

УДК 621.311

СЕЗОННОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КОММУНАЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

МУСТАФАЕВ Р.И., МИРОНОВ Г.А., МИРОНОВ Р.Г.

АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования

На основе непрерывной автоматической регистрации в течение года реактивной мощности типовой нагрузки определены суточные и сезонные зависимости реактивной мощности от напряжения и погодных условий. Установлена также сезонная зависимость коэффициента мощности нагрузки. Найденные зависимости приведены в виде регрессионных уравнений. Результаты могут быть использованы при выборе компенсирующих устройств.

Перетоки реактивной мощности существенно влияют на потери электроэнергии в электрических сетях и качество напряжения. При электроснабжении в условиях энергосистемы ограниченной мощности эти перетоки имеют свои особенности. Не касаясь проблемы выработки реактивной мощности на электростанциях и крупных распределительных подстанциях, рассмотрим потребление реактивной мощности в распределительных сетях среднего напряжения с преобладанием коммунальной нагрузки.

Состояние проблемы.

- В системе ограниченной мощности имеет место, в целом, слабая загрузка установленной мощности трансформаторов 110 и 35 кВ. Например, на Апшероне в период зимней пиковой нагрузки средняя загрузка трансформаторов 110 кВ составляет около 30%, хотя отдельные трансформаторы при этом могут быть перегружены - рис.1.
- Примерно 70% нагрузки имеет характер коммунально-бытовой нагрузки с высоким коэффициентом мощности и соответствующим суточным графиком.
- В распределительной сети, за редким исключением, не используются технические средства компенсации реактивной мощности.
- Неэффективно используются средства регулирования напряжения трансформаторов.

Источники реактивной мощности в сети коммунальной нагрузки:

1. Емкость кабельной сети.
2. Трансформаторы распределительной сети 6-10 кВ,
3. Электродвигатели насосов, лифтов, мелкой нагрузки, электротранспорта.
4. Электродвигатели холодильников, кондиционеров, вентиляторов и другой бытовой нагрузки.

Реактивная мощность первых трех зависит от напряжения, потребление реактивной мощности холодильниками и кондиционерами зависит также от температуры воздуха и погодных условий.

Суточный график реактивной мощности. Потребление реактивной мощности в течение суток зависит от режима использования устройств по п.п.3-4, при использовании же их, потребление реактивной мощности зависит от уровня напряжения [1]. На диаграмме – рис.2 представлены характерные суточные графики изменения реактивной мощности одной и той же типовой коммунальной нагрузки для различных сезонов года. Как видно из диаграммы, наибольшее потребление реактивной мощности имеет место в летнее время, при интенсивной работе холодильников и кондиционеров, наимень-

Рис.1. Пиковая нагрузка (%) трансформаторов 110 кВ.

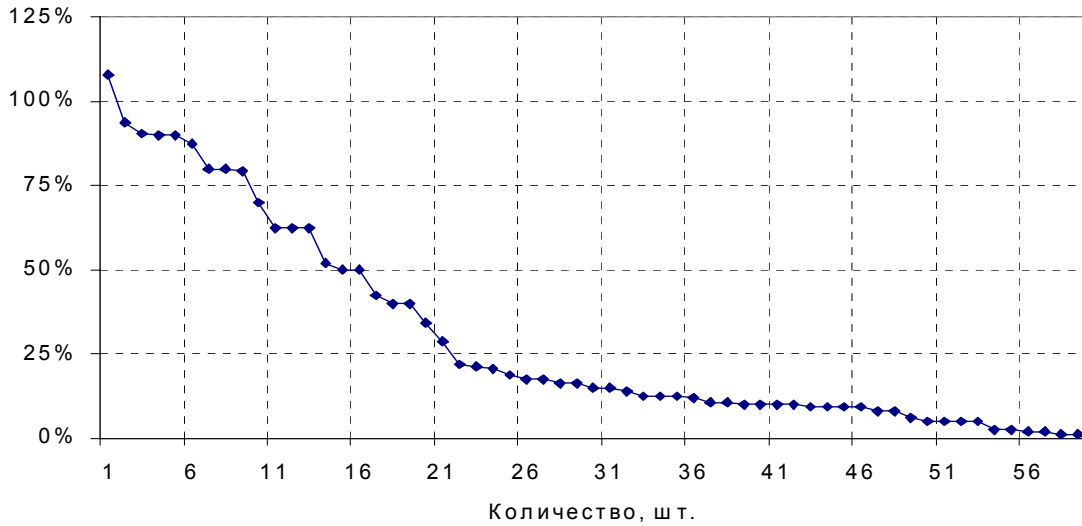


Рис.2. Суточные графики реактивной мощности.

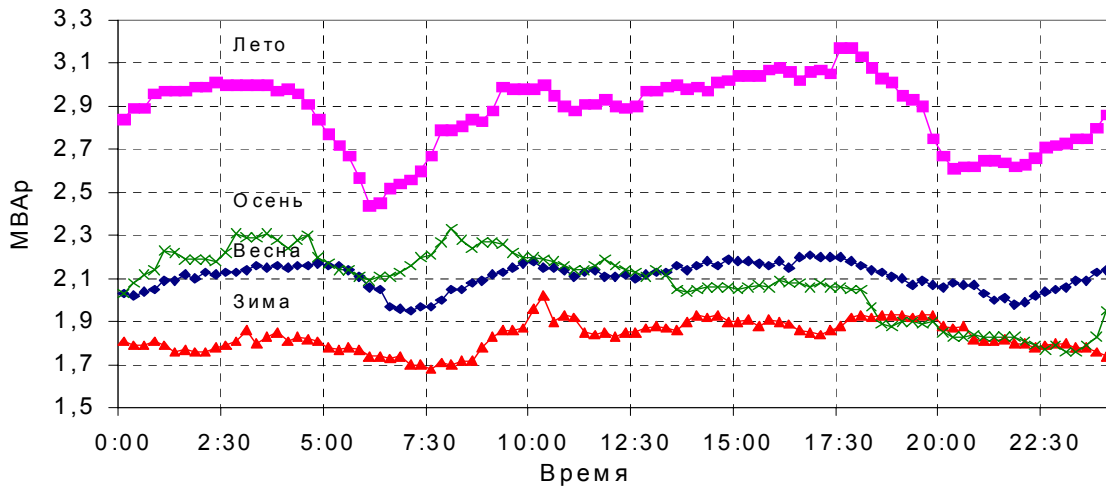
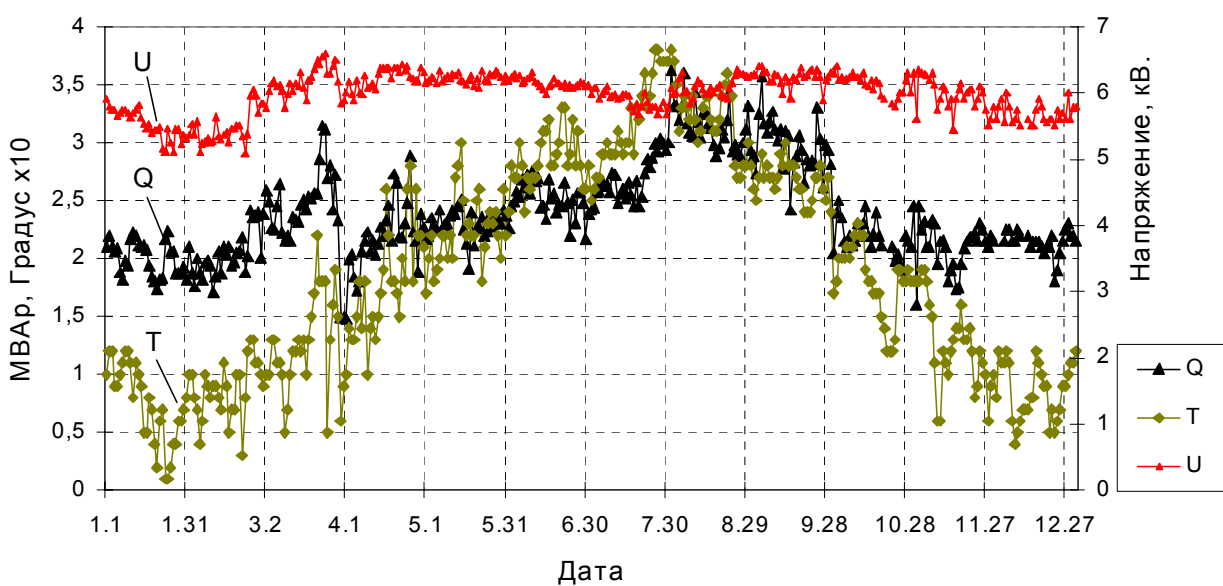


Рис.3. Изменения в течение года реактивной мощности, напряжения и температуры.



шее – в зимнее время. Понижение потребления реактивной мощности зимой обусловлено как меньшим одновременным использованием холодильников и кондиционеров, так и пониженным напряжением в зимнее время. Осенью и весной, когда напряжение в распределительных сетях максимально, потребление реактивной мощности выше, чем в зимнее время. С помощью коэффициентов корреляции, приведенных в таблице 1, оценим подобие кривых – рис.2.

Таблица 1.

Сезон	Зима	Весна	Лето	Осень
Зима	1	0,332	0,576	-0,184
Весна	0,332	1	0,767	0,273
Лето	0,576	0,767	1	0,332
Осень	-0,184	0,273	0,332	1

Как видно из таблицы, есть общие закономерности и есть различия в суточных графиках потребления реактивной мощности в разные сезоны года.

В пределах суток, кривые изменения реактивной мощности подобны суточным графикам изменения напряжения. Понижение мощности в вечернее время и повышение в ночное соответствуют вечерним и ночным напряжениям. Соотношения утренней и дневной реактивной мощностей также находятся в соответствии с изменениями напряжения во время утреннего максимума и дневной нагрузки. Характерные провалы мощности в период времени с 4-х до 6 часов обусловлены как пониженным использованием электродвигателей, так и понижением напряжения во время утреннего максимума нагрузки. Зависимость реактивной мощности в течение суток от напряжения можно оценить с помощью коэффициентов корреляции, приведенных в таблице 2.

Таблица 2.

№	Сезон	Коэфф. корреляции реактивной мощности и напряжения				
		Сутки	Утро	День	Вечер	Ночь
1	Зима	-0,476	-0,462	0,035	-0,825	0,128
2	Весна	0,334	-0,648	0,530	0,447	0,886
3	Лето	0,350	0,191	0,917	0,823	0,817
4	Осень	0,692	-0,542	0,935	-0,596	0,871

Сезонная зависимость реактивной мощности. Годовое изменение реактивной мощности (в МВАр) нагрузки трансформатора 16 МВА представлено на диаграмме – рис.3. На этой же диаграмме представлены изменения в течение года напряжения и температуры – факторов, влияющих на величину реактивной мощности. Усредненные статистические параметры: среднее значение, стандартное отклонение σ и доверительный интервал Δ для уровня значимости $\alpha=0,05$, реактивной мощности, напряжения и температуры для различных сезонов года представлены в таблице 3.

Таблица 3.

№	Месяцы	Реактивная мощность, МВАр			U, кВ			T, градус		
		Q _{ср}	σ	Δ	U _{ср}	σ	Δ	T _{ср}	σ	Δ
1	Январь	2,002	0,133	0,047	5,53	0,22	0,08	7,4	2,8	1,0
2	Февраль	2,025	0,139	0,051	5,46	0,25	0,09	8,8	1,9	0,7
3	Март	2,434	0,239	0,084	6,16	0,23	0,08	12,4	3,2	1,1
4	Апрель	2,182	0,204	0,073	6,22	0,16	0,06	17,8	3,6	1,3
5	Май	2,297	0,088	0,031	6,22	0,07	0,02	22,4	2,3	0,8
6	Июнь	2,509	0,116	0,042	6,15	0,08	0,03	28,5	1,9	0,7
7	Июль	2,677	0,159	0,056	5,89	0,13	0,05	31,7	3,3	1,2
8	Август	3,155	0,16	0,056	6,1	0,14	0,05	32,3	2,4	0,9
9	Сентябрь	2,97	0,183	0,065	6,24	0,12	0,04	26,7	1,3	0,5
10	Октябрь	2,191	0,120	0,042	6,14	0,16	0,06	18	2,2	0,8
11	Ноябрь	2,101	0,146	0,052	5,96	0,24	0,09	12,5	3	1,1

12	Декабрь	2,142	0,072	0,025	5,68	0,15	0,05	8,6	2,1	0,7
----	---------	-------	-------	-------	------	------	------	-----	-----	-----

Степень корреляционных связей оценивается величиной коэффициентов корреляции между реактивной мощностью и напряжением, реактивной мощностью и температурой – таблица 4.

Таблица 4.

№	Сезон	По напряжению	По температуре
1	Годовое изменение	0,499	0,745
2	С октября по май месяцы	0,625	0,593
3	С июня по сентябрь месяцы.	0,387	0,49

Как показано в [2], напряжение в распределительной сети в сильной степени зависит от погодных условий, в частности, от температуры. Поэтому целесообразно из сложной зависимости реактивной мощности от напряжения и от температуры выделить отдельно зависимости от температуры и напряжения, тем более что корреляционные зависимости от каждого из этих параметров достаточно высокие – таблица 4.

На диаграмме – рис.4 дана зависимость реактивной мощности от напряжения (коэффициент корреляции 0,625). На этой же диаграмме дана аппроксимирующая кривая зависимости реактивной мощности от напряжения.

На рис.5 представлена диаграмма годовой зависимости реактивной мощности от температуры (коэффициент корреляции 0,745). Эта зависимость обусловлена тем, что с увеличением температуры, с одной стороны, возрастает частота и продолжительность включения электродвигателей холодильников и кондиционеров, с другой стороны, с повышением температуры снижается потребление на обогрев и освещение, что приводит к повышению напряжения и соответственно потребления реактивной мощности.

Количественные соотношения зависимостей между реактивной мощностью и напряжением, между реактивной мощностью и температурой можно установить с помощью уравнений регрессии, которые определяются путем компьютерной обработки статистических данных автоматической регистрации.

Уравнения зависимости реактивной мощности (МВАр) от напряжения (кВ):

$$Q(U) = -17,696 + 57,669 \cdot U - 60,877 \cdot U^2 + 21,721 \cdot U^3$$

Уравнения зависимости реактивной мощности (МВАр) от температуры (градус):

$$Q(T) = 0,771 - 4,231 \cdot 10^{-3} \cdot T + 5,89 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 5,193 \cdot 10^{-6} \cdot T^3$$

Уравнения зависимости полной мощности от температуры:

$$S(T) = 1,957 + 0,016 \cdot T - 3,736 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 7,776 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$$

На рис.6 на одной диаграмме представлены кривые изменения полной и реактивной мощностей от температуры. Характер изменения полной мощности и связь ее с электропотреблением подробно рассмотрены в [3]. Две эти составляющие электропотребления определяют такой важный параметр, как коэффициент мощности нагрузки:

$$PF = \sqrt{(S^2 - Q^2) / S^2}$$

Суточные колебания коэффициента мощности нагрузки. Выше на рис.2 были показаны суточные колебания реактивной мощности. Колебания полной мощности в течение суток происходят в диапазоне от 40% (в ночное время) до 100% (в вечернее время). Соответственно в течение суток происходят суточные колебания коэффициента мощности, обусловленные как режимом нагрузки потребителя, так и суточными изменениями погодных условий и напряжения в сети.

Типовые диаграммы суточных колебаний коэффициента мощности представлены на рис.7. Как видно, в течение суток величина коэффициента мощности изменяется от 0,8 (в ночное время при низкой активной составляющей нагрузки) до 0,96 во время вечернего максимума нагрузки при максимальной величине активной составляющей электропотребления. В дневное время коэффициент мощности принимает промежуточное значение 0,9, соответствующее примерно среднесуточному значению PF.

Рис.4. Зависимость реактивной мощности от напряжения.

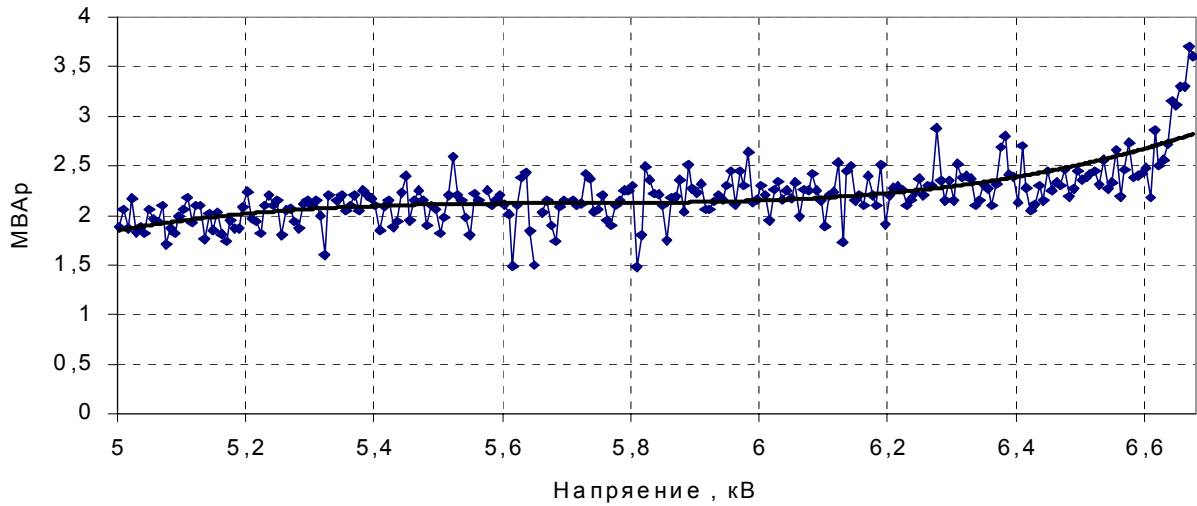


Рис.5. Зависимость потребления реактивной мощности от температуры

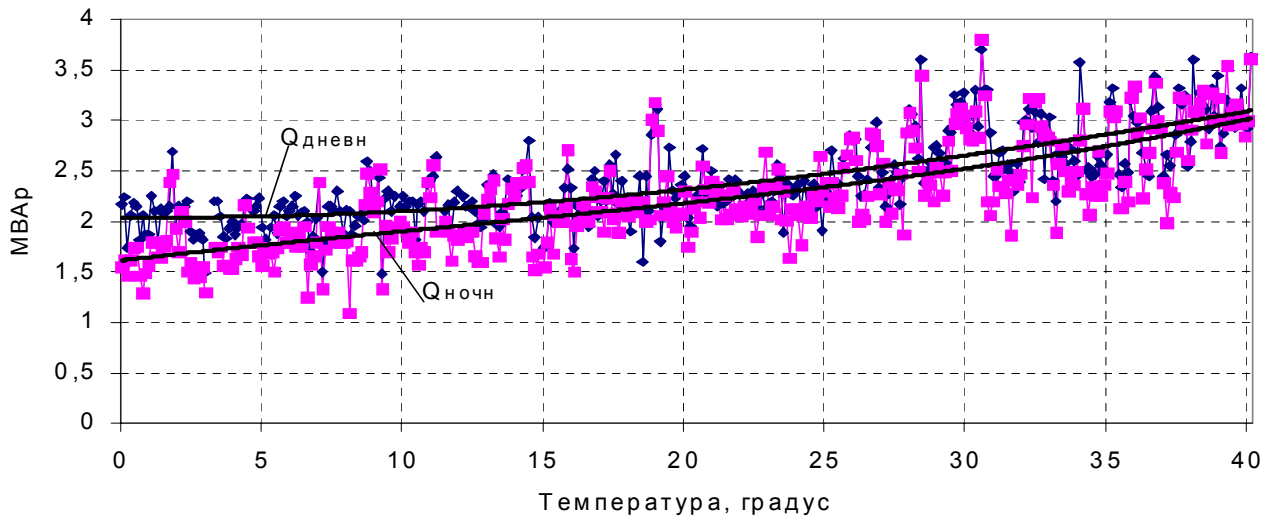


Рис.6. Зависимость полной и реактивной мощностей от температуры.

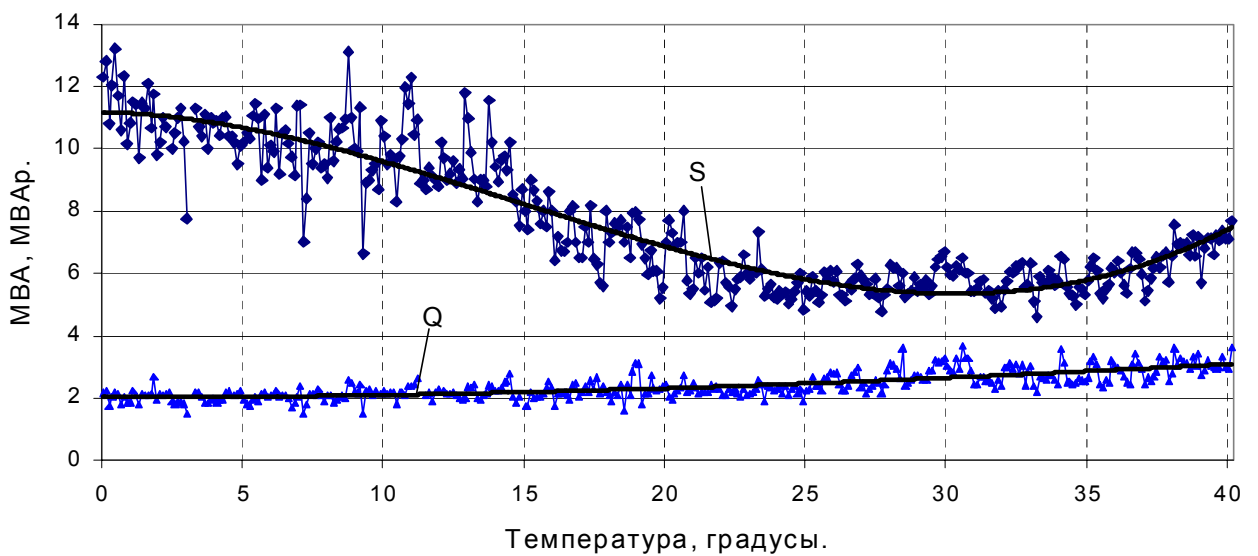


Рис.7. Коэффициент мощности нагрузки 6-13.08.01

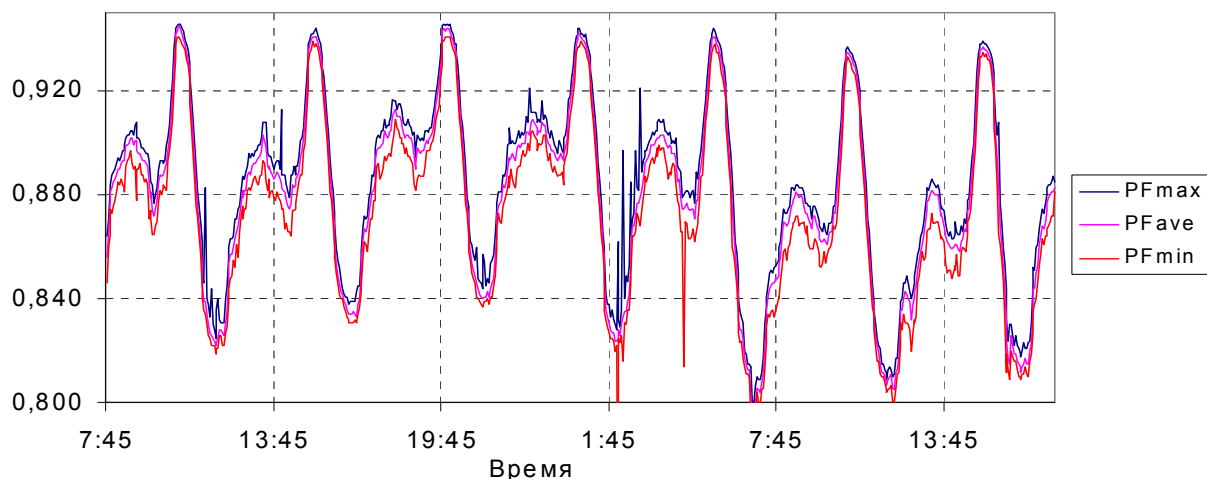


Рис.8. Годовое изменение коэффициента мощности нагрузки.

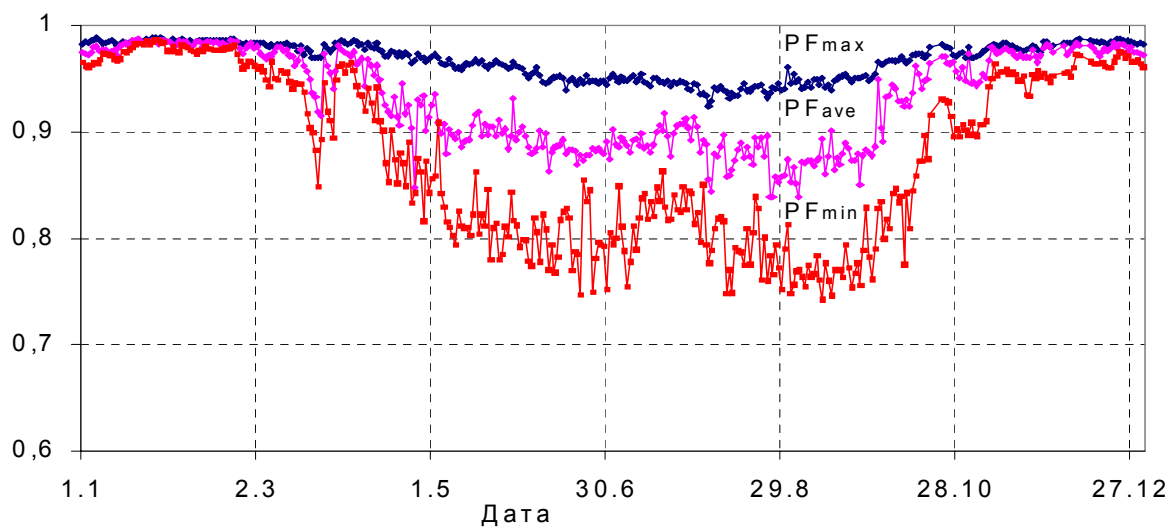
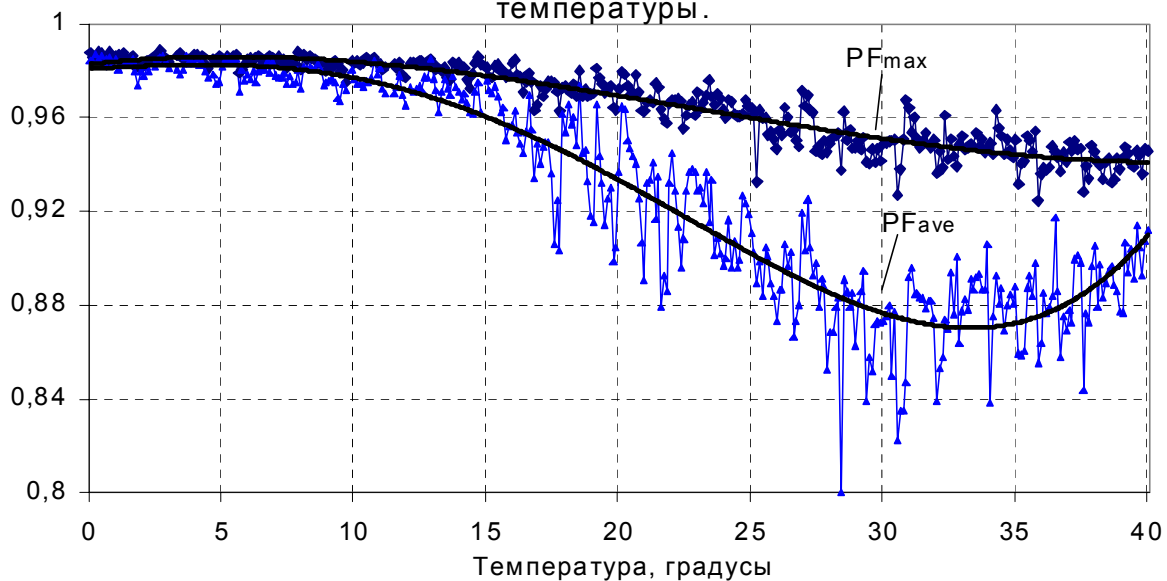


Рис.9. Зависимость коэффициента мощности от температуры.



Сезонная зависимость коэффициента мощности нагрузки. Этот коэффициент определяет рациональное использование электроэнергии, уровень потерь в электрических сетях, качество напряжения. Характерной особенностью сложившейся системы электроснабжения является сезонная зависимость коэффициента мощности нагрузки. Преобладание в общем электропотреблении коммунальной составляющей нагрузки обуславливает, сильно выраженную сезонную зависимость, проявляющуюся в возрастании PF до 0,995 в зимнее время и понижении PF до 0,8 в летнее время. Характер изменения PF, точнее трех его составляющих – PFmax, PFave и PFmin, в течение года представлен на диаграмме – рис.8. Здесь PFmin – коэффициент мощности нагрузки при больших индуктивных токах, например, токах включения электродвигателей. PFave – среднесуточное значение коэффициента мощности нагрузки. PFmax – максимальное значение коэффициента мощности при большой активной составляющей нагрузки во время вечернего максимума. В холодное время года при большом потреблении электроэнергии на обогрев все три составляющие PF практически совпадают, При повышении температуры коэффициент мощности уменьшается и его составляющие разделяются. Измерения показывают, что PF достигает своего минимального значения не при максимально высокой температуре, а на подходе к ней. При максимальной летней температуре существенно увеличивается электропотребление (в том числе и активная составляющая) на охлаждение – рис.6, что приводит к повышению коэффициента мощности. После прохождения летнего максимума температуры коэффициент мощности опять снижается. На основе непосредственной регистрации в течение года PF определены статистические параметры PF для различных месяцев года. Эти параметры представлены в таблице 5. Здесь же для сопоставления приведены среднемесячные значения реактивной мощности, а также среднесуточной и максимальной полной мощностей.

Таблица 5.

№	Месяцы	Коэффициент мощности			Реактивная и полная мощности		
		Средн	σ	Δ	Q_{cp} (МВАр)	S_{cp} (МВА)	S_{max} (МВА)
1	Январь	0,981	0,004	0,001	2,002	10,42	11,35
2	Февраль	0,983	0,002	0,001	2,025	10,93	11,5
3	Март	0,963	0,014	0,005	2,434	9,53	10,9
4	Апрель	0,937	0,024	0,009	2,182	6,63	8,58
5	Май	0,902	0,01	0,004	2,297	5,35	6,88
6	Июнь	0,884	0,006	0,002	2,509	5,37	6,52
7	Июль	0,895	0,009	0,003	2,677	6,04	7,11
8	Август	0,873	0,014	0,005	3,155	6,51	7,53
9	Сентябрь	0,873	0,009	0,003	2,97	6,09	8,00
10	Октябрь	0,944	0,015	0,005	2,191	7,07	8,38
11	Ноябрь	0,969	0,009	0,003	2,101	8,76	9,78
12	Декабрь	0,978	0,003	0,001	2,142	10,19	10,92

Из годовой диаграммы изменения коэффициента мощности нагрузки можно выделить зависимость коэффициента мощности, точнее, максимального и среднесуточного значений PF от температуры - рис.9. Характер изменения максимального значения от температуры понятен – с повышением температуры уменьшается электропотребление и его активной составляющей при умеренном росте индуктивной нагрузки. Среднесуточное значение PF является результатом усреднения колебаний в течение суток активных и индуктивных составляющих нагрузки. Минимум PF приходится на некоторый температурный диапазон, обусловленный характером работы охлаждающих устройств во время максимальных летних температур, и находится в полном соответствии с кривыми изменения от температуры полной и реактивной мощностей – рис. 6.

Кривые, аппроксимирующие регрессионные зависимости PF от температуры, выраженные в аналитической форме, представлены ниже.

Уравнение зависимости максимального значения PF от температуры:

$$PF_{\max}(T)=0,984 + 9,701*10^{-4}*T - 1,326*10^{-4}*T^2 + 1,999*10^{-6}*T^3$$

Уравнение зависимости среднесуточного значения PF от температуры:

$$PF_{\text{ave}}(T)=0,979+3,017*10^{-3}*T-2,844*10^{-4}*T^2-4,791*10^{-6}*T^3+2,368*10^{-7}*T^4$$

Относительно компенсации реактивной мощности. Как видно, реактивная мощность изменяется в течение года и суток, зависит от колебаний температуры и напряжения. Потоки реактивной мощности, циркулирующие в электрических сетях, приводят к дополнительным потерям активной электроэнергии и падениям напряжения в элементах схемы в соответствии с выражениями:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad \text{и} \quad \Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

соответственно. При полной компенсации реактивной мощности ($Q=0$), например, с помощью конденсаторных батарей, можно добиться минимальных потерь мощности ΔP и напряжения ΔU . Однако при глубоких понижениях напряжения в зимнее время может потребоваться дополнительное подключение значительно большей мощности конденсаторных батарей $Q_k > Q$. При этом повышение напряжения может привести к увеличению потерь электроэнергии:

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} R \quad \text{и} \quad \Delta U = \frac{PR + (Q - Q_k)X}{U}$$

Поэтому оптимальная величина емкости конденсаторных батарей должна выбираться на основе технико-экономических расчетов. Критерием оптимальности реактивной мощности может служить коэффициент мощности нагрузки: если $PF < 0,92-0,95$ необходимо компенсировать реактивную мощность. Особенностью сложившегося режима электроснабжения является то, что $PF < 0,95$ в ночное время, при повышенных значениях напряжения. Пониженные напряжения в зимнее время, требующие компенсации реактивной мощности, происходит при $PF > 0,99$. Понижение PF в весеннее время имеет место при повышенных напряжениях, особенно в ночное время, что требует отключения конденсаторных батарей в соответствии с [4]. По этой причине компенсацию реактивной мощности в распределительной сети, питаемой от системы ограниченной мощности, следует проводить только в комплексе с регулированием напряжения трансформаторов.

Ниже в таблице 6 даны для сведения пределы суточных изменений коэффициентов мощности нагрузки трансформаторов 110 кВ зимой 2000 г. (при замерах нагрузки со стороны высокого напряжения):

Таблица 6.

№	ПС	Тр. №	S _{ном} , МВА	Максимальная нагрузка			Минимальная нагрузка		
				S _{max} МВА	%	PF _{max}	S _{min} МВА	%	PF _{min}
1	ПС 227	1	40	35	87,5	0,97	29	72,5	0,94
		2	40	35	87,5	0,96	17	42,5	0,94
2	Салаханы-1	1	40	37	92,5	0,95	22	55	0,935
		2	31,5	33	104,8	0,96	18	57,1	0,95
3	Байыл	1	40	25	62,5	0,995	15	37,5	0,99
		2	40	22	55	0,995	13	32,5	0,99
4	Ахмедлы.	2	63	56	88,9	0,94	42	66,7	0,92
5	Патамдар	1	40	11	27,5	0,96	7,5	18,75	0,94
		2	40	13	32,5	0,96	9	22,5	0,93
6	Дарнагюль-1	1	25	23	92	0,99	14	56	0,989
7	Салаханы-2		25	13	52	0,998	8	32	0,995

.Как видно из таблицы, при нагрузке трансформаторов от 19 до 104% коэффициент мощности нагрузки трансформаторов в зимнее время изменяется в пределах 0,92-0,995.

Резюме. Реактивная мощность в распределительной сети с преобладанием коммунально-бытовой нагрузки изменяется в течение суток в соответствии с характером нагрузки потребителя, зависит от напряжения сети и погодных условий (температуры). Установлены качественные и количественные соотношения, связывающие величину реактивной мощности с напряжением и температурой.

Определены также суточные и сезонные изменения коэффициента мощности нагрузки и зависимость его от температуры. Определены пределы сезонных изменений коэффициента мощности для коммунально-бытовой нагрузки.

Полученные результаты могут оказаться полезным при разработке мероприятий по компенсации реактивной мощности.

-
1. *Карпов Ф.Ф.* Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М. Энергия, 1975 г., с.180.
 2. *Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г.* Колебания напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ. «Проблемы энергетики» 2002 г №1-2, с.25-53
 3. *Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г.* Сезонные колебания электропотребления. «Проблемы энергетики» 2002 г №4, с.31-39.
 4. Правила устройств электроустановок. М. Энергоатомиздат, 1985 г, с.640.

KOMMUNAL İSTEHLAKÇILAR TƏRƏFİNDƏN REAKTİV GÜCÜN MÖVSÜMİ İSTİFADƏSİ

MUSTAFAYEV R.İ., MIRONOV G.A., MIRONOV R.G.

Tipik yükün reaktiv gücünün il ərzində fasiləsiz, avtomatik olaraq qeydə alınması əsasında, reaktiv gücün gərginlikdən və hava şəraitindən sutkalıq və mövsümi asılılığı müəyyən edilmişdir. Həmçinin yükün güc əmsalının mövsümdən asılılığı da müəyyən edilmişdir. Tapılmış asılılıqlar reqressiya bərabərlikləri şəkilinə gətirilmişdir. Əldə edilmiş nəticələrdən kompensasiya edici qurğular seçilərkən istifadə edilə bilər.

SEASONAL CONSUMPTION REACTIVE POWER BY MUNICIPAL LOADING

MUSTAFAYEV R.I., MIRONOV G.A., MIRONOV R.G.

On the basis of continuous automatic registration within one year reactive power of typical loading, the daily and seasonal dependences reactive power from a voltage and weather conditions are determined. The seasonal dependence power factor of loading is established also. The found dependences are given as the equations of regress. The results can be used at a choice of compensating devices.