

**Богданов Евгений Петрович**

Evgeny P. Bogdanov

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
National Research Tomsk Polytechnic University

Доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»  
Associate Professor of department “Electromechanical systems and materials”

Канд. техн. Наук

**Рикконен Сергей Владимирович**

Sergey V. Rikkonen

ООО «Система», г. Томск

“System” Ltd, Tomsk

Главный конструктор ООО «Система», г. Томск

Chief designer of “System” LTD, Tomsk

Канд. техн. Наук

**Федянин Александр Леонидович**

Aleksandr L. Fedyanin

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
National Research Tomsk Polytechnic University

Доцент кафедры «Электромеханические комплексы и материалы»  
Associate Professor of department “Electromechanical systems and materials”

Канд. техн. Наук

05.14.00 – Энергетика

## **Повышение энергоэффективности распределительных сетей промышленных предприятий и объектов ЖКХ**

Improving energy efficiency of distribution networks of industrial enterprises and  
housing and communal services

**Аннотация:** В статье приведен перечень мероприятий, который необходимо проводить для повышения энергоэффективности предприятий и объектов ЖКХ с целью снижения потерь в оборудовании и в распределительных сетях.

**The Abstract:** This article provides a list of activities that should be carried out to improve the energy efficiency and enterprises of housing and communal services to reduce the losses of equipment and distribution network.

**Ключевые слова:** Энергоэффективность, мощность, потери, компенсация, привод, электродвигатель.

**Keywords:** Energy efficiency, power, losses, compensation, drive, electromotor.

\*\*\*

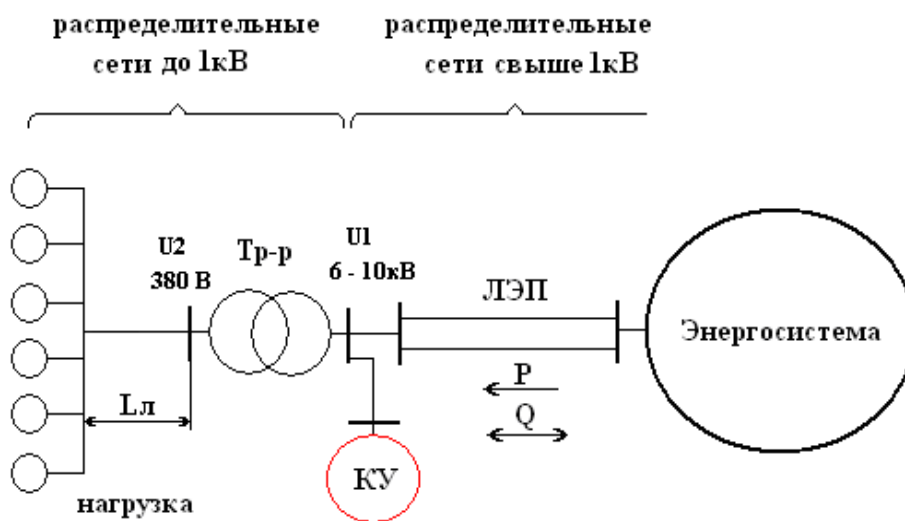
Энергоёмкость российского валового внутреннего продукта в 2,5 раза выше, чем в странах Европы, Японии и США. На душу населения в России потребляется в 1,5 раза больше энергии, чем в других странах. Наша страна оказалась в круге наиболее

энергорасточительных стран мира. Однако, независимые эксперты [3] указывают, что потенциал повышения энергоэффективности достаточно велик, 45 % энергии, которую сегодня использует Россия, можно было бы сэкономить, если заменить энергопотребляющее оборудование на образцы, отвечающие мировым стандартам.

Электрическая система – это совокупность электрических частей электростанций, электрических сетей и потребителей электроэнергии, связанных общностью режима и непрерывностью процесса производства, распределения и потребления электроэнергии.

Режим работы электрической системы характеризуется значениями показателей её состояния, называемых параметрами режима. Все процессы в электрических системах можно охарактеризовать тремя параметрами: напряжением, током и мощностью. Для удобства расчетов и учета электроэнергии в сетях переменного тока принято разделение полной мощности на активную и реактивную мощность. Активная мощность производит работу и идет на потери в виде нагрева, реактивная мощность потребляется индуктивностями и электрическими ёмкостями для создания магнитного и электрического полей. Между нагрузкой и источником возникает обмен потоками энергии, суммарная мощность которого равна нулю, но при этом он вызывает дополнительные потери активной энергии, потери напряжения и снижает пропускную способность электрических сетей. Так как избежать подобных негативных воздействий невозможно, необходимо свести их к минимуму. В мировой практике для снижения потерь из-за циркуляции реактивной мощности широко применяются разного рода компенсирующие устройства (КУ).

Распределительные сети до 1кВ предназначены для передачи электроэнергии на небольшие расстояния от шин низшего напряжения районных подстанций к промышленным, городским и сельским потребителям. Расположение КУ в данной схеме (рис.1) предполагает снижение реактивной мощности в линии электропередачи, при этом реактивная мощность в распределительной, слева от трансформатора сети, не компенсирована.



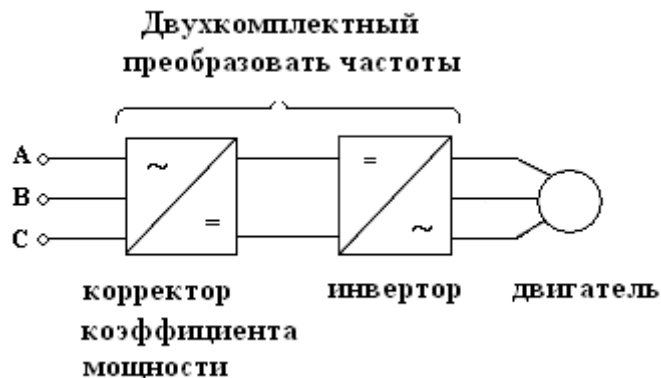
**Рис.1.** Принципиальная схема распределительной сети.

*Тр-р – понижающий трансформатор, КУ – компенсирующее устройство, ЛЭП – линия электропередачи*

С точки зрения экономии электроэнергии и регулирования напряжения компенсацию реактивной мощности в распределительных сетях наиболее целесообразно осуществлять в точке её возникновения, а именно непосредственно на шинах нагрузки.

В настоящее время с существенным развитием полупроводниковой техники и средств автоматизации появилась возможность компенсировать реактивную мощность в преобразователе частоты, который является источником питания электрических приводов с переменной частотой, максимальным коэффициентом мощности и с максимальным к.п.д.

Таким источником является двухкомплектный преобразователь частоты (ДКПЧ), состоящий из инвертора и корректора коэффициента мощности (ККМ) [2].



*Рис. 2. Принципиальная схема двухкомплектного преобразователя частоты*

Двухкомплектный преобразователь частоты (рис.2) является источником питания для электрических двигателей переменного тока с возможностью регулирования скорости вращения, коэффициента мощности, к.п.д. и рекуперацией энергии в сеть. ДКПЧ является источником реактивной мощности и, располагаясь в непосредственной близости от нагрузки, превращает её в чисто активную нагрузку ( $\cos\varphi = 1$ ) и потери в системе сокращаются.

Распределительные сети разделяются на распределительные сети до 1кВ и распределительные сети свыше 1кВ.

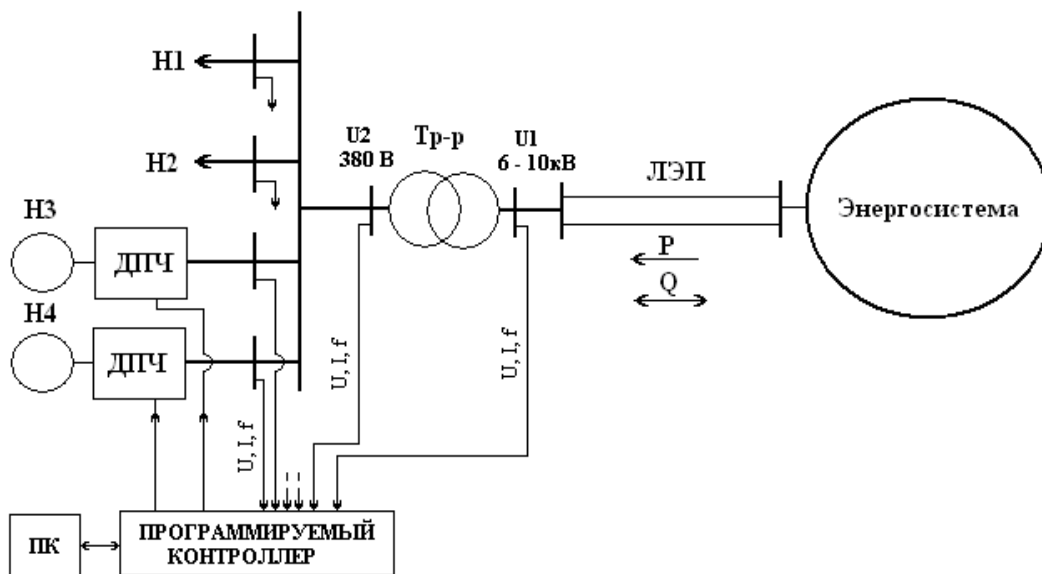
**Сельские электрические сети.** Общая протяженность электрических сетей напряжением 0,4 кВ сельских территорий России составляет около 880 тыс. км.

**Городские электрические сети.** Общая протяженность городских электрических сетей напряжением 0,4÷10 кВ составляет 0,9 млн. км.

Неменьшая протяженность электрических сетей промышленных предприятий, которую практически невозможно определить.

Повышение энергоэффективности энергосистемы необходимо рассматривать в совокупности повышения эффективности распределительных сетей, нагрузок

потребителей и создания автоматизированной системы управления технологическим процессом электропотребления предприятия (АСУ ТП) электропотребления предприятия (рис.3).



**Рис. 3.** Принципиальная схема АСУ ТП электропотребления предприятия с компенсацией реактивной мощности за счет применения двухкомплектных преобразователей частоты

Для повышения энергоэффективности предприятий и объектов ЖКХ необходимо выполнить следующие мероприятия:

- проведение энергетического обследования и выработка рекомендаций по повышению энергоэффективности;
- выравнивание суточного графика энергопотребления предприятия;
- полный приборный учет энергоресурсов;
- замена всех двигателей постоянного тока на частотно-регулируемые асинхронные и синхронные двигатели;
- замена в технологических установках с постоянной скоростью вращения и переменной нагрузкой асинхронных двигателей на синхронные с регулируемым коэффициентом мощности;
- замена редукторных электрических приводов на безредукторные электрические приводы;
- снижение моментов инерции всех вращающихся масс приводов;
- для повышения к.п.д. и коэффициента мощности промышленных установок использовать двухкомплектные преобразователи частоты ДКПЧ;
- применять автоматизированное регулирование производительности насосных станций, компрессорных, вентиляционных установок в зависимости от потребности нагрузки и времени суток (возможное снижение потребление электроэнергии до 60 %);
- модернизация и авторегулирование осветительных систем;
- пофасадное и поэтажное регулирование отопления;
- утилизация тепла вентилируемого воздуха и канализационных вод;
- формирование АСУ ТП «Энергопотребления предприятия».

## **Повышение энергоэффективности объектов ЖКХ.**

Для примера приведём расчет энергопотребления жилого дома [1, 4, 5].

Исходные данные:

- дом 6-подъездный, 9-этажный с жилым первым этажом;
- 4 квартиры на этаже (4 квартиры до 60 м<sup>2</sup>);
- 1 лифт на подъезд – 5кВт;
- количество квартир – 216;
- 3 насоса сантехустройств по 3 кВт;
- расстояние до подстанции – 200м.

В электроснабжении дома проведены следующие изменения:

1. Двухскоростной редукторный асинхронный привод пассажирского лифта заменён на безредукторный частотно-регулируемый привод с синхронным двигателем на постоянных магнитах [1].
2. Асинхронный нерегулируемый привод сантехустройств заменён на частотно-регулируемый привод с синхронным двигателем на постоянных магнитах.
3. Во всех электрических приводах применён двухкомплектный преобразователь частоты с рекуперацией энергии в сеть, позволяющий поддерживать максимальный к.п.д. установки и коэффициент мощности, близкий к единице, организована АСУ ТП «Энергопотребления».

В рамках двух первых пунктов данной реконструкции энергоснабжения жилого дома годовая экономия электроэнергии распределительной сети составит 6,15 %. или 41375 кВт×час [4, 5].

При внедрении третьего пункта – создание автоматизированной системы управления технологического процесса энергопотребления (АСУ ТП «Энергопотребления») с функциями регулирования расходов насосов, регулирование системы энергоэффективного освещения годовая экономия электроэнергии распределительной сети составит приблизительно 10 % от потребляемой мощности [6].

При потреблении электроэнергии системы в год 672776 кВт×час [4, 5] экономия составит 67277 кВт×час.

За год экономия электроэнергии составит 108652 кВт×час.

При тарифе 3 руб/кВт×час экономия составит 325956 тыс. руб. в год.

Затраты на оборудование, автоматизированную систему управления и реконструкцию составят 400 тыс. руб.

Следовательно, данная модернизация энергоснабжения жилого объекта окупится за 1,1 ÷ 1,5 года эксплуатации.

## Повышение энергоэффективности распределительных сетей промышленных предприятий.

Для анализа производства и потребления реактивной мощности в электрических системах рассмотрим типичное промышленное предприятие. Состав электроприемников приведен в таблице.

Таблица

Состав электроприемников в системе электроснабжения типового промышленного предприятия

Виды электроприемников	Активная мощность, %	Реактивная мощность, %
Асинхронные двигатели	30	33
Синхронные двигатели	23	0
Вентильные преобразователи	18	10
Электropечи	12	8
Бытовые	7	5
Собственные нужды	5	2
Потери в электрических сетях	5	42

В данном случае только 58 % реактивной мощности генератора потребляется нагрузкой, остальная реактивная мощность (42 %) потребляется до главной понизительной подстанции (ГПП) трансформаторами и линией. Основная активная мощность (95 %) потребляется в нагрузке и только 5% – в трансформаторах и в линии. На производстве 30% мощности потребляют асинхронные двигатели (рис.4).

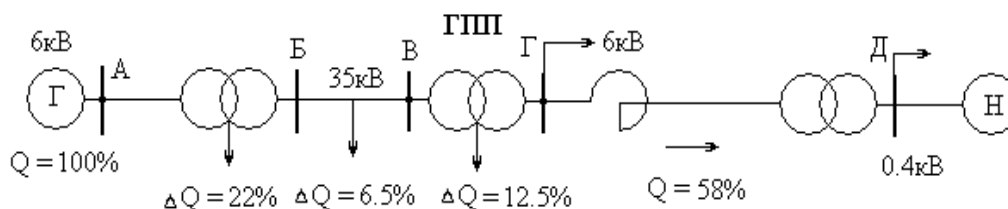


Рис. 4. Изменение потока реактивной мощности в электропередаче

$$\text{Потери в распределительных сетях: } P_{\text{пот}} = \frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{H}}^2} (P_{\text{H}}^2 + Q_{\text{H}}^2)$$

Допустим, что все асинхронные двигатели оснастили ДКПЧ, и, следовательно, двигатели не потребляют реактивную мощность. Отношение потерь без компенсации к потерям с компенсацией реактивной мощности избавит от привязки к конкретному предприятию и позволит определить потери исходя из процентов типичной нагрузки.

$$\text{Считаем, что } \frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{H}}^2} = \text{const},$$

$$K_1 = \frac{\frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{H}}^2} (0,95^2 + 0,3^2)}{\frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{H}}^2} 0,95^2} = 1,12.$$

Это значит, что при компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей потери снизились на 12 %.

В случае компенсации всей реактивной мощности предприятия, а это возможно при наличии АСУ ТП «Энергопотребления» предприятия, картина с потерями в распределительной сети будет выглядеть следующим образом:

$$K_2 = \frac{\frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{Н}}^2} (0,95^2 + 0,58^2)}{\frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{Н}}^2} 0,95^2} = 1,336.$$

Это значит, что при компенсации всей реактивной мощности предприятия потери в распределительной сети снизились на 33,6 %.

Приведём пример по снижению потерь распределительной сети промышленного предприятия, в котором 10 асинхронных двигателей привода вентиляционных или гидравлических установок.

Вентиляционные установки присоединены к сети, как показано на рис.1. Компенсирующее устройство КУ расположено на высокой стороне понижающего трансформатора и служит для повышения коэффициента мощности передающей линии.

По распределительным сетям ниже 1кВ циркулирует реактивная мощность, которая создаёт потери энергии.

Параметры асинхронных двигателей:

$P_2 = 110$  кВт,  $U_{\text{Н}} = 380$  В,  $n = 2970$  об/мин,  $\eta = 0,91$ ,  $\cos\varphi = 0,89$ ,  $P_1 = 120,8$  кВт,  $I_{\text{ф}} = 180$  А.

Суммарная мощность 10-ти двигателей составляет  $P_{\text{Н}} = 1208$  кВт.

Полная мощность  $S = 1357,3$  кВА.

Реактивная мощность  $Q_{\text{Н}} = 616$  кВАр.

Длина линии от нагрузки до трансформаторной подстанции 500 м.

Активное сопротивление фазы линии  $R_{\text{Л}} = 0,0795$  Ом.

Фазный ток распределительной линии  $I_{\text{фЛ}} = 1800$  А.

Потери в распределительной сети без наличия АСУ ТП «Энергопотребления» предприятия:  $P_{\text{П1}} = \frac{R_{\text{Л}}}{U_{\text{Н}}^2} (P_{\text{Н}}^2 + Q_{\text{Н}}^2) = \frac{0,0795}{380^2} (1208^2 + 616^2) = 1015$  кВт.

Потери мощности в распределительных сетях близки к суммарной мощности потребления.

Полная мощность нагрузки с потерями в линии:

$$P_1 = P_{\text{Н}} + P_{\text{П1}} = 1208 + 1015 = 2223 \text{ кВт.}$$

Энергия, потребленная за год:

$$W_1 = 365 \times 24 \times 2223 = 19,5 \times 10^6 \text{ кВт} \times \text{час.}$$

Стоимость данной энергии при тарифе 3руб/кВт×час:

$$C_1 = 19,5 \times 10^6 \times 3 = 58,5 \times 10^6 \text{ руб.}$$

Потери в распределительной сети с организацией АСУ ТП «Энергопотребления» предприятия и установкой ДКПЧ:

$$P_{П2} = \frac{R_{Л}}{U_H^2} P_H^2 = \frac{0,0795}{380^2} 1208 = 806 \text{ кВт.}$$

Полная мощность нагрузки с потерями в линии:

$$P_2 = P_H + P_{П2} = 1208 + 806 = 2014 \text{ кВт.}$$

Энергия, потребленная за год:

$$W_2 = 365 \times 24 \times 2014 = 17,64 \times 10^6 \text{ кВт} \times \text{час.}$$

Стоимость данной энергии при тарифе 3руб/кВт×час:

$$C_1 = 17,64 \times 10^6 \times 3 = 52,9 \times 10^6 \text{ руб.}$$

Сумма экономии:  $C_{ЭК} = (58,5 - 52,9) \times 10^6 = 5,6 \text{ млн. } \frac{\text{руб.}}{\text{год}}$ .

Стоимость реконструкции и оборудования ориентировочно составляет 5,5 млн. руб. Следовательно, за счет снижения потерь в распределительных сетях реконструкция предприятия окупится за 1,5÷2 года.

Анализ экономических расчетов на примере жилого дом ЖКХ, типового промышленного предприятия показывает, что затраты на реконструкцию электроснабжения предприятия и жилого сектора посредством организации АСУ ТП «Энергопотребления» предприятия и установки ДКПЧ окупятся, в среднем, за 1.5÷2 года.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов А.Т., Рикконен С.В. Сравнительный анализ энергозатрат лифтовых лебёдок // itech-журнал интеллектуальных технологий. Томск: – 2010. № 15. – С. 24-30.
2. Краснов И.Ю., Черемисин В.Н. Проектирование активного корректора коэффициента мощности и имитационное моделирование его работы. Томск: Известия ТПУ. – 2009. Т. 314. № 4.– С. 92-97.
3. Литвак В.В. Реформирование электроэнергетики России и эффективное энергосбережение // itech-журнал интеллектуальных технологий. Томск: - 2011. № 18. – С. 64-66.
4. Рикконен С.В. Повышение энергоэффективности распределительных сетей // itech-журнал интеллектуальных технологий. Томск: – 2011. № 18. – С. 48-51.
5. Рикконен С.В. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях // itech-журнал интеллектуальных технологий. Томск: – 2011. № 18. – С. 30-33.
6. <http://www.momentum.ru>

**Рецензент:** Лукутин Борис Владимирович. Докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Национального исследовательского Томского политехнического университета.