

ОПЕРАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА НАГРУЗКИ
АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ
СТАТИЧЕСКИХ ИРМ

Р. И. ОСТАПЕНКО, Н. Е. ЧЕРНЫЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических систем и сетей)

В [1] рассмотрен круг вопросов, связанных с регулированием режима электрических систем и дальних электропередач и повышения их устойчивости при помощи управляемых статических источников реактивной мощности (ИРМ). Предварительные проработки свидетельствуют о том, что управляемые статические ИРМ могут быть использованы и для регулирования режима электропотребления нагрузок.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с использованием статических ИРМ для оперативного регулирования тока нагрузки кремниевой преобразовательной подстанции (КПП) алюминиевого завода.

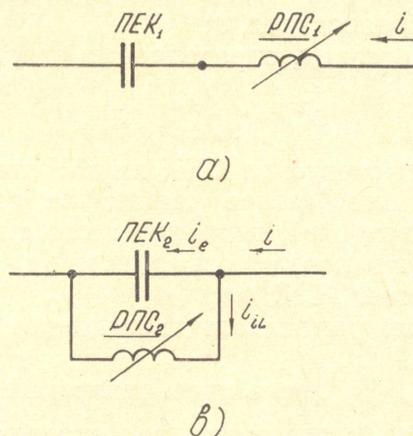


Рис. 1

На рис. 1 приведены принципиальные схемы ИРМ. Рассматриваемые схемы управляются реакторами переменного сопротивления (РПС), включенными последовательно или параллельно с конденсаторной батареей. С учетом этого, при граничных условиях регулирования $x_{p1} = 0$, $x_{p2} = \infty$ возникают схемы обычной продольной компенсации (ПЕК) нагрузки. Это позволяет использовать в исследованиях в той или иной мере анализ и основные соотношения продольно компенсированной КПП, приведенные в [2, 3].

Регулировочные свойства ИРМ с последовательно включенным РПС

Для схемы рис. 1 а, учитывая то, что оперативный диапазон регулирования сравнительно мал ($\pm 5\%$ от среднего тока нагрузки), считаем нагрузочный режим КПП в процессе регулирования неизменным. С учетом этого анализ регулировочной характеристики приведем с помощью известных соотношений [2, 3, 4], выразив переменные в виде суммы постоянных и их приращений.

Поскольку из технологических соображений электролиза необходимо поддерживать постоянство тока нагрузки при переменном сопротивлении нагрузки, принимаем постоянными ток нагрузки КПП и э. д. с. системы. При этом условии уравнение, связывающее изменение выпрямленного напряжения и угла коммутации с изменением реактивного сопротивления в цепи коммутации вентилей для I и II нагрузочного режима КПП, имеет вид

$$\frac{(I')^2}{3\sin^2 \frac{\gamma}{2}} + \frac{(\tau - \Delta\tau)^2}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} = 1, \quad (1)$$

где

$$I' = I \left[1 - v^2 \gamma \left(3,73 \cdot \frac{\pi}{6} - \frac{\gamma}{2} \right) \right], \quad (2)$$

I — относительное значение тока нагрузки эквивалентного «моста звезды» или «моста треугольника», равное $\frac{I_d(x_a + x_p)}{\sqrt{2} E_2}$;

τ — относительное значение выпрямленного значения напряжения КПП;

γ — угол коммутации вентилей, эл. град;

I_d — ток нагрузки эквивалентного «моста звезды» или «треугольника» КПП, равный половине тока нагрузки КПП, а;

E_2 — действующее значение э. д. с. питающей системы, приведенное к шинам преобразователя, в;

v^2 — степень компенсации, определяемая отношением

$$[v^2 = \frac{x_c}{x_a + x_p};$$

x_c — емкостное сопротивление ПЕК на частоте 50 гц, в см;

x_a — естественное или базовое реактивное сопротивление в цепи коммутации вентилей, эквивалентного «моста звезды», ом;

x_p — изменение индуктивного сопротивления в цепи коммутации вентилей за счет РПС, ом;

$\Delta\tau$ — приращение выпрямленного напряжения в относительных единицах.

Из уравнения (1), (2) после преобразований получим выражение, связывающее в явном виде параметры регулирования КПП $x = \frac{x_p}{x_a}$,

$(\tau - \Delta\tau)$ и γ , при I_d и $E_2 = \text{const.}$

$$\bar{x} = -(1 - v_0^2) + \sqrt{(1 - v_0^2)^2 + \frac{3\text{tg}^2 \frac{\gamma}{2}}{I_0^2} (2\tau_0 - \Delta\tau^2)}, \quad (3)$$

где

τ_0 — относительное значение выпрямленного напряжения при $x_p = 0$;

I_0 — относительное значение тока нагрузки некомпенсированной КПП при $x_p = 0$;

γ_0^2 — степень компенсации КПП при $x_p = 0$.

Из (3) следует, что регулирование возможно только вниз от значения τ_0 . Однако за счет подбора соответствующей степени компенсаций всегда можно сделать так, чтобы в процессе регулирования преобладал компенсирующий эффект ИРМ.

Уравнение (3) легко может быть преобразовано для второго нагрузочного режима, заменой γ в соответствии с равенством $\frac{\gamma}{2} = 15$.

Расчет мощности элементов ИРМ

С помощью соотношения (3) при заданной величине γ_0^2 нетрудно найти требуемую мощность РПС и ПЕК:

$$Q_{\text{РПС}} = 3\bar{x}x_a I_1^2 \cong 3\bar{x} \cdot x_a \cdot \frac{2,5 I_d^2}{c^2}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{ПЕК}} \cong 3\gamma_0^2 x_a \frac{2,5 I_d^2}{c^2}, \quad (5)$$

где

I_1 — действующее значение линейного первичного тока, приближенно равно [2] $I_1 \cong 0,79 \frac{2I_d}{c}$;

c — коэффициент трансформации.

Пример. Определим требуемую мощность реактора и батареи ПК при условии, что $E_d = 496$ в, $I_0 = 0,21$, $\tau_0 = 0,925$, $\Delta\tau = 0,05$, $3 \operatorname{tg}^2 15^\circ = 0,216$, $x_a = 0,72$ ом, $c = 31,6$, $2I_d = 1 \cdot 65 \cdot 10^3$, $\gamma_0^2 = 0,4$.

$$\bar{x} = -(1 - 0,4) + \sqrt{(1 - 0,4)^2 - \frac{0,216}{0,21} 2(0,05^2 - 20,05 \cdot 0,925)} \cong 0,3,$$

$$Q_{\text{РПС}} = 0,72 \frac{1}{31,6^2} 0,3 \cdot 31,65^2 \cdot 10^6 \cdot 0,79^2 = 11 \text{ мвар},$$

$$Q_{\text{ПЕК}} = 0,4 \cdot 0,72 \frac{1}{31,6^2} 31,65^2 \cdot 10^6 \cdot 0,79^2 = 14 \text{ мвар}.$$

Регулировочные свойства ИРМ с параллельно включенным РПС.

При параллельном включении РПС и ПЕК (рис. 1 б) ИРМ представляет собой регулируемый контур LC , который существенно изменит режим работы КПП. Поэтому, прежде чем анализировать регулировочные свойства ИРМ, необходимо получить основные соотношения для КПП.

Точный анализ электромагнитных переходных процессов в 12-фазном эквивалентном, параллельном выпрямителе сопряжен с решением интегральных уравнений и определения постоянных интегрирования, что представляет собой сложную и громоздкую задачу. Вместе с тем, анализ формы кривой напряжения на контуре LC , при реальных параметрах этого контура и рабочих значениях тока нагрузки КПП показывает, что с достаточной для практики точностью падение напряжения на контуре LC может быть определено по первой гармонике первичного тока.

Эквивалентная схема продольно-компенсированной КПП с регулируемой степенью компенсации приведена на рис. 2. Амплитудное значение падения напряжения на конденсаторах УПК в (схема рис. 2) от тока основной гармоники найден как

$$|U_k| = 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - \gamma_k^2}; \quad \gamma_k^2 = \frac{x_c}{x_p}.$$

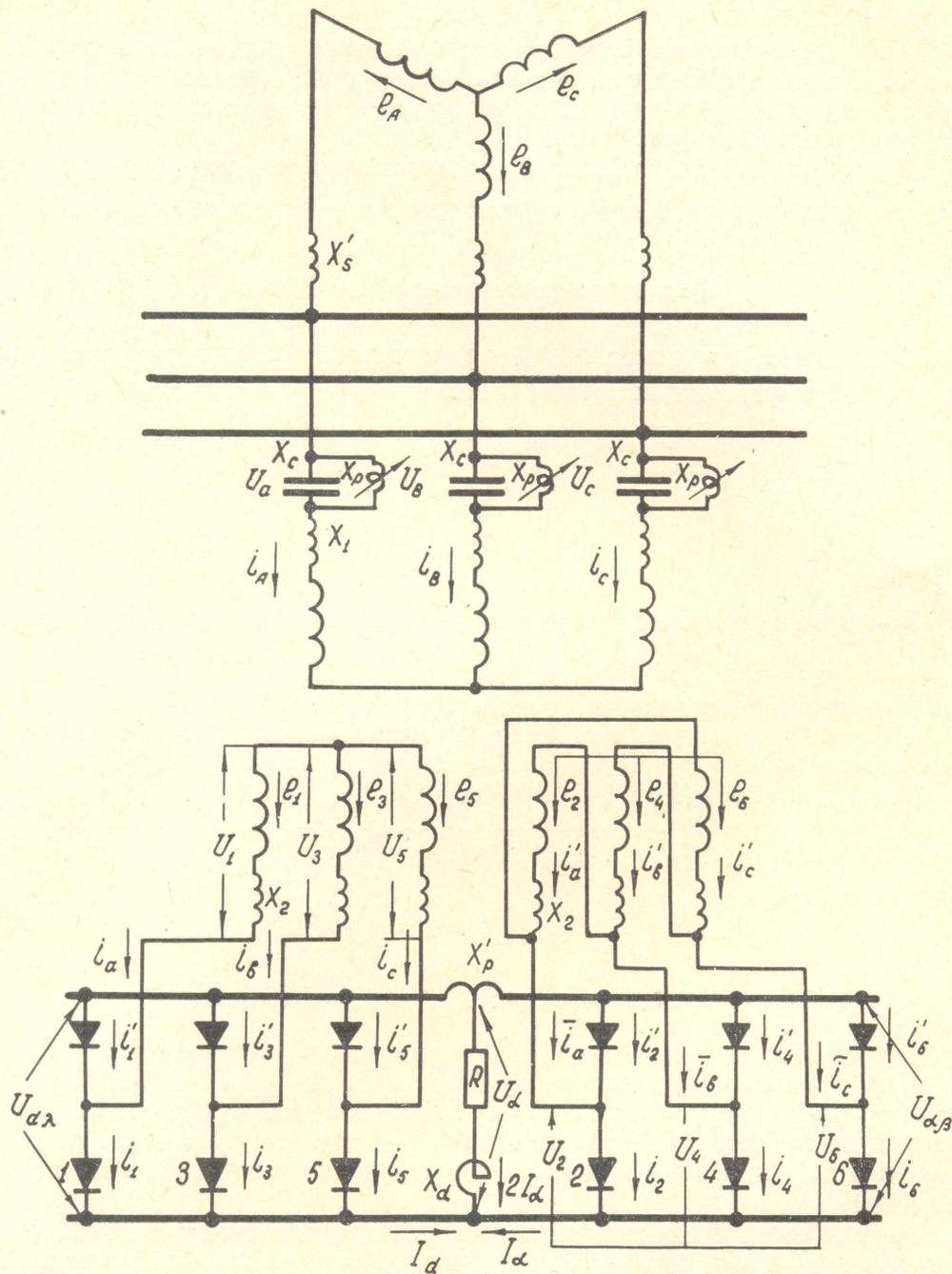


Рис. 2. Принципиальная схема продольно-компенсированной ПП с плавно регулируемой степенью компенсации ПП. Показанные на рисунке реактивности приведены к вторичной звезде

Фаза напряжения U_K будет определяться фазовым углом комплексного сопротивления Z_K и фазовым углом тока I_1 .

При задании фазных э. д. с. источника в виде

$$e_A = \sqrt{2} E_2 \sin V,$$

$$e_B = -\sqrt{2} E_2 \cos(V - 30^\circ), \quad e_C = \sqrt{2} E_2 \cos(V + 30^\circ)$$

с учетом обозначения фазового угла тока через φ_e , выражения для мгновенных значений тока i , запишем в виде

$$i_{1,A} = \sqrt{2} I_1 \sin(V - \varphi_e), \quad i_{1,B} = -\sqrt{2} I_1 \cos(V - 30^\circ - \varphi_e),$$

$$i_{1,C} = \sqrt{2} I_1 \cos(V + 30^\circ - \varphi_e).$$

При $v_k^2 < 1$ сопротивление контура имеет емкостный характер и может быть выражено как

$$Z_k = \frac{x_c}{1 - v_k^2} e^{-i90^\circ}. \quad (6)$$

С учетом этого, мгновенное значение напряжения на контуре запишем в виде:

$$U_{K,A} = -2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos(V - \varphi_e), \quad (7)$$

$$U_{K,B} = -2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sin(V - 30^\circ - \varphi_e), \quad (8)$$

$$U_{K,C} = -2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sin(V + 30^\circ - \varphi_e). \quad (9)$$

Подставим полученные выражения в уравнения (8), (10), (12), приведенные в [3], получим систему дифференциальных уравнений мостовой 12-фазной эквивалентной схемы выпрямления при включении в ее силовую цепь контура.

$$U_1 = \sqrt{2} E_2 \sin V - x_a \frac{d(i_1 - i'_1)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_2 - i'_2 - i_4 + i'_4)}{dV} + 2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos(V - \varphi_e), \quad (10)$$

$$U_3 = -\sqrt{2} E_2 \cos(V - 30^\circ) - x_a \frac{d(i_3 - i'_3)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_4 - i'_4 - i_6 + i'_6)}{dV} + 2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sin(V - 30^\circ - \varphi_e), \quad (11)$$

$$U_5 = \sqrt{2} E_2 \cos(V + 30^\circ) - x_a \frac{d(i_5 - i'_5)}{dV} - \frac{x_3}{\sqrt{3}} \frac{d(i_6 - i'_6 - i_2 + i'_2)}{dV} - 2,23I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sin(V + 30^\circ - \varphi_e), \quad (12)$$

где

V — угловая текущая координата;

$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$ — мгновенные значения токов в анодных группах вентилей, a ;

$i'_1, i'_2, i'_3, i'_4, i'_5, i'_6$ — мгновенные значения токов, a ; в катодных группах вентилей,

U_1, U_2, U_3 — мгновенные значения фазных напряжений, приложенных к порам вентилей «моста звезды» 1,1', 2,2'; 3,3' соответственно, b ;

x_3 — результирующий реактанс питающей системы, om .

Для определения момента зажигания вентиля 1 при горении вентилей 5; 4; 6; 3 составим баланс напряжений в коммутирующем контуре (вентилей 1,5) и приравняем его к нулю.

$$U_1 - U_5 = \sqrt{6} E_2 \sin(V - 30^\circ) - x_a \frac{d(i_1 - i_5)}{dV} + \\ + 2,23 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \sqrt{3} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e) = 0. \quad (13)$$

Поскольку в начальный момент коммутации $i_1 = 0$; $\frac{di_5}{dV} = 0$, получим

$$\sqrt{6} E_2 \sin(V - 30^\circ) + 3,68 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e) = 0. \quad (14)$$

Записанное равенство тождественно выполняется при $V = \Psi$ углу зажигания очередного вентиля, в данном случае вентиля 1.

Прежде чем найти из (14) значение Ψ на основании [2], заменим угол φ_e значением $\varphi_e = \pm \alpha + f(\gamma)$. С учетом этого угол $-30^\circ \pm \alpha - f(\gamma) = -\Psi - f(\gamma)$.

Здесь α — угол саморегулирования, который представляет собой положительную или отрицательную разность между углом зажигания Ψ и углом 30° .

С учетом вышеизложенного выражение (14) примет вид

$$\sqrt{6} E_2 \sin(\psi - 30^\circ) + 3,86 I_d \frac{x_c}{1 - v_k^2} \cos[-f(\gamma)] = 0. \quad (15)$$

Решив (15) относительно Ψ с учетом соотношения $f(\gamma) \approx \frac{\gamma}{2}$ [2], после преобразований получим

$$\psi \approx 30^\circ - \arcsin 2,23 \frac{J_0 v^2}{1 - v_k^2} \cos \frac{1}{2} \gamma. \quad (16)$$

Среднее значение выпрямленного тока КПП. При $V > \Psi$; $i_1 > 0$; $\frac{di_5}{dV} \neq 0$, кроме того, $-\frac{di_1}{dV} = \frac{di_5}{dV}$. С учетом этого после преобразований уравнение (15) примет вид

$$\frac{di_1}{dV} = \frac{\sqrt{6} E_2}{2x_a} \sin(V - 30^\circ) + 1,93 I_d \frac{v^2}{1 - v_k^2} \cos(V - 30^\circ - \varphi_e). \quad (17)$$

Проинтегрируем (17) в интервалах $\Psi \leq V \leq \Psi + \gamma$, после преобразований получим

$$I_d \approx \frac{\sqrt{6} E_2 [\cos(\psi - 30^\circ) - \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)]}{2x_a \left(1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2} \right)}$$

или в относительных единицах

$$J \approx 0,866 \frac{\cos(\psi - 30^\circ) - \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)}{1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (18)$$

для второго нагрузочного режима ($\gamma = 30^\circ$)

$$J \approx 0,866 \frac{\cos(\psi - 30^\circ) - \cos \psi}{1 - \frac{v^2}{1 - v_k^2}}. \quad (18a)$$

Определение среднего значения выпрямленного напряжения в случае нерегулируемой ПК представлено в [2, 3]. Можно показать, что составляющая выпрямленного напряжения, обусловленная наличием

контура LC в первом и втором нагрузочных режимах ($0 \leq \gamma \leq 30^\circ$), за период повторяемости равна нулю. С учетом этого и [2, 3]

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_2 [\cos(\psi - 30^\circ) + \cos(\psi + \gamma - 30^\circ)]. \quad (19)$$

На основании (18) и (19) вольтамперная характеристика КПП для первого и второго нагрузочных режимов имеет вид

$$\frac{J^2}{3\sin^2 \frac{\gamma}{2}} + \frac{\tau^2}{\cos^2 \frac{\gamma}{2}} = 1, \quad (20)$$

где

$$J \simeq J_0 \left(1 - \frac{v^2}{1 - v_k^2} \right), \text{ при } \gamma = 30^\circ,$$

$$J \simeq J_0 \left(1 - 3,86 \frac{v^2}{1 - v_k^2} \sin \frac{\gamma}{2} \right), \text{ при } \gamma < 30^\circ. \quad (21)$$

Изменяя величину v_k^2 путем плавного изменения сопротивления РПС мы уменьшаем I' и в соответствии с (20) увеличиваем τ , тем самым как бы повышаем степень ПЕК. Таким образом, регулирование ИРМ с параллельным включением РПС без перехода резонансной точки возможно только вверх и всегда с присутствием компенсирующего эффекта.

Искомая регулировочная характеристика на основании (20) и (21) после преобразований имеет вид

$$x = \frac{v^2 - v_k^2 \sqrt{(1 - v_k^2)^2 - \frac{A}{B}}}{2v^2 - v_k^4 + \frac{A}{B}}, \quad (22)$$

где

$$A = 3\sin^2 \frac{\gamma}{2} (2\tau_0 \Delta\tau + \Delta\tau^2);$$

$$B = J_0^2 \cos^2 \frac{\gamma}{2};$$

$$x = 1 - v_k^2.$$

Проверкой правильности (22) свидетельствует равенство $\bar{x} = 1$ при $A=0$, т. е. $\Delta\tau=0$. С учетом обозначений, зная величину x , получим:

$$v_k^2 = 1 - \bar{x}, \quad (23) \quad x_p = \frac{v^2 x_a}{v_k^2}, \quad (24)$$

$$Z_k = \frac{x_a v^2}{1 - v_k^2}, \quad (25) \quad U_k = 1,58 I_d \frac{Z_k}{c}, \quad (26)$$

где

U_k — действующее значение падения напряжения на контуре.
Требуемая мощность элементов контура равна

$$Q_{\text{ПЕК}} = 3 \frac{U_k^2}{x_a v_0^2}, \quad (27) \quad Q_{\text{РПС}} = Q_{\text{ПЕК}} v_k^2. \quad (28)$$

Пример. Рассчитаем требуемую мощность ветвей ИРМ при условии, что

$$v_0 = 0,1, \quad x = 0,72 \text{ ом}, \quad 2 I_d = 165 \text{ ка}, \quad c = 31,6;$$

$$I_0 = 0,21, \tau_0 = 0,875, +\Delta\tau = 5 \cdot 10^{-2} \text{ при } \gamma = 30^\circ;$$

$$A = 0,0181, B = 0,41, \quad \frac{A}{B} = 0,44;$$

$$\bar{x} = \frac{0,1 \pm 0,1 \sqrt{0,9^2 - 0,44}}{0,12 - 0,01 + 0,44} = 0,25;$$

$$\gamma_k = 0,75, \quad x_p = 0,096, \quad U_k = 1150 \text{ в};$$

$$Q_{\text{ПЕК}} = \frac{3 \cdot 1150^2}{0,1 \cdot 0,72} = 55 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 55 \cdot 0,75 = 41 \text{ мвар}.$$

Сопоставление рассмотренных схем ИРМ оперативного регулирования тока нагрузки КПП

Все сопоставляемые схемы рассчитаны на диапазон регулирования $\pm 2,5\% U_d$, что составляет 24 в.

1. Последовательное включение РПС.

$$Q_{\text{ПЕК}} = 14 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 11 \text{ мвар}.$$

2. Параллельное включение РПС.

$$Q_{\text{ПЕК}} = 55 \text{ мвар}, \quad Q_{\text{РПС}} = 41 \text{ мвар}.$$

Из сопоставления следует, что первый вариант плавного регулирования тока нагрузки КПП потребует меньших капитальных затрат, и при этом следует ожидать меньших активных потерь электроэнергии, так как эти потери пропорциональны требуемой для регулирования реактивной мощности элементов.

Выводы

Из приведенного исследования следует, что

1. Статические регулируемые ИРМ могут рассматриваться как средство оперативного регулирования тока серии;

2. Рассмотренные ИРМ имеют компенсирующий эффект во всем диапазоне регулирования и, следовательно, будут способствовать снижению электропотребления реактивной мощности КПП или повышению ее производительности;

3. Последовательное включение РПС и ПЕК обладает лучшими удельными регулировочными свойствами и требуют меньшей мощности РПС и ИРМ.

Кроме того, в процессе исследования получены основные соотношения, позволяющие рассчитать режим работы КПП при включении в ее токовую цепь контура.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Веников и Л. А. Жданов. Регулирование режима электрических систем и дальних электропередач и повышение их устойчивости при помощи управляемых статических ИРМ. «Электричество», 1967, № 6.

2. С. Р. Глинттерник. Электромагнитные процессы и режимы мощных статических преобразователей. «Наука», М., 1968.

3. Р. И. Остапенко. Продольная компенсация преобразовательной подстанции алюминиевого завода. Сборник трудов 11-й краевой экономической конференции, Красноярск, 1970.

4. Ш. М. Размадзе. Преобразовательные схемы и системы. Изд-во «Высшая школа», Москва, 1967.