

С.И. Черный

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

УЛУЧШЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

Совершенствование и развитие технологических процессов горных предприятий предъявляют все более высокие требования к качеству электроснабжения. Одно из направлений улучшения качества электроснабжения – компенсация реактивной мощности. Широкое применение компенсирующих устройств (КУ) дает существенный экономический эффект. Однако в реальных условиях эксплуатации на большинстве промпредприятий достигнутая степень оснащенности электрических сетей средствами компенсации реактивной мощности (РМ) значительно меньше оптимального значения. При сложившейся экономической ситуации предпосылки для оптимальной компенсации реактивных нагрузок (КРН) в большинстве систем электроснабжения появятся не скоро. Поэтому актуальное значение приобретает задача разработки методических подходов улучшения показателей компенсации РМ в условиях ограниченной мощности КУ, когда предприятия заинтересованы в максимальном использовании компенсирующей способности имеющихся КУ.

Известны исследования, проведенные в работах [1, 2], в которых рассмотрено влияние ограниченности мощности КУ на решение задачи оптимальной компенсации РМ. Ограниченность мощности КУ приводит к многовариантному решению оптимизационной задачи компенсации реактивных нагрузок и требует применения двухэтапных стохастических моделей. Приведенные в обсуждениях [2] выводы рекомендуют учитывать ограниченность мощности КУ двухэтапной штрафной функции. Однако для реальных условий эксплуатации промпредприятий нет аналитическо-методических разработок такой модели.

В статье ставится задача улучшения режима работы электрических сетей горных предприятий за счёт разработки элементов двухэтапной стохастической модели затрат и методических подходов, учитывающих особенности электропотребления и экономических взаимосвязей сетей предприятия с энергоснабжающей организацией.

Промпредприятие за потребленную и генерируемую электроэнергию платят по показаниям счетчиков. При этом учитывается как потребление, так и генерация РМ и вводится надбавка за недостаточную оснащенность электрических сетей средствами компенсации РМ. Учет потребленной и генерируемой электроэнергии осуществляется счетчиками, снабженными стопорами. Потребление реактивной электроэнергии предприятиями носит вероятностный характер. Поэтому в отдельные моменты времени в месте размещения батарей конденсаторов (БК) одни счетчики будут регистрировать потребление РМ, а другие её генерацию. Наиболее распространенным является нормальный закон распре-

деления. Воспользуемся им. Исследования, проведенные в работе [3], позволили получить аналитическое выражение матожидания потребления РМ при нормальном законе распределения:

$$\begin{aligned} \bar{Q}(+) = & \bar{Q}_{\partial\delta} \left[\Phi \left\{ \left(Q_{\partial\delta}^{\max} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right) / G \right\} - \Phi \left\{ -\bar{Q}_{\partial\delta} / G \right\} \right] + \\ & + \left(G / 2\sqrt{\pi} \right) \left\{ \exp \left[-\left(-\bar{Q}_{\partial\delta} \right)^2 / (2G)^2 \right] - \exp \left[-\left(Q_{\partial\delta}^{\max} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right)^2 / (2G)^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{Q}_{\partial\delta} = \bar{Q}_{cp} - \bar{Q}_{\partial k}$; \bar{Q}_{cp} – матожидания потребления РМ, $\bar{Q}_{\partial k}$ – мощность БК; $Q_{\partial\delta}$ – максимальное потребление РМ; Φ – функция Лапласа [4]; G – стандартное среднеквадратическое отклонение РМ от его среднего значения.

Аналогично получено выражение для матожидания генерации РМ:

$$\begin{aligned} \bar{Q}(+) = & \bar{Q}_{\partial\delta} \left[\Phi \left\{ -\bar{Q}_{\partial\delta} / G \right\} - \Phi \left\{ \left(Q_{\partial\delta}^{\min} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right) / G \right\} \right] + \\ & + \left(G / 2\sqrt{\pi} \right) \left\{ \exp \left[-\left(Q_{\partial\delta}^{\min} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right)^2 / (2G)^2 \right] - \exp \left[-\left(-\bar{Q}_{\partial\delta} \right)^2 / (2G)^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q_{\partial\delta}^{\min}$ – минимальное потребление РМ.

Показания счетчиков потребления и генерации реактивной электроэнергии будут соответственно пропорциональны выражениям (1) и (2). Проанализируем полученные по этим формулам результаты. Примем допущение, что среднее значение реактивной нагрузке $\bar{Q}_{cp} = 1$. Тогда необходимая мощность БК для снижения среднего значения $\text{tg } \varphi$ от 0,8 (естественного $\text{tg } \varphi$) до оптимального $\text{tg } \varphi_0 = 0,25$ квар/кВт равна 0,69. Приведенный показатель соответствует оптимальной степени компенсации РМ, т.е 0,79. Зависимости показателей компенсации РМ при относительном значении G^* приведены на рис. 1

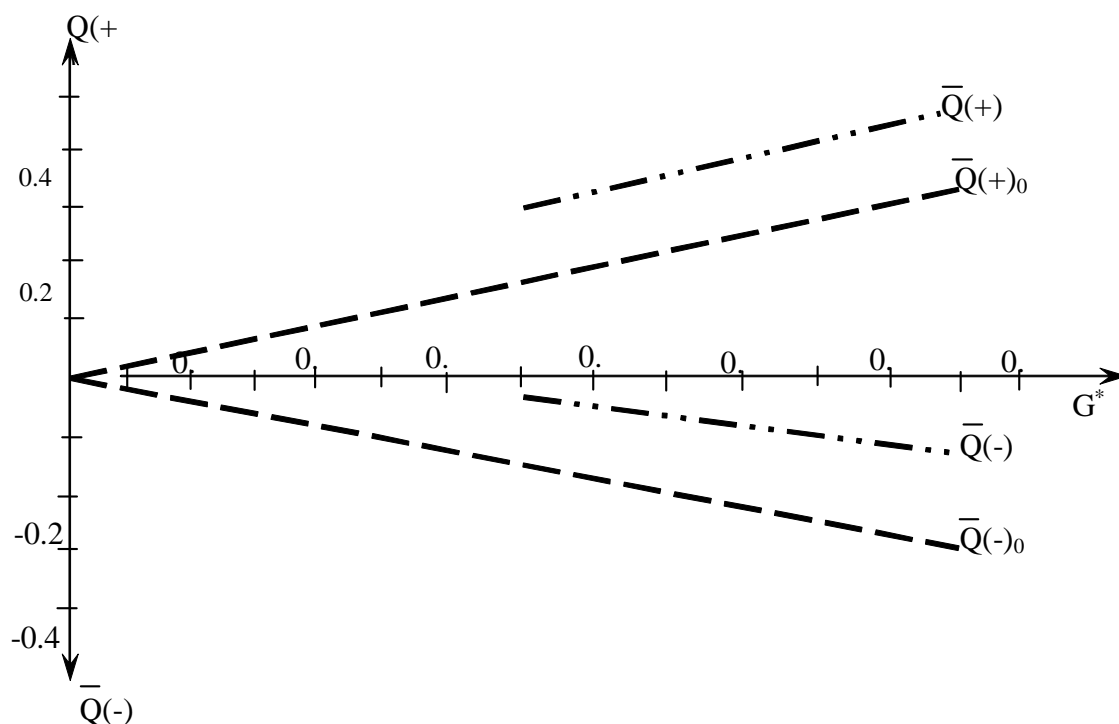


Рис.1. Зависимости компенсации реактивной мощности: $Q(\pm)$; $Q(\pm)_0$ – соответственно компенсация (генерация) при $\text{tg}\varphi_0=0,25$ и $\text{tg}\varphi=0$

Размещение БК в электрических сетях при изменяющейся РМ потребителей приводит к тому, что в отдельные моменты времени КУ будут компенсировать реактивную нагрузку, а в другие периоды времени происходит генерация РМ. По своему отрицательному действию генерируемая реактивная электроэнергия в характерные моменты времени (часы малых нагрузок) может значительно превышать ущерб от потребления реактивной электроэнергии. Поэтому БК необходимо размещать исходя из наименьшей генерации РМ.

Разработаем методические подходы, которые бы обеспечивали данный режим. При размещении БК, мощность которой равна средней мощности реактивной нагрузки, счетчики со стопором покажут значение потребляемой или генерируемой реактивной электроэнергии пропорциональное G^* .

Анализ графиков, приведенных на рис.1, показывает, что, например, при $G^*=0.6$ почти 15% мощности БК работает в режиме генерации РМ. То есть, мощность БК используется нерационально. Необходима оптимизация использования компенсирующей способности БК.

Проанализируем условия, при которых счетчик будет регистрировать минимальное значение РМ. Для нормального распределения случайной величины при интегральной вероятности 0,975 того, что значение потребляемой РМ будет больше нуля, среднее значение потребляемой РМ должно быть равно $1.65 G^*$. Таким образом, мощность БК в относительных единицах, которую необходимо разместить вблизи потребителя, следующая:

$$\bar{Q}_{БКП} = 1 - \bar{Q}_{СР} = 1 - 1.65G^*$$

Приведенные аналитические выкладки позволяют предложить методические подходы выбора и размещения БК исходя из принципа их работы в режиме компенсации.

Рассмотрим это на примере размещения БК мощностью 7 Мвар для электрической цепи и нагрузок, приведенных на рис.2.

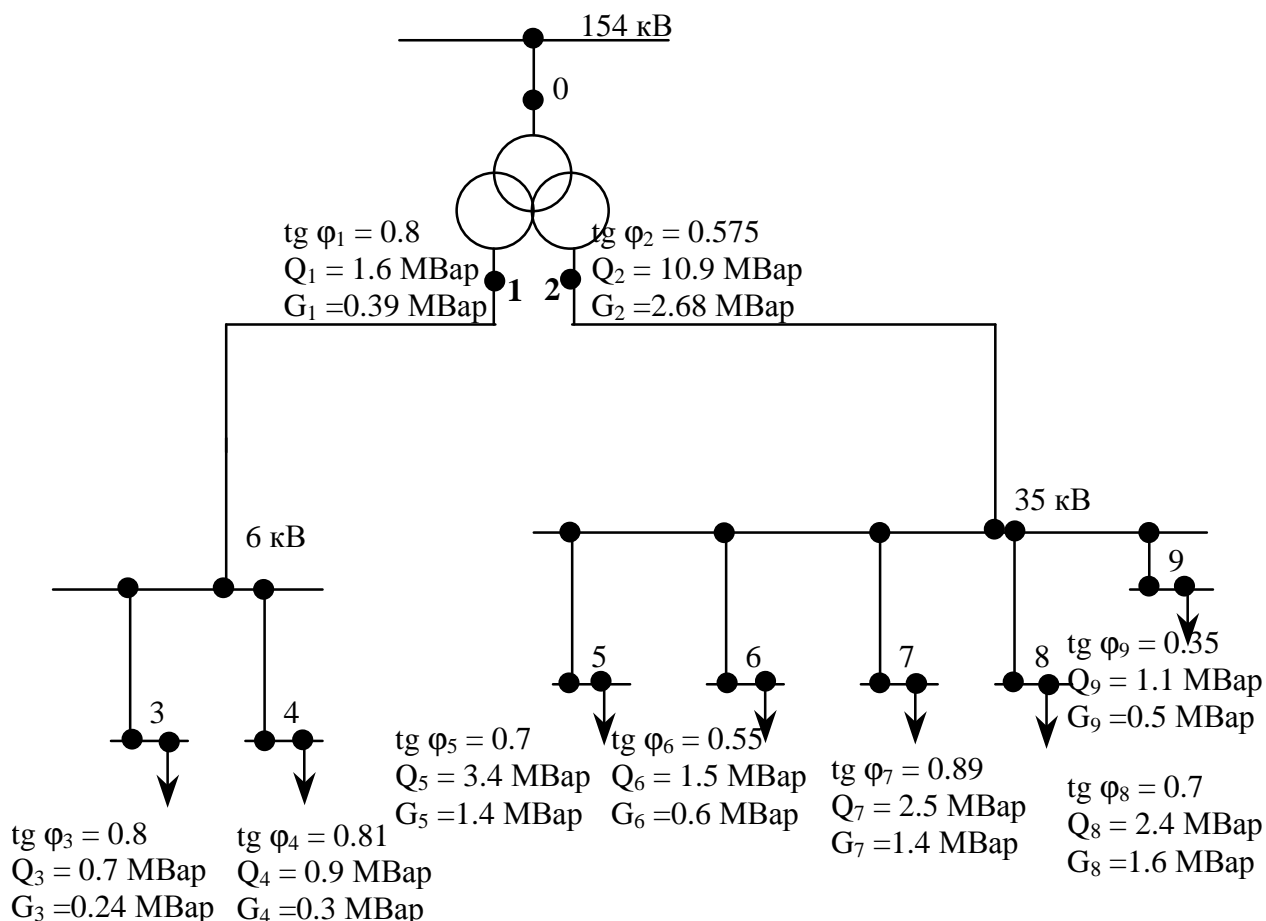


Рис.2. Схема электроснабжения и реактивные нагрузки потребителя

Сравним два варианта. Первый заключается в том, что БК будем размещать исходя из обеспечения оптимального значения $\text{tg} \varphi_0$ (0,25 квар/кВт) в месте размещения КУ. При другом варианте будем учитывать вероятностные характеристики реактивных нагрузок, т.е. G. В реальных условиях предприятия заинтересованы в снижении выплат за потребленную реактивную электроэнергию. Поэтому оно будет размещать БК в первую очередь в точках с наибольшим потреблением РМ. Результаты расчетов сведем в табл. 1, из которой следует что для варианта 1 10,5% мощности БК работает в режиме генерации РМ, тем самым создавая дополнительные потери в электрических сетях. Для варианта 2 только 2,4% суммарной мощности БК работает в режиме перекомпенсации, т.е., в условиях ограниченности мощности БК для варианта 2 режимов генерации РМ практически нет.

Проведем исследования влияния мощности БК на мощность потерь в электрической цепи, которая при перекомпенсации [5]

$$\Delta P = \left[R_{\text{ЭК}} / U^2 \right] \left(\bar{Q}_{\partial\delta}^2 + G^2 \right),$$

где $R_{\text{ЭК}}$ – эквивалентное сопротивление цепи; U – напряжение цепи. Часть этой мощности будет определяться потреблением РМ, а часть генерацией РМ.

Таблица 1

Сравнительный анализ вариантов.

Вариант 1			
Точки	Мощность БК, Мвар	Q(+),Мвар	Q(-),Мвар
4	0,65	0,282	0,032
5	2,2	1,347	0,147
6	0,8	0,734	0,034
7	1,8	0,97	0,22
8	1,55	11,145	0,3
Q(-) = 0,733 Мвар			
Вариант 2			
Точки	Мощность БК, Мвар	Q(+),Мвар	Q(-),Мвар
2	3,6	4,8	0
3	0,4	0,31	0,01
4	0,5	0,409	0,009
5	1,1	0,2334	0,034
6	0,5	1,007	0,007
7	0,5	2,037	0,037
8	0,5	1,975	0,075
Q(-) = 0,17 Мвар			

Исходя из гипотезы о нормальном законе распределения реактивных нагрузок мощность потерь, вызванная потреблением РМ, будет

$$\begin{aligned} \Delta \bar{P}_{(+)} &= \left[R_{\text{ЭК}} / U^2 \right] \int_0^{Q_{\partial\delta}^{\max}} Q_{\partial\delta} \varphi(Q_{\partial\delta}) dQ_{\partial\delta} = \\ &= \left[R_{\text{ЭК}} / U^2 \right] \left(\bar{Q}_{\partial\delta} + G^2 \right) \left[\Phi \left(\left\{ Q_{\partial\delta}^{\max} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right\} / G \right) - \Phi \left(-\bar{Q}_{\partial\delta} / G \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi(Q_{\partial\delta})$ – функция плотности случайной величины $Q_{\partial\delta}$.

Аналогично получим выражение мощности потерь от перекомпенсации РМ

$$\begin{aligned} \Delta \bar{P}_{(-)} &= \left[R_{\text{ЭК}} / U^2 \right] = \\ &= \left[R_{\text{ЭК}} / U^2 \right] \left(\bar{Q}_{\partial\delta} + G^2 \right) \left[\Phi \left(-\bar{Q}_{\partial\delta} / G \right) - \Phi \left(\left\{ Q_{\partial\delta}^{\min} - \bar{Q}_{\partial\delta} \right\} / G \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Проведем числовые исследования выражений (3) и (4) для $Q_{cp}=1$ при $R_{ЭК}/U^2 = 1$

Результаты расчетов сведены в табл. 2, где величины $Q_{БК}^*, \Delta P^*, \Delta P_{(+)}^*, \Delta P_{(-)}^*, G^*$ - в относительных единицах. На рис. 3 представлены зависимости $\Delta P^*, \Delta P_{(+)}^*, \Delta P_{(-)}^*$ для $G^* = 0.6$

Таблица 2

Результаты расчетов мощности потерь				
G^*	$Q_{БК}$	P^*	$P_{(+)}$	$P_{(-)}$
0,35	0	1,122	1,122	0
	0,2	0,762	0,755	0,007
	0,4	0,483	0,464	0,018
	0,5	0,372	0,342	0,03
	0,69	0,218	0,185	0,033
0,4	0	1,16	1,16	0
	0,2	0,8	0,782	0,018
	0,4	0,52	0,48	0,04
	0,5	0,41	0,366	0,044
	0,69	0,254	0,2	0,054
0,5	0	1,25	1,25	0
	0,2	0,89	0,943	0,043
	0,4	0,61	0,537	0,073
	0,5	0,5	0,42	0,08
	0,69	0,344	0,25	0,094
0,6	0	1,36	1,36	0
	0,2	1	0,9	0,1
	0,4	0,72	0,605	0,115
	0,5	0,61	0,488	0,122
	0,69	0,456	0,32	0,136

Анализ полученных результатов показывает, что чем больше мощность $Q_{БК}^*$, тем больше мощность потерь $\Delta P_{(-)}^*$. Так, для кривых, приведенных на рис. 3, при $Q_{БК}^* = 0.69\Delta P_{(-)}^*$ достигает 30 % общей мощности потерь от реактивной нагрузки. Зависимости, приведенные в табл. 2 и на рис. 3, позволяют выделить еще одну закономерность, которая заключается в том, что данную мощность БК целесообразно устанавливать не в одной точке, обеспечивая глубокую компенсацию, а в нескольких точках. Если принять допущение, что есть несколько точек, характеристики которых приведены на рис. 3, то, обеспечивая степень компенсации РМ в одной точке, равной 0,69, относительную мощность потерь ΔP^* уменьшаем на 0,86. При размещении двух БК мощностью 0,35 о.е. в двух точках суммарное уменьшение ΔP^* равно 1,21, а при трех БК мощностью

0,23 о.е в трех точках уменьшение достигает 1,23. Это еще раз подтверждает правильность методического подхода варианта 2 (табл.1).

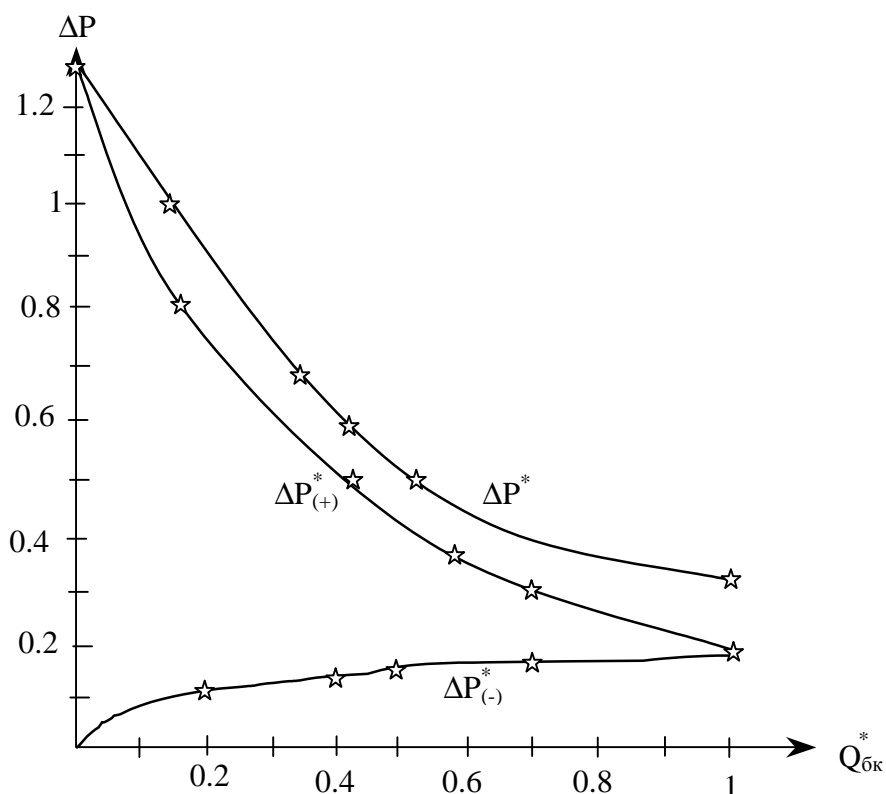


Рис. 3. Показатели мощности потерь: ΔP^* – полные потери; $\Delta P^*_{(+)}$, $\Delta P^*_{(-)}$ – соответственно потери от потребления и генерации реактивной мощности

Исследования, проведенные в данной работе, выполнены при условии максимального использования имеющейся мощности БК. Применение регулируемых БК может уменьшить $\Delta P^*_{(-)}$, но при этом уменьшается, и число часов включения мощности БК, поскольку в отдельные моменты времени часть мощности БК будет отключена. В условиях ограниченности мощности БК вполне удовлетворительным может быть решение о применении одноступенчатой регулируемой БК.

Первая ступень регулируемой БК при изменении реактивной нагрузки от нуля до максимума позволяет экономить от 40 до 70% мощности потерь от реактивной нагрузки [6]. В условиях промышленных предприятий, когда минимальное значение реактивной нагрузки отлично от нуля, этот показатель еще больше (см. табл. 2). Определим мощность одноступенчатой БК, которая бы обеспечивала максимальное использование мощности БК в режиме компенсации РМ при снижении мощности потерь. При определении мощности БК можно руководствоваться следующими критериями. В соответствии с действующими нормативными требованиями надбавка за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя средствами компенсации РМ достигает порога чувствительности (более 5%) при $\text{tg } \varphi = 0,47$ квар/кВт. Исходя из этого критерия

$tg\varphi = 0,47 = \left(\overline{Q}_{cp}^* - Q_{\overline{b}k}^* \right) / P = \left(\overline{Q}_{cp}^* - Q_{\overline{b}k}^* \right) 0,8 / \overline{Q}_{cp}^*$, где 0,8 естественный коэффициент РМ. Тогда $Q_{\overline{b}k}^* = 1 - 0,47 / 0,8 = 0,41$.

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 2, показывает, что при этом более 50% мощности потерь, определяемая реактивной нагрузкой будет скомпенсирована, а мощность потерь, определяемой перекомпенсацией РМ не превышает 7,8% для $G^* = 0,6$ и 1,8% для $G^* = 0,35$.

Таким образом, описанные методические подходы позволяют оптимизировать использование имеющихся мощностей БК за счет снижения перетоков реактивной энергии и за счет уменьшения мощности потерь от реактивных нагрузок.

Дальнейшем разработки в данной области могут быть продолжены созданием и исследованием алгоритмов и программ, ориентированных на использование в компьютерных системах.

Список литературы

1. Железко Ю.С. О направлении исследований в области компенсации реактивной мощности // Электричество. – 1981. – №10. – С.7-13; С. 61-76
2. Железко Ю.С. О направлении исследований в области компенсации реактивной мощности. Дискуссии//Электричество. – 1981. – №5. – С. 58-72.
3. Черный С.И. Экономическое управление оснащенностью электрических сетей средствами компенсации реактивной мощности /Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2000. – Вып. 64. – С. 56 – 60.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математической статистики: Уч. пособие для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1972. – 368 с.
5. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем /В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.: Под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.
6. Герман Л.А. О выборе числа ступеней регулируемых установок поперечной емкостной компенсации тяговых нагрузок //Электричество. – 1993. – №6. – С.46 – 49.