усилением амплитуды колебаний напряжения конденсаторными батареями (КБ). Развитие силовой электроники привело к созданию активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ) — статических компенсаторов на полностью управляемых транзисторных ключах. Данный тип устройств обладает большим быстродействием по сравнению с СТК [3], что существенно влияет на возможность подавления фликера [4]. В статье приведены результаты сравнения эффективности фликеркомпенсаторов, выполненных на основе СТК и АФКУ. Для случаев, нормированных ГОСТ Р 51317.4.15—99, получены аналитические зависимости коэффициента эффек-

тивности подавления фликера от параметров нагрузки и КУ. С помощью методов компьютерного моделирования исследована эффективность подавления фликера, вызванного работой дуговой сталеплавильной печи.

**Причины возникновения и способы подавления фликера.** Колебания освещенности (фликер) обусловлены колебаниями действующего значения напряжения. Основная причина возникновения колебаний напряжения — резкопеременная нагрузка. Изменение токов нагрузки приводит к изменению падения напряжения на сопротивлении сети. Потеря напряжения прямой последовательности и падение напряжения, обусловленное током обратной последовательности, определяются как

$$\Delta U_1 = (XQ + RP) / U_1 = XI_{1p} + RI_{1a}; \quad (1)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2, \quad (2)$$

где  $P, Q$  — активная и реактивная мощность нагрузки;  $R, X$  — активное и индуктивное сопротивление сети;  $I_{1a}, I_{1p}$  — активный и реактивный токи нагрузки;  $\underline{Z}_2$  — сопротивление обратной последовательности сети;  $\underline{I}_2$  — ток обратной последовательности.

Компенсируя  $I_{1p}$  и  $\underline{I}_2$ , можно уменьшить колебания напряжения. Остаточные колебания напряжения при этом определяются изменениями активного тока прямой последовательности нагрузки и значением сопротивления сети.

**Критерий эффективности работы фликеркомпенсатора.** Допустим, что система управления фликеркомпенсатора настроена таким образом, что при постоянной нагрузке выполняются соотношения:

$$I_{1р.ку} = k_{с.к} I_{1р.нгр}; \quad (3)$$

$$I_{2ку} = k_{с.к} I_{2нгр}, \quad (4)$$

где  $k_{с.к}$  – коэффициент степени компенсации;  $I_{1р.ку}$ ,  $I_{2ку}$  – реактивный ток прямой последовательности и ток обратной последовательности, генерируемые КУ;  $I_{1р.нгр}$ ,  $I_{2нгр}$  – реактивный ток прямой последовательности и ток обратной последовательности, потребляемые нагрузкой.

Определим коэффициент ослабления фликера

$$k_{о.ф}(k_{с.к}) = \frac{P_{st}(0) - P_{st}(k_{с.к})}{P_{st}(0)}, \quad (5)$$

где  $P_{st}$  – кратковременная доза фликера в точке общего присоединения фликеркомпенсатора и резкопеременной нагрузки.

Введем величину  $S_{min}(k_{с.к})$  – минимально установленную мощность КУ, необходимую для одновременной выдачи  $I_{1р.ку} = k_{с.к} I_{1р.нгр}$  и  $I_{2ку} = k_{с.к} I_{2нгр}$ . Мерой эффективности компенсации фликера будем считать коэффициент

$$h(k_{с.к}) = \frac{k_{о.ф}(k_{с.к})}{S_{min}(k_{с.к}) / S_c}, \quad (6)$$

где  $S_c$  – мощность короткого замыкания (КЗ) сети в узле  $U_B$  (рис. 1).

**Аналитическая зависимость ослабления фликера от степени компенсации.** Получение аналитической зависимости  $k_{о.ф}(k_{с.к})$  возможно при ряде допущений. Во-первых, считаем, что активное сопротивление сети  $R$  пренебрежимо мало; во-вторых, что переменная нагрузка является симметричной; в-третьих, что нагрузка является чисто реактивной и амплитуда нагрузочного тока изменяется по гармоническому закону. Для вывода искомой зависимости будем пользоваться схемой рис. 1, где нагрузка представлена источником тока  $I_H$ , сеть – источником напряжения  $E$  с внутренним сопротивлением  $X_c$ , а трансформатор – индуктивным сопротивлением  $X_T$ . В случае, когда фликеркомпенсатор выполнен на базе СТК, принимаем, что фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ) моделируются емкостным сопротивлением  $X_{фкц}$ , а тиристорная реакторная группа (ТРГ) – управляемым источником тока  $I_{уку}$  (УКУ – управляемая часть КУ). Если же фликеркомпенсатор выполнен на базе АФКУ, то  $X_{фкц} = \infty$ . Для исследования влияния пассивных фильтров на фликер в схеме прини-

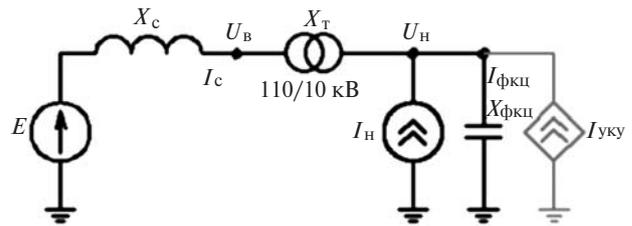


Рис. 1

маем, что ток управляемого источника  $I_{уку} = 0$ . Суммарный ток нагрузки и КУ обозначим  $I_c$ .

В случае симметричной реактивной нагрузки возможен переход к однолинейной электрической схеме и соответствующей ей эквивалентной скалярной передаточной функции КУ

$$W(s) = \frac{I_{уку}(s)}{k_{с.к} I_H(s) + I_{фкц}(s)}, \quad (7)$$

где  $I_{фкц}(s) \neq 0$  для АФКУ.

При частоте колебаний реактивной мощности нагрузки  $\omega$ , значительно меньшей номинальной частоты сети  $\omega_0$  для амплитудных значений токов и напряжений, в расчетной схеме будут верны следующие соотношения:

$$I_H(t) = I_{H0} \cos(\omega t) \ll I_H(s) = I_{H0} s / (s^2 + \omega_0^2); \quad (8)$$

$$E(s) = E / s; \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_c(s) = I_H(s) + I_{фкц}(s) + I_{уку}(s); \\ E(s) = (X_c + X_T) I_c(s) - I_{фкц}(s) X_{фкц}; \\ I_{уку}(s) = W(s) (k_{с.к} I_H(s) + I_{фкц}(s)); \end{cases} \quad (10)$$

$$U_B(s) = E(s) - X_c (I_H(s) + I_{фкц}(s) + I_{уку}(s)). \quad (11)$$

В результате решения системы (10) из (11) получим:

$$U_{в.ср} = E; \quad (12)$$

$$U_{в.срф} = E (X_{фкц} - X_T) / (X_{фкц} - (X_c + X_T)); \quad (13)$$

$$U_{в.изм} = X_c I_{H0} \left| \frac{(1 + k_{с.к} W(i\omega) X_{фкц})}{X_{фкц} - (X_c + X_T)(1 + W(i\omega))} \right|, \quad (13a)$$

где  $U_{в.ср}$  – среднее значение амплитуды напряжения при подключении СТК или АФ;  $U_{в.срф}$  – среднее значение амплитуды напряжения при подключенных пассивных фильтрах;  $U_{в.изм}$  – амплитуда колебаний амплитуды напряжения.

Для нахождения  $U_{в.изм}$  при подключенных пассивных фильтрах в (13a) достаточно считать  $W = 0$ . При колебаниях амплитуды напряжения, имеющих огибающую синусоидальной формы, в

ГОСТ Р 51317.4.15—99 определено относительное изменение напряжения  $DU/U = g(W)$ , соответствующее  $P_{sr} = 1$ . Тогда при использовании СТК или АФКУ значение фликера и коэффициент ослабления фликера будут определяться выражениями:

$$P_{st} = g(W) \frac{X_c I_{H0}}{E} \left| \frac{(1 + k_{c.k} W(iW) X_{фкц})}{X_{фкц} - (X_c + X_T)(1 + W(iW))} \right|, \quad (14)$$

$$k_{o.ф}(k_{c.k}) = 1 - \left| \frac{(1 + k_{c.k} W(iW) X_{фкц})}{X_{фкц} - (X_c + X_T)(1 + W(iW))} \right|. \quad (15)$$

Для пассивных фильтров

$$P_{st} = g(W) \frac{X_c I_{H0}}{E} \frac{X_{фкц}}{X_{фкц} - X_T}; \quad (14a)$$

$$k_{o.ф} = \frac{X_T}{X_T - X_{фкц}}. \quad (15a)$$

Для частного случая, когда ФКЦ отсутствует, а передаточная функция  $W$  соответствует звену постоянной задержки  $t$ , выражение (15) сводится к следующему:

$$k_{o.ф}(k_{c.k}, W, t) = 1 - \sqrt{1 - 2k_{c.k} \cos(Wt) + k_{c.k}^2}.$$

Графики зависимости  $k_{o.ф} = f(k_{c.k})$  приведены на рис. 2 (1 —  $W = 2\pi \times 5$ ,  $t = 5$  мс; 2 —  $W = 2\pi \times 15$ ,  $t = 15$  мс; 3 —  $W = 8,8\pi \times 5$ ,  $t = 5$  мс; 4 —  $W = 8,8\pi \times 15$ ,  $t = 15$  мс).

Полученные выражения и зависимости позволяют сделать следующие выводы:

1) установка пассивных фильтров или конденсаторных батарей приводит к увеличению фликера в точке общего присоединения;

2) эффективность подавления фликера снижается с ростом частоты колебаний  $W$  и снижением быстродействия КУ;

3) в ряде случаев зависимость  $k_{o.ф}(k_{c.k})$  не монотонна и увеличение мощности КУ приводит к снижению эффективности подавления фликера.

Обобщение полученного результата на случаи более сложной формы изменения реактивной мощности нагрузки невозможно из-за отсутствия у дозы фликера свойства аддитивности по частоте:

$$P_{st}(Q_1(t)) + P_{st}(Q_2(t)) \neq P_{st}(Q_1(t) + Q_2(t)),$$

при  $Q_1(t) = Q_{нгр} \sin(W_1 t)$ ,  $Q_2(t) = Q_{нгр} \sin(W_2 t)$ ,

$$W_1 \neq W_2,$$

где  $P_{st}(Q(t))$  — доза фликера, соответствующая нагрузке  $Q(t)$ .

Для исследования зависимости  $k_{o.ф}(k_{c.k})$  в общем случае необходимо компьютерное моделирование.

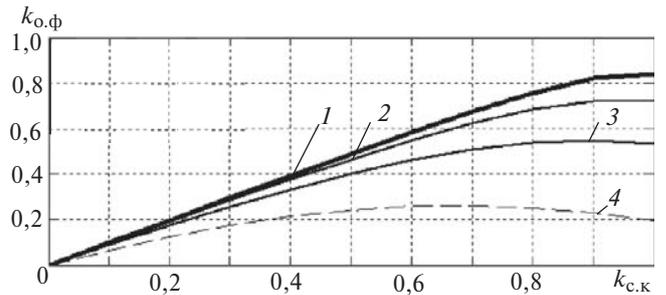


Рис. 2

**Система управления СТК и ее эквивалентная передаточная функция.** Принцип работы СТК основан на том, что компенсация реактивной мощности и тока обратной последовательности может быть всегда обеспечена использованием только реактивных элементов [5]. Уставки амплитуд токов  $I_{abтрг}^*$ ,  $I_{bcтрг}^*$ ,  $I_{caтрг}^*$  ТРГ при соединении фаз в треугольник определяют по формулам преобразования Штейнмица:

$$\begin{aligned} I_{abтрг}^* &= \text{Im}(I_1) - \sqrt{3} \text{Re}(I_2) + \text{Im}(I_2); \\ I_{bcтрг}^* &= \text{Im}(I_1) - 2\text{Im}(I_2); \\ I_{caтрг}^* &= \text{Im}(I_1) + \sqrt{3} \text{Re}(I_2) + \text{Im}(I_2), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $I_1, I_2$  — суммарные токи нагрузки и ФКЦ прямой и обратной последовательности; фаза напряжения прямой последовательности  $U_1$  принята за нуль.

Алгоритм выделения токов прямой и обратной последовательности описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} i_{кoмА}(t) &= i_{фкцА}(t) + k_{c.k} i_{нА}(t); \\ i_{кoмВ}(t) &= i_{фкцВ}(t) + k_{c.k} i_{нВ}(t); \\ i_{кoмС}(t) &= i_{фкцС}(t) + k_{c.k} i_{нС}(t); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{e} i_a(t) &= \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} i_{кoмА}(t) \\ \dot{e} i_b(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} i_{кoмВ}(t) \\ \dot{e} i_c(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} i_{кoмС}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{e} i_a^+(t) &= \dot{e} i_a(t) \\ \dot{e} i_b^+(t) &= \dot{e} i_b(t) \\ \dot{e} i_a^-(t) &= 2\dot{e} i_a(t) - \frac{T}{4} \\ \dot{e} i_b^-(t) &= \dot{e} i_b(t) - \frac{T}{4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Re I_1(t) &= \sin(q_{PLL}(t)) - \cos(q_{PLL}(t)) \\ \Im I_1(t) &= \cos(q_{PLL}(t)) \sin(q_{PLL}(t)) \\ \Re I_2(t) &= 0 \\ \Im I_2(t) &= 0 \end{aligned} \quad \textcircled{R}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin(q_{PLL}(t)) - \cos(q_{PLL}(t)) \\ \cos(q_{PLL}(t)) \sin(q_{PLL}(t)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{e}_{i_a^+}(t) \\ \dot{e}_{i_b^+}(t) \\ \dot{e}_{i_a^-}(t) \\ \dot{e}_{i_b^-}(t) \end{pmatrix} \ddot{u}$$

где  $i_{комА}(t), i_{комВ}(t), i_{комС}(t)$  – мгновенные значения компенсируемых токов;  $i_{фкцА}(t), i_{фкцВ}(t), i_{фкцС}(t)$  – мгновенные значения токов ФКЦ;  $i_{нА}(t), i_{нВ}(t), i_{нС}(t)$  – мгновенные значения токов токов нагрузки;  $T = f_{ном}^{-1}, f_{ном}$  – номинальная частота сети;  $q_{PLL}(t)$  – мгновенное значение фазы напряжения прямой последовательности;  $H_{LP}$  – оператор фильтра низких частот.

Технически это реализуется в схеме СТК, представленной на рис. 3. Формирование требуемых токов осуществляется изменением углов зажигания тиристоров

$$\begin{aligned} I_{ab\text{трГ}}^* &= (U_1 / X) \frac{2\alpha}{\rho e} b_{ab} - \frac{1}{2} \sin(2 b_{ab}) \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \\ I_{bc\text{трГ}}^* &= (U_1 / X) \frac{2\alpha}{\rho e} b_{bc} - \frac{1}{2} \sin(2 b_{bc}) \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \\ I_{ca\text{трГ}}^* &= (U_1 / X) \frac{2\alpha}{\rho e} b_{ca} - \frac{1}{2} \sin(2 b_{ca}) \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

где  $X$  – сопротивление реактора ТРГ. На номинальной частоте сети ФКЦ работают в режиме выдачи реактивной мощности. На частотах, кратных основной, ФКЦ работают в режиме пассивных фильтров соответствующих гармоник. Для СТК, применяемых в качестве КУ на предприятиях, частота настройки фильтров определяется спектрами токов не только ТРГ, но и нагрузки. Поэтому в схеме могут присутствовать фильтры второй ( $\Phi 2$ ), третьей ( $\Phi 3$ ), четвертой ( $\Phi 4$ ) и других гармоник.

Для описанного СТК определим вид эквивалентной одномерной передаточной функции (7). Величине  $I_{ком}(s) = k_{к.с} I_{н}(s) + I_{фкц}(s)$  в пространстве состояний соответствует гармонический сигнал:  $I_{ком} \cos(Wt + j)$ .

При симметричном реактивном токе гармонически изменяющейся нагрузки будут верны соотношения:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{i_{комА}}(t) \\ \dot{e}_{i_{комВ}}(t) \\ \dot{e}_{i_{комС}}(t) \end{pmatrix} \dot{u} = \begin{pmatrix} \dot{e}_{i_{ком}} \cos(Wt + j) \sin(Wt) \\ \dot{e}_{i_{ком}} \cos(Wt + j) \sin(Wt - (2/3)\pi) \\ \dot{e}_{i_{ком}} \cos(Wt + j) \sin(Wt - (4/3)\pi) \end{pmatrix} \dot{u} \quad (19)$$

В результате подстановки (19) в (17) получим:  
 $Re I_1(t) \neq 0; Re I_2(t) \neq 0; Im I_2(t) \neq 0;$   
 $Im I_1(t) \neq H_{LP} \{ \cos(Wt + j) + \cos(Wt + j - \frac{T}{4}) \} / 2.$

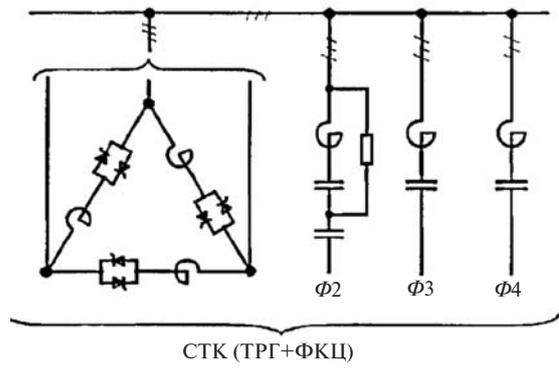


Рис. 3

Тогда для части системы управления СТК, заданной уравнениями (17), одномерная передаточная функция

$$W_{17}(s) = \frac{Im I_1(s)}{I_{ком}(s)} = H_{LP}(s) (1 + \exp(-Ts/4)) / 2.$$

При условии симметричности токов таким же образом определим скалярную передаточную функцию ТРГ (см. рис. 4):

$$Im I_{1\text{ТРГ}}(s) = W_{17}(s) W_{\text{ТРГ}}(s) W_{16}(s) Im I_1(s),$$

где  $W_{16}(s)$  – передаточная функция, соответствующая уравнениям (16) при  $I_2 \neq 0$ .

Как известно [6], эквивалентную передаточную функцию ТРГ можно задать звеном с постоянным запаздыванием, значение которого определим методом компьютерного моделирования по разности фаз сигналов  $Im I_{1\text{ТРГ}}(t)$  и  $Im I_1(t)$  за вычетом запаздывания демодулятора. Искомая задержка составляет 3 мс. Таким образом, эквивалентная передаточная функция всего СТК при условии, что нагрузка является симметричной реактивной и изменяется по гармоническому закону, определяется:

$$W_{\text{СТК}}(s) = H_{LP}(s) (1 + \exp(-Ts/4)) / 2 \exp(-s0,003). \quad (20)$$

**Система управления АФКУ и ее эквивалентная передаточная функция.** Работа АФКУ основана на методах теории мгновенной мощности [7]. Данный подход позволяет выделить в токах нагрузки составляющие активного тока прямой последовательности, которые не должны компенсироваться. Для трехфазных цепей в данной теории вводятся понятия мгновенной действительной  $p(t)$  и мгновенной мнимой  $q(t)$  мощностей:

$$\begin{aligned} p(t) &= e v_a(t) v_b(t) \dot{e}_{i_a}(t) \\ q(t) &= e v_b(t) v_a(t) \dot{e}_{i_b}(t) \\ \dot{e}_{i_a}(t) &= \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} \dot{e}_{i_{нА}}(t) \\ \dot{e}_{i_b}(t) &= \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{e}_{i_{нА}}(t) \end{aligned}$$

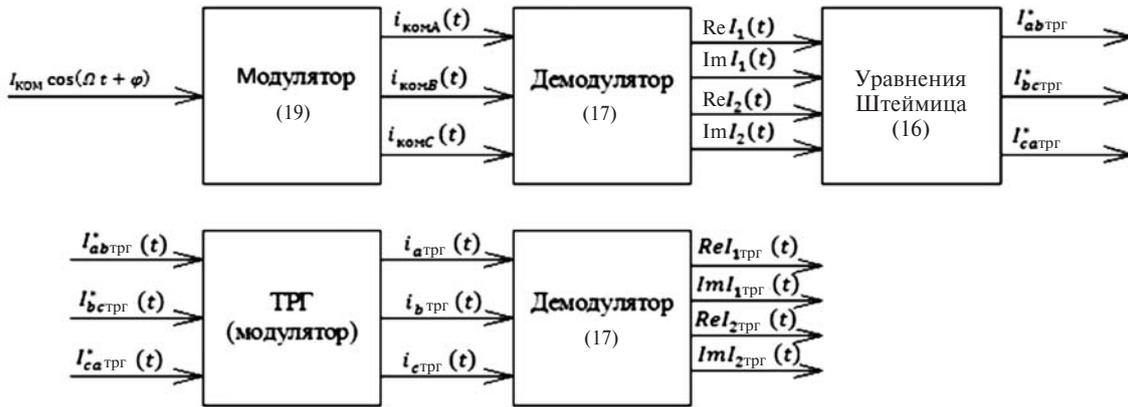


Рис. 4

$$\begin{matrix} \dot{e}v_a(t) \\ \dot{e}v_b(t) \\ \dot{e}v_c(t) \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \end{matrix} \begin{matrix} \ddot{\omega}v_A(t) \\ \ddot{\omega}v_B(t) \\ \ddot{\omega}v_C(t) \end{matrix}$$

где  $v_A(t), v_B(t), v_C(t)$  – сетевое напряжение в общей точке подключения нагрузки и АФ;  $i_{HA}(t), i_{HB}(t), i_{HC}(t)$  – токи нагрузки.

Токи высших гармоник и токи обратной последовательности приводят к тому, что величина  $p(t)$  является переменной даже при постоянном значении нагрузки. Составляющие  $i_a^*(t), i_b^*(t)$  токов нагрузки, подлежащие компенсации, определяются по формуле

$$\begin{matrix} \dot{e}i_a^*(t) \\ \dot{e}i_b^*(t) \end{matrix} = \frac{1}{v_a(t)^2 + v_b(t)^2} \begin{matrix} \dot{e}v_a(t) & v_b(t) \\ \dot{e}v_b(t) & -v_a(t) \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \dot{e}p(t) \\ \dot{e}q(t) \end{matrix} = \begin{matrix} \tilde{p}(t) \\ \tilde{q}(t) \end{matrix} - Dp_E(t) \quad \tilde{p}(t) = H_{LP}\{p(t)\}; \quad (21)$$

$$Dp_E(t) = k_E(t)(E(t) - E_{ref}), \quad (22)$$

где  $H_{LP}$  – оператор фильтра низких частот;  $E(t)$  и  $E_{ref}$  – текущее значение и уставка энергии, запасенной в емкостных накопителях АФКУ;  $k_E$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора балансирования энергии.

С помощью обратного преобразования Кларка из  $i_a^*(t), i_b^*(t)$  находят уставки  $i_{a\_af}^*(t), i_{b\_af}^*(t), i_{c\_af}^*(t)$  фазных токов активного фильтра. Упрощенная схема преобразователя напряжения (ПН) для АФКУ приведена на рис. 5.

Управление токами  $i_{a\_af}(t), i_{b\_af}(t), i_{c\_af}(t)$  в преобразователях напряжения осуществляется изменением напряжений  $u_a, u_b, u_c$ :

$$u_a = v_a + K_p(i_{a\_af}^* - i_{a\_af});$$

$$u_b = v_b + K_p(i_{b\_af}^* - i_{b\_af});$$

$$u_c = v_c + K_p(i_{c\_af}^* - i_{c\_af}),$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорционального регулятора тока.

Величины  $u_a, u_b, u_c$  формируются из постоянного напряжения широтно-импульсной модуляцией.

При симметричном токе нагрузки и достаточно большом коэффициенте  $k_E$  в (22)  $p(t) - \tilde{p}(t) - Dp_E(t) \gg 0$ . Тогда передаточная функция АФКУ при компенсации чисто реактивного тока нагрузки с хорошей точностью равна единице на рассматриваемом диапазоне частот (до сотен Гц).

**Компьютерное моделирование работы фликеркомпенсаторов.** Трехфазная тестовая модель, однолинейная схема которой представлена на рис. 1, реализована в программе Matlab SPS. Частота сети 50 Гц, шаг интегрирования модели 50 мкс. Компенсирующие устройства моделируются с детализацией до уровня силовых ключей. В статье использованы те же модели СТК и АФКУ, что и в [3], их основные параметры приведены далее:

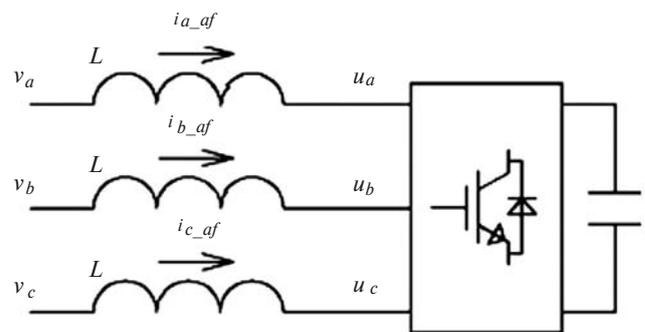


Рис. 5

для СТК

Мощность ФКЦ $S_{фкц.ном}$	25 Мвар
Мощность ТРГ $S_{трг.ном}$	35 Мвар
Номинальное напряжение $U_{ном}$	10 кВ
Номера гармоник фильтров	2, 3, 4
Добротность фильтров 3-й и 4-й гармоник	150
Добротность фильтра 2 (С-типа)	15

Для АФКУ

Номинальная мощность $S_{ном}$	12Мвар
Номинальное напряжение $U_{ном}$	10 кВ
Число submodule в преобразователе $N$	120 шт.
Номинальный ток submodule (RMS) $I_{ном}$	500А
Емкость КБ submodule $C_{кб.эКВ}$	4 мФ
Средняя частота коммутаций ключей submodule $F_{SW}$	475Гц

Фазные напряжения, измеренные в узле « $U_B$ », обрабатываются фликерметром согласно ГОСТ Р 51317.4.15—99. Нагрузка представлена управляемым источником тока. Фильтры низких частот в (17) для СТК и в (21) для АФКУ заданы уравнениями:

$$H(s) = 1 / (1 + 0,01s); \tag{23}$$

$$H(s) = (1 - e^{-0,02s}) / (0,02s). \tag{23a}$$

При выборе их структуры и параметров рассматривалась работа фликеркомпенсатора с учетом симметрирования токов нагрузки. Настройка фильтров определяется неким компромиссом между минимизацией фазовой задержки и шириной полосы подавления.

**Эксперимент 1.** Для проверки аналитической зависимости (18), характеризующей влияния пассивных фильтров на фликер, примем, что активное

сопротивление сети равно нулю; ток нагрузки симметричный и чисто реактивный; амплитуда тока изменяется по гармоническому закону (7) с  $I_{н0} = 300$  А (на стороне 10 кВ);  $U_K$  трансформатора равно 12%. Расчетные и аналитические значения коэффициента ослабления фликера ( $K_{о.ф.р}$  и  $K_{о.ф.а}$ ) при различных значениях сопротивления сети  $X_c$ , мощности трансформатора  $S_T$ , мощности ФКЦ и разной частоте модулирующего сигнала приведены в таблице.

Данный эксперимент, во-первых, демонстрирует эффект усиления фликера пассивными фильтрами (отрицательный коэффициент ослабления фликера). Во-вторых, относительная ошибка формулы (15) не превышает 10% для частоты  $F \approx 5$  Гц. В-третьих, коэффициент ослабления фликера не зависит от сопротивления сети, а определяется только соотношением сопротивления трансформатора и ФКЦ.

**Эксперимент 2.** Для проверки аналитической зависимости (15а) примем, что активное сопротивление сети равно нулю; ток нагрузки симметричный и чисто реактивный; амплитуда тока изменяется по гармоническому закону (7) с  $I_{н0} = 300$  А (на стороне 10 кВ);  $u_K$  трансформатора равно 12%, мощность трансформатора  $S_T = 25$  МВА; сопротивление сети  $X_c = 30$  Ом. Параметры СТК и АФКУ приведены ранее. Передаточные функции СТК и АФКУ заданы:

$$W_{стк}(s) = - \exp(- (0,005 + 0,003)s) / (1 + 0,01s); \tag{24}$$

$$W_{аф}(s) = - 1. \tag{24a}$$

Номер расчета	Значение параметра					
	$X_c$ , Ом	$S_T$ , МВА	$S_{ф}$ , Мвар	$P_{st}$	$K_{о.ф.а}$	$K_{о.ф.р}$
Частота $W = 2$ Гц						
1	30	25	0	1,309	0	0
2	30	25	10	1,375	-0,05	-0,051
3	30	25	20	1,449	-0,106	-0,107
4	30	50	0	1,309	0	0
5	30	50	10	1,341	-0,025	-0,025
6	30	50	20	1,375	-0,050	-0,051
7	15	25	0	0,655	0	0
8	15	25	10	0,688	-0,050	-0,051
9	15	25	20	0,724	-0,106	-0,107
10	15	50	0	0,655	0	0
11	15	50	10	0,671	-0,025	-0,025
12	15	50	20	0,688	-0,050	-0,051

Частота $W = 5$ Гц						
13	30	25	0	2,914	0	0
14	30	25	10	3,072	-0,050	-0,054
15	30	25	20	3,250	-0,106	-0,115
16	30	25	0	2,914	0	0
17	30	50	10	2,993	-0,025	-0,027
18	30	50	20	3,076	-0,050	-0,055
19	15	25	0	1,458	0	0
20	15	25	10	1,535	-0,050	-0,053
21	15	25	20	1,623	-0,106	-0,113
22	15	50	0	1,458	0	0
23	15	50	10	1,495	-0,025	-0,026
24	15	50	20	1,536	-0,050	-0,054
Частота $W = 8,8$ Гц						
25	30	25	0	4,60	0	0
26	30	25	10	4,886	-0,050	-0,062
27	30	25	20	5,227	-0,106	-0,136
28	30	50	0	4,60	0	0
29	30	50	10	4,746	-0,025	-0,032
30	30	50	20	4,910	-0,050	-0,067
31	15	25	0	2,299	0	0
32	15	25	10	2,437	-0,050	-0,060
33	15	25	20	2,597	-0,106	-0,130
34	15	50	0	2,299	0	0
35	15	50	10	2,368	-0,025	-0,030
36	15	50	20	2,442	-0,05	-0,062

Коэффициенты корреляции  $R^2$  аналитических моделей и расчетных данных равны:

Частота, Гц	Значение $R^2$	
	для СТК	для АФ
2,0	0,998	0,999
5,0	0,996	0,999
8,8	0,848	0,999

Графики зависимости  $k_{о.ф.}(k_{с.к.})$  для СТК и АФКУ при частотах 5 и 8,8 Гц приведены на рис. 6 (для аналитических моделей: 1; 2 — АФКУ  $W = 8,8$  Гц и 5 Гц соответственно; 3 — СТК  $W = 5$  Гц; 4 — СТК  $W = 8,8$  Гц; \*,  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $\square$  — расчет).

Из полученных данных следует, что аналитические модели (15) для АФКУ хорошо согласуются с данными численного моделирования для всего рассмотренного диапазона частот от 2 до 8,8 Гц. Для СТК аналитические модели согласуются с данными численного моделирования для частот не более 5 Гц.

**Эксперимент 3.** Часто превышение допустимых по ГОСТ доз фликера наблюдается в слабых сетях,

питающих металлургические предприятия с дуговыми сталеплавильными пегами (ДСП). Поэтому исследование эффективности ослабления фликера для подобных потребителей особенно актуально. Для моделирования работы дуговой печи используется управляемый источник тока. Фрагмент осци-

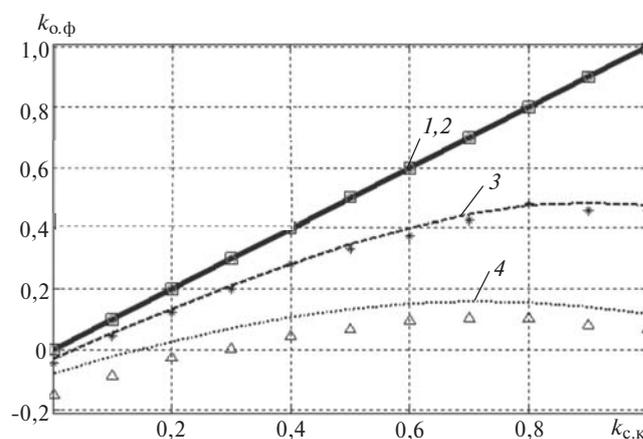


Рис. 6

лограммы линейного тока нагрузки приведен на рис. 7. Использованы данные реального замера токов ДСП. Максимальное значение потребляемой реактивной мощности составляет 10 Мвар, среднее значение  $\cos\varphi$  равно 0,7, а коэффициент обратной последовательности нагрузочного тока достигает 50%.

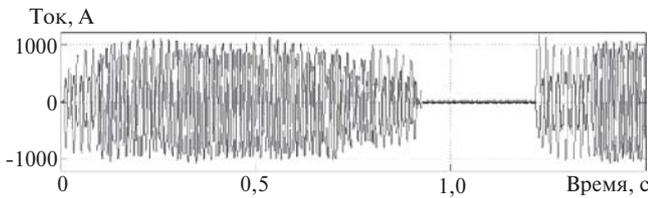


Рис. 7

Доза фликера зависит от формы нагрузочного тока на всем временном интервале расчета. Расчеты коэффициента ослабления фликера от степени компенсации проведены для трех замеров тока печи при  $X_c$ , равном 30, 15 и 10 Ом (во всех случаях  $R_c = 0$ ). Зависимости  $k_{o,ф}(k_{c,к})$  немного различаются по фазам из-за несимметричности нагрузки. Таким образом, для каждого значения  $k_{c,к}$  получены 27 различных значений  $k_{o,ф}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 8. Для каждого значения  $k_{c,к}$  на графике приведены наибольшее значение (верхняя граница — ВГ), среднее арифметическое (СА) и наименьшее значение (нижняя граница — НГ). С ростом  $X_c$  происходит смещение вниз зависимости  $k_{o,ф}(k_{c,к})$ , т.е. эффективность фликеркомпенсатора снижается. Однако для СТК влияние  $X_c$  существенно выше, чем для АФКУ. Нижняя граница зависимости  $k_{o,ф}(k_{c,к})$  АФКУ существенно выше верхней границы этой же зависимости для СТК на всем диапазоне значения  $k_{c,к}$ . Однако верхняя граница для АФКУ ниже полученной аналитически. Данный эффект объясняется несимметрией и наличием активной составляющей тока нагрузки. Несмотря на то, что спектр тока ДСП многочастотный, среднее арифметическое значение зависимостей  $k_{o,ф}(k_{c,к})$  для СТК совпадает с аналитической зависимостью для частоты 8,8 Гц со среднеквадратичным отклонением 0,006.

Участки зависимости  $k_{o,ф}(k_{c,к})$  ниже нуля соответствуют зонам отрицательного влияния СТК на ПКЭ.

Рассмотрим работу фликеркомпенсаторов при  $R_c \neq 0$ . В тестовой схеме примем  $X_c = 30$  Ом, а  $R_c = 15$  Ом. При этом соотношение мощности сети к мощности нагрузки равно 28, а значения доз фликера  $P_{st}$  при отсутствии КУ составят 3,78 для фазы А, 3,24 для фазы В и 3,63 для фазы С. На рис. 9 приведены зависимости  $k_{o,ф}(k_{c,к})$  для СТК и АФ. При низкой добротности сети ( $X/R = 2$ ) эффективность АФКУ снижается, поскольку без накопителя АФКУ не способно сгладить колебания

активной мощности нагрузки. Согласно ГОСТ значение  $P_{st}$  не должно превышать 1,38, откуда следует, что минимально необходимая степень ослабления фликера  $k_{o,ф} = \frac{P_{st}(0) - P_{st} k_{c,к}}{P_{st}(0)} = \frac{3,78 - 1,38}{3,78} = 0,63$

(для фазы А). Применение фликеркомпенсатора на базе СТК в данном случае не способно обеспечить требуемое качество электроэнергии. Максимальный коэффициент ослабления для СТК составляет 0,24. При этом абсолютное значение дозы фликера составляет 3,12. Для АФКУ нормализация ПКЭ достигается при  $k_{o,ф} = 0,63$ , чему соответствует степень компенсации 0,9. Эффективность АФКУ  $h(k_{c,к}) = \frac{k_{o,ф}(k_{c,к})}{S_{\min}(k_{c,к}) / (S_c)} = \frac{0,68}{(12) / (390)} = 22,1$ ; эффективность СТК  $\frac{0,20}{(35) / (390)} = 2,2$ .

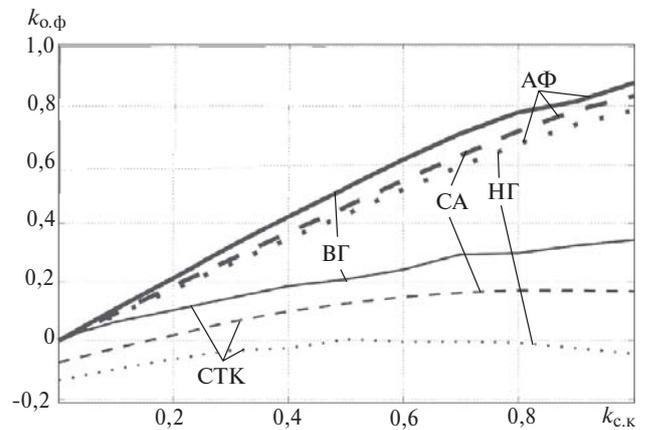


Рис. 8

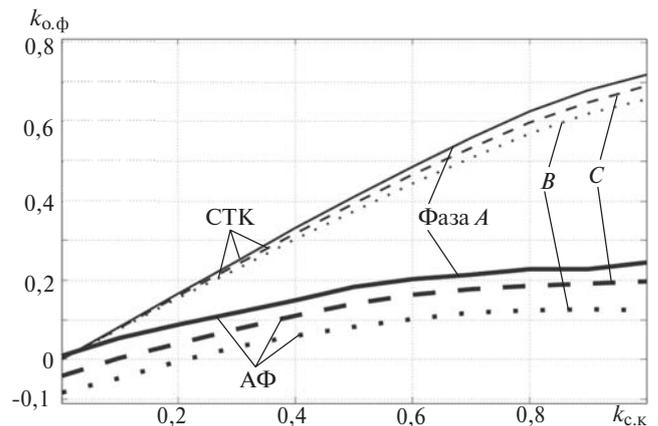


Рис. 9

**Выводы.** Предложенный подход может быть использован для предварительной оценки эффективности компенсации фликера рассматриваемыми устройствами. Установка пассивных фильтров или конденсаторных батарей приводит к увеличению фликера в точке общего присоединения; эффективность подавления фликера снижается с ростом

частоты колебаний и снижением быстродействия КУ; а в ряде случаев зависимость  $k_{о.ф}(k_{с.к})$  не монотонна и увеличение мощности КУ приводит к снижению эффективности подавления фликера. При повышении допустимых доз фликера в точке присоединения резкопеременной нагрузки рекомендуется замена пассивных фильтров на АФКУ. Для несимметричной резкопеременной нагрузки типа ДСП получены зависимости коэффициента ослабления фликера от коэффициента степени компенсации оценки эффективности подавления фликера при использовании СТК и АФКУ. При отсутствии экспериментальных данных для конкретной нагрузки возможно использование полученных в работе зависимостей для выбора мощности КУ и оценки эффекта от его установки. Отличие от АФКУ работа СТК может приводить к увеличению фликера при определенных соотношениях мощности КУ и нагрузки. За счет большего быстродействия АФКУ эффективнее за счет большего коэффициента ослабления фликера при меньшей установленной мощности оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salor O., Gultekin B., Buhan S., Boyrazoglu B., Inan T., Atalik T., Acik A., Terciyani A., Unsar O., Altinras E., Akkaya Y., Akkaya Y., Ozdemirci E., Cadici I., Ermis M. Electrical power quality of ironandstee industryin Turkey. — IEEEET ransactionson Industry Applications, 2010, vol. 46, pp. 60—80.
2. Walshe K.A. Flicker frequency changing effects with a TSC applied to a woodchip mill. — Proc. Intern. Conf. on Power System Transients (IPST 05). —Monreal (Canada), 2005, Paper no. IPST05-061.
3. Дроздов А.В., Киселев А.Н., Матинян А.М. Применение модульных многоуровневых преобразователей для улучшения качества электроэнергии в точке присоединения резкопеременной нагрузки. — ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2014, №.1, с. 19—23.
4. Нечаев. О.П. Оценка колебаний напряжения и определение мощности фликеркомпенсатора. — Электротехника, 1990, № 9, с. 71—73.
5. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий.—М.: НЦ ЭНАС, 2002, 248 с.
6. Padiar K.R. FACTS: controllers in power transmission and distribution. New Age International Ltd, 2007, 532 pp.
7. Akagi, Watanabe, Aredes. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. — The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007, 379 pp.

[09.06.14]

*Авторы: Матинян Александр Маратович окончил в 2008 г. магистратуру Московского физико-технического института (ГУ). Ведущий инженер центра высоковольтной преобразовательной техники ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (НТЦ ФСК ЕЭС).*

*Киселев Алексей Николаевич окончил в 2003 г. Институт электротехники Московского энергетического института (МЭИ) (ТУ). В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка математических моделей управляющих элементов электрических цепей для решения задач оптимизации» в МЭИ (ТУ). Заместитель начальника центра высоковольтной преобразовательной техники ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».*

*Дроздов Андрей Владимирович окончил в 2005 г. Институт электротехники МЭИ. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы бездатчикового векторного управления вентиляльно-индукторным двигателем с независимым возбуждением» в МЭИ (ТУ). Технический директор ООО «НТЦ «САУРУС ЭНЕРГО».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 12, pp. 4—13.*

## A Comparative Analysis of Flicker Suppression by a Static Thyristor Compensator and an Active Filtering and Compensating Device

A.M. MATINYAN, A.N. KISELEV and A.V. DROZDOV

*Factors causing the occurrence of flicker are pointed out, and the algorithms and operating principles of flicker compensators constructed on the basis of static thyristor compensators (STCs) and active filtering and compensating devices (AFCDs) are presented. Analytical dependences of the flicker suppression efficiency on the parameters of load and compensating devices are obtained for the cases regulated by the relevant Russian State Standard (GOST). The influence of passive filters on flicker is considered. The obtained dependences are verified using the developed digital models of flicker compensators. Dependences of flicker suppression efficiency on the flicker compensator capacity are obtained on the digital models of STCs and AFCDs for real measurements of arc steel melting furnace load current. It is shown that under certain conditions STC operation may lead to increase of flicker. Owing to its higher speed of response, an AFCD is more technically efficient (has a better flicker attenuation ratio) than an STC. It should be noted that in case of using an AFCD, the same technical effect is achieved with a smaller installed capacity of equipment, due to which it is a more economically efficient choice than an SCT.*

Key words: *flickers uppressi on efficiency, STC, AFCD, steel-making electric arc furnace, computer modeling*

## REFERENCES

1. Salor O., Gultekin B., Buhan S., Boyrazoglu B., Inan T., Atalik T., Acik A., Terciyanli A., Unsar O., Altinras E., Akkaya Y., Akkaya Y., Ozdemirci E., Cadici I., Ermis M. Electrical power quality of ironandsteel industryin Turkey. — IEEEET ransactionson Industry Applications, 2010, vol. 46, pp. 60–80.
2. Walshe K.A. Flicker frequency changing effects with a TSC applied to a woodchip mill. — Proc. Intern. Conf. on Power Sysytem Transients (IPST 05). —Monreal (Canada), 2005, Paper no. IPST05-061,pp.
3. Drozdov A.V., Kiselev A.N., Matinyan A.M. *ELEKTRO Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'* (ELECTRO Electrical engineering, electric power, electrotechnical industry), 2014, No. 1, pp. 19–23.
4. Nechayev O.P. *Electrotehnika (Electrical Engineering)*, 1990, No. 9, pp. 71–73.
5. Kochkin V.I., Nechayev O.P. *Primeneniye staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moschnosti v elektricheskikh setyakh energosistem I predpriyatii* (Application of static reactive power compensators in the electric networks of power systems and enterprises). Moscow. Scientific Centre «ENAS», 2002, 248 p.
6. Padiar K.R. *FACTS: controllers in power transmission and distribution*. New Age International Ltd, 2007, 532 pp.
7. Akagi, Watanabe, Aredes. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. — The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007, 379 pp.

*Authors: Matinyan Aleksandr Maratovich (Moscow, Russia) – Leading Engineer of the Department at the JSC «Scientific and Technical Centre of the Federal Grid Company of Unified Energy System» (STC FGC UES).*

*Kiselev Aleksei Nikolayevich (Moscow, Russia) – Cand. Techn.Sci., Deputy Head of the Department at the STC FGC UES.*

*Drozdov Andrei Vladimirovich (Moscow, Rossia) – Cand.Tech.Sci., Technical Director of the LLC «Scientific and Technical Centre «SAURUS ENERGO».*

