

УДК 621.311.

СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

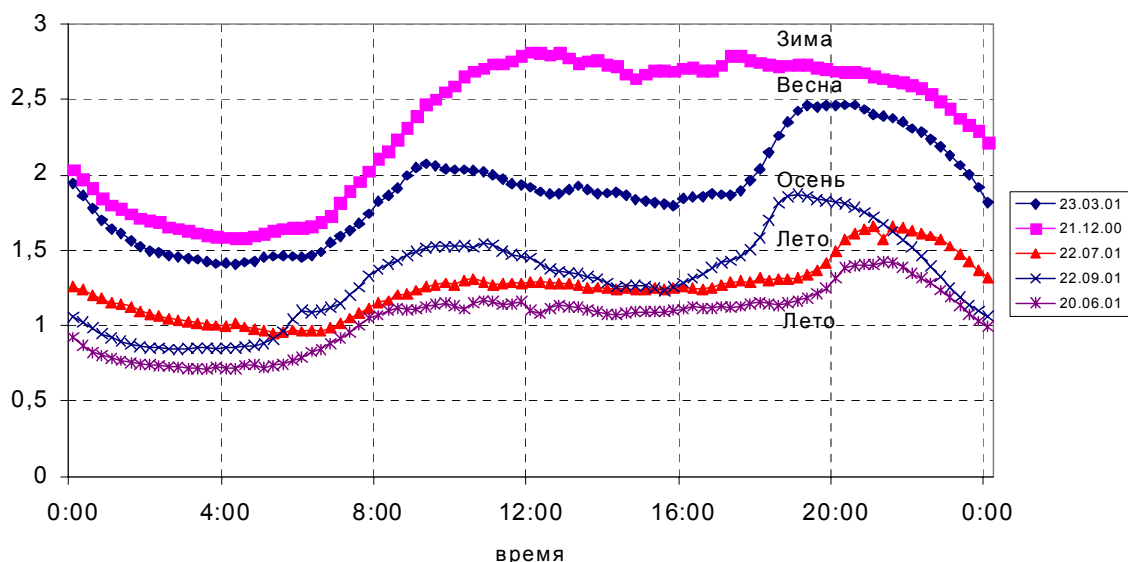
МУСТАФАЕВ Р.И., МИРОНОВ Р.Г.

АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования

На основе автоматической регистрации режимных параметров исследуются сезонные зависимости коэффициентов формы суточных графиков нагрузки. Даны уравнения регрессии, определяющие зависимость коэффициентов формы суточных графиков от температуры.

В основе расчетов баланса и режимов электропотребления лежат суточные графики нагрузки. Известно, что графики нагрузки отдельных потребителей отличаются по форме вследствие специфики режима потребления электроэнергии, например, многосменные промышленные предприятия, тяговая нагрузка, коммунально-бытовая. При суммировании графиков нагрузки отдельных потребителей эти особенности усредняются, формируя обобщенный график нагрузки центра питания, энергосистемы. В соответствии с ними устанавливаются режимы работы генерирующих станций. Качество графика нагрузки определяется возможностью энергосистемы обеспечить этот график. Каждая энергосистема имеет свои особенности, обусловленные климатическими факторами, электропотреблением в промышленности, возможностями регулирования энергосистемой суточного графика с целью более равномерного распределения нагрузки в течение суток. Для Апшерона, как показывалось ранее [1], суточные графики нагрузки имеют сильно выраженную сезонную и погодную зависимость, как по величине максимума нагрузки, так и по форме суточного графика, коэффициента его заполнения, соотношению между дневной и вечерней нагрузкой.

Рис.1. Суточные графики нагрузки для различных сезонов года.



В качестве иллюстрации на рис.1 приведены суточные графики электропотребления типовой нагрузки для характерных дней сезонов года. Как видно из рис.1, графики различаются не только по максимуму нагрузки, но и по характеру потребления электроэнергии в течение суток. В зимнее время дневная нагрузка практически совпадает с вечерней нагрузкой, нагрузка в летнее время имеет сильно выраженный вечерний мак-

симум. В весенний и осенний периоды, при коротком световом дне, суточный график имеет также явно выраженный максимум утренней нагрузки. Количественную оценку сходства и различия вышеприведенных суточных графиков для различных сезонов года в характерном диапазоне времени с 7⁰⁰ до 21⁰⁰, можно оценить с помощью коэффициентов корреляции, представленных в таблице 1.

Таблица 1.

	Весна	Зима	Лето жаркое	Осень	Лето теплое
Весна	1	0,366	0,821	0,956	0,84
Зима	0,366	1	0,547	0,306	0,443
Лето жаркое	0,821	0,547	1	0,712	0,747
Осень	0,956	0,396	0,712	1	0,973
Лето теплое	0,84	0,443	0,747	0,973	1

Как видно из таблицы, наибольшим сходством обладают графики весенней, осенней и летней нагрузки. Наиболее сильно от этих графиков отличается график зимней нагрузки. Нагрузка жаркого лета, с повышением электропотребления на охлаждение в дневное время суток, приближается по суточному графику к зимней нагрузке.

Для сравнения и сопоставления суточных графиков нагрузки, относящихся к различным сезонам года и различным погодным условиям, можно воспользоваться спектральными методами анализа – разложением в ряд Фурье с последующим сопоставлением составляющих гармоник [2]. Известно, что периодическую функцию $X(t)$, заданную на интервале $[0, T]$ с периодом $T=1/f$, где f – частота основной гармоники, можно представить в виде ряда:

$$X(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos(2\pi kft) + B_k \sin(2\pi kft))$$

где

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \cos(2\pi kft) dt \quad \text{и} \quad B_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \sin(2\pi kft) dt.$$

Значения составляющих первых 5 гармоник разложения в ряд Фурье суточных графиков нагрузки для различных сезонов года – рис.1, представлены в таблице.2:

Таблица 2.

№	A_k, B_k	21.12.00	23.03.01	20.06.01	22.07.01	22.09.01
1	A_0	4,685	3,769	2,1	2,508	2,623
2	A_1	-0,315	-0,008	-0,062	0,037	-0,124
3	B_1	-0,52	-0,287	-0,198	-0,189	-0,265
4	A_2	0,125	0,074	0,035	0,09	-0,041
5	B_2	-0,183	-0,275	-0,178	-0,146	-0,26
6	A_3	-0,037	0,029	-0,01	-0,017	-0,077
7	B_3	0,01	0,004	-0,041	-0,035	0,032
8	A_4	0,008	0,047	-0,047	-0,041	-0,018
9	B_4	-0,05	-0,032	-0,024	-0,034	0,029
19	A_5	-0,011	-0,015	-0,025	-0,021	0,01
11	B_5	-0,036	-0,017	-0,013	-0,012	-0,00003

Используя для сравнения суточных графиков спектральные характеристики – рис.2, полученные в результате разложения в ряды Фурье (с помощью современных компьютеров эта операция не представляет сложности), можно выявить различия в форме, например, зимних и летних суточных графиков нагрузки – рис.1. Однако спектральные характеристики явно не отражают реально воспринимаемых параметров суточных графиков, например, вечерних максимумов нагрузки. Поэтому более практичным, по нашему мнению, является описание суточных графиков с помощью следующих показателей – рис.3

- Величина утреннего максимума нагрузки $WP_{\text{утр}}$,
- Величина дневной нагрузки $WP_{\text{дн}}$,
- Величина вечернего пика нагрузки $WP_{\text{веч}}$,
- Величина ночного спада нагрузки $WP_{\text{ноч}}$,
- Продолжительность вечернего максимума T_{max} ,
- Продолжительность ночного минимума T_{min} .

Рис.2. Спектральные характеристики суточных графиков нагрузки

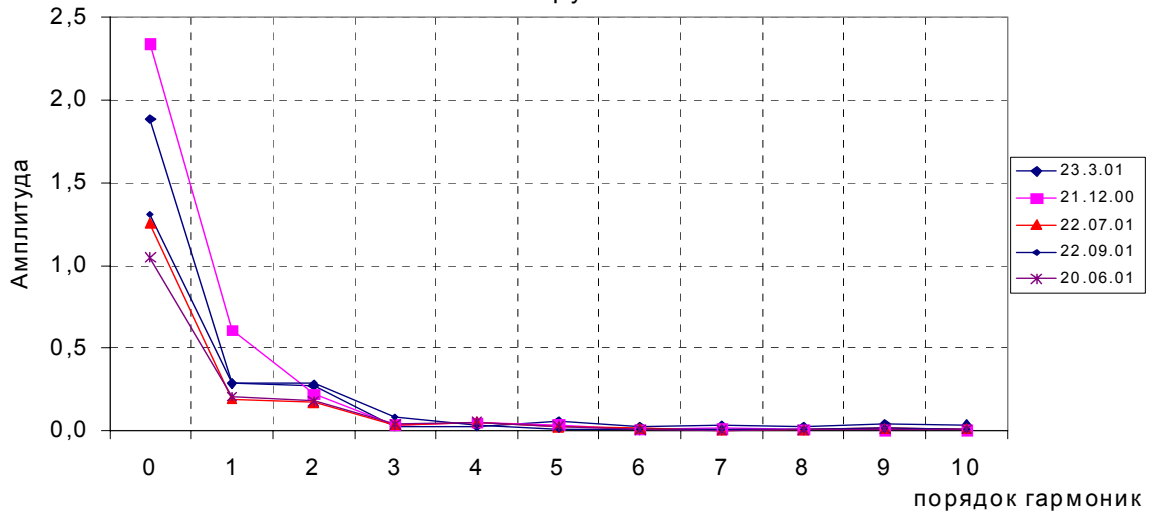
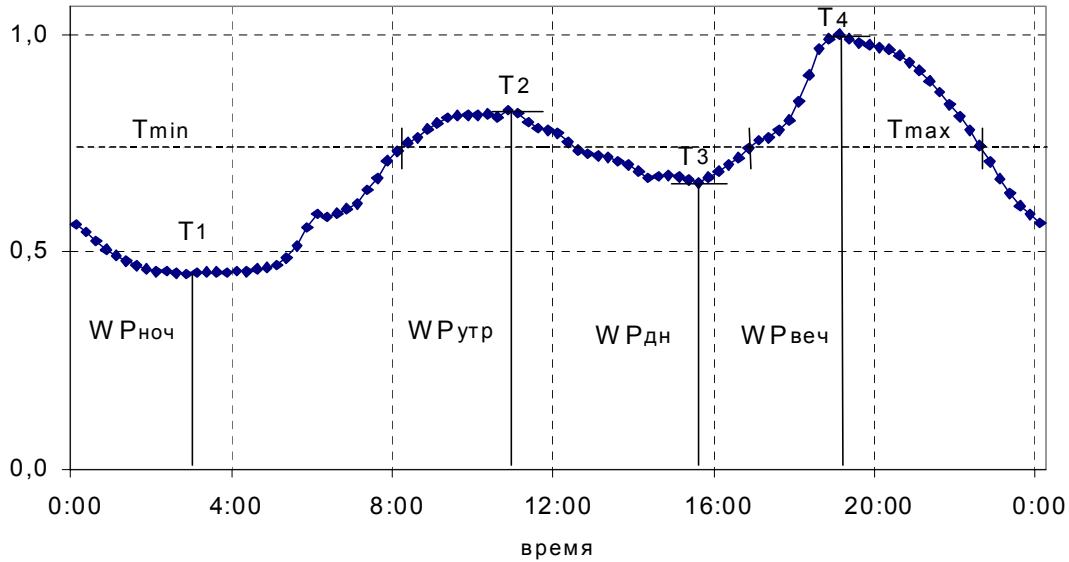


Рис.3. Параметры суточного графика нагрузки.



В течение года суточные графики нагрузки из-за температурных, погодных и иных случайных изменений нагрузки подвержены сильным колебаниям, однако при статистической обработке параметров нагрузки прослеживаются вполне определенные закономерности, частично рассмотренные ранее [1,3]. Для характеристики формы суточных графиков можно использовать коэффициенты относительных значений утренней, дневной и ночной нагрузки по отношению к максимальной вечерней нагрузке, а для напряжения — дневных и вечерних значений напряжений по отношению к максимальному ночному напряжению. Если принять в качестве базовых значений максимальные значения суточных графиков U , I , S , WP , то по отношению к ним можно определить все остальные показатели суточных графиков.

Для более 360 годовых замеров суточных графиков для каждого из режимных параметров определены вышеуказанные относительные значения, которые представлены на диаграммах – рис.4-6. На некоторых из этих диаграмм представлены также усредненные кривые аппроксимирующих полиномов, отображающих функциональные зависимости коэффициентов формы суточных графиков от времени года. Общий характер изменения в течение года усредненных коэффициентов формы вполне логичен: большие различия между пиковыми и минимальными нагрузками имеют место осенью и весной, при комфортных температурах; сближение минимальных и пиковых нагрузок происходит зимой и летом, при повышенном потреблении электроэнергии на обогрев или охлаждение. Для графиков напряжения имеет место обратная зависимость – большие суточные колебания напряжения зимой и летом, меньшие - осенью и весной.

Рис.4. Коэффициенты формы суточного графика напряжения.

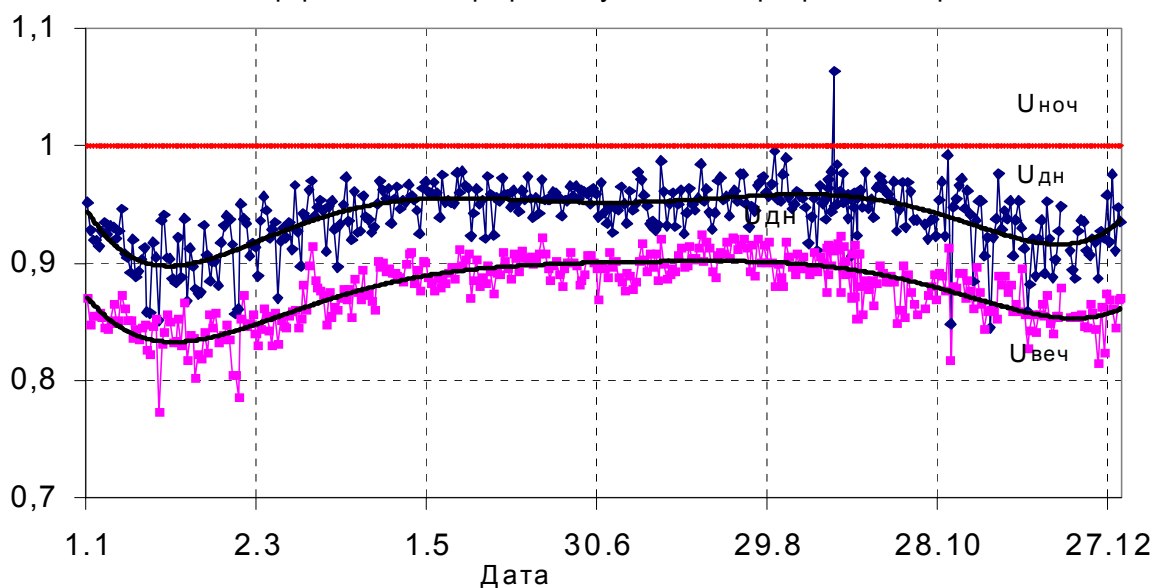


Рис.5. Коэффициенты формы суточного графика тока.

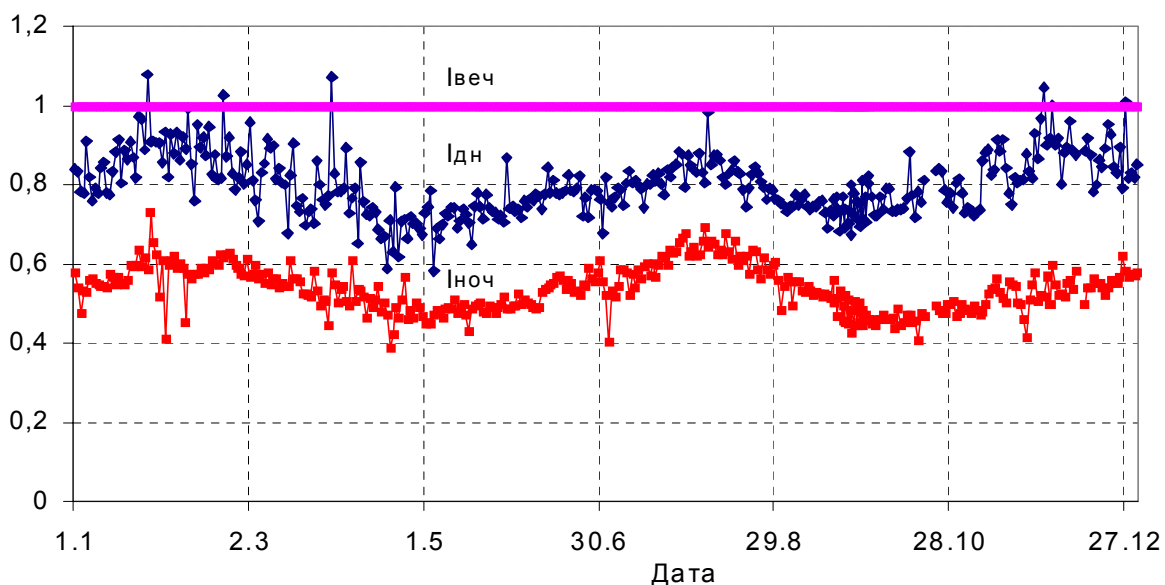
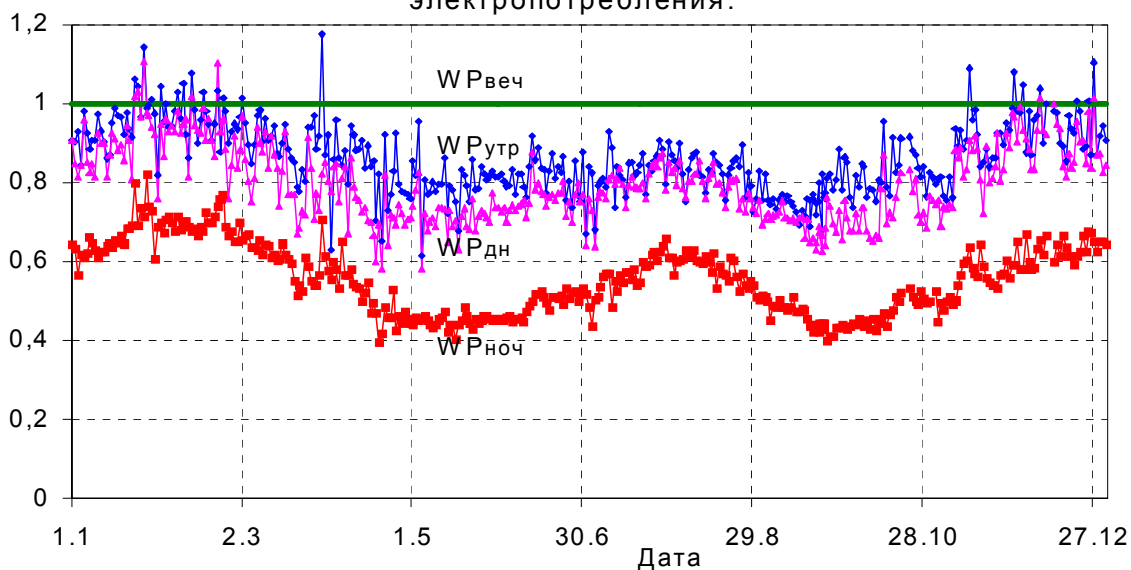


Рис.6. Коэффициенты формы суточного графика
электропотребления.



Усредненные среднемесячные значения коэффициентов формы суточных графиков U , I , WP представлены в таблицах 3 и 4:

Таблица 3.

Статистические параметры коэффициентов формы суточных графиков
напряжения и тока.

№	Месяцы	Напряжение				Ток			
		$K_{дн}$	$\sigma_{дн}$	$K_{веч}$	$\sigma_{веч}$	$K_{дн}$	$\sigma_{дн}$	$K_{ночн}$	$\sigma_{ночн}$
1	Январь	0,912	0,019	0,846	0,011	0,862	0,054	0,574	0,035
2	Февраль	0,905	0,023	0,836	0,016	0,879	0,050	0,585	0,027
3	Март	0,931	0,018	0,86	0,014	0,81	0,065	0,551	0,026
4	Апрель	0,949	0,013	0,886	0,012	0,722	0,051	0,500	0,03
5	Май	0,956	0,011	0,892	0,009	0,726	0,032	0,484	0,014
6	Июнь	0,956	0,006	0,899	0,008	0,772	0,023	0,538	0,025
7	Июль	0,949	0,012	0,897	0,008	0,805	0,032	0,586	0,039
8	Август	0,956	0,012	0,909	0,009	0,822	0,035	0,617	0,029
9	Сентябрь	0,952	0,011	0,904	0,009	0,735	0,022	0,517	0,022
10	Октябрь	0,951	0,016	0,879	0,013	0,774	0,033	0,468	0,015
11	Ноябрь	0,928	0,027	0,868	0,016	0,834	0,062	0,513	0,028
12	Декабрь	0,921	0,018	0,855	0,010	0,878	0,046	0,553	0,021

Таблица 4.

Статистические параметры коэффициентов формы суточных графиков
электропотребления.

№	Месяцы	Электропотребление						T_{max} , час		T_{min} , час	
		$K_{утр}$	$\sigma_{утр}$	$K_{дн}$	$\sigma_{дн}$	$K_{ночн}$	$\sigma_{ночн}$	$T_{ср}$	σ	$T_{ср}$	σ
1	Январь	0,948	0,051	0,902	0,058	0,666	0,043	6:28	0,010	8:02	0,020
2	Февраль	0,967	0,044	0,926	0,046	0,697	0,021	6:27	0,014	7:54	0,017
3	Март	0,912	0,055	0,821	0,068	0,61	0,038	6:17	0,011	7:48	0,014
4	Апрель	0,832	0,067	0,737	0,056	0,51	0,052	5:49	0,010	6:56	0,015
5	Май	0,798	0,038	0,714	0,032	0,45	0,011	5:58	0,015	6:55	0,013
6	Июнь	0,819	0,035	0,758	0,025	0,493	0,025	6:39	0,009	6:55	0,009
7	Июль	0,826	0,044	0,792	0,038	0,566	0,039	6:23	0,019	7:13	0,013

8	Август	0,827	0,033	0,790	0,031	0,579	0,03	6:15	0,016	7:33	0,019
9	Сентябрь	0,75	0,022	0,696	0,025	0,474	0,022	6:31	0,011	7:18	0,014
10	Октябрь	0,825	0,043	0,732	0,048	0,472	0,03	6:16	0,010	7:42	0,021
11	Ноябрь	0,896	0,066	0,838	0,066	0,557	0,039	6:25	0,011	8:01	0,021
12	Декабрь	0,947	0,052	0,903	0,052	0,63	0,026	6:35	0,010	8:14	0,023

Для характеристики формы графиков можно использовать также моменты времени T_1, T_2, T_3, T_4 , соответствующие временам ночной, утренней, дневной и вечерней нагрузок – рис.3. Важными характеристиками суточных графиков нагрузки, кроме абсолютных и относительных ее значений, являются также продолжительности максимумов и минимумов нагрузки. За продолжительность максимума можно принимать время, равное половине периода синусоиды, совпадающей положительной полуволной с кривой максимума нагрузки, а за продолжительность минимума нагрузки - время, равное половине синусоиды, совпадающей отрицательной полуволной с кривой минимума нагрузки – рис.3.

Таким образом, с помощью моментов времени T_1, T_2, T_3, T_4 и относительных значений амплитуд суточного графика для этих моментов времени можно достаточно полно описать форму суточных графиков параметров нагрузки.

Рис.7. Зависимость коэффициентов формы графика напряжения от температуры.

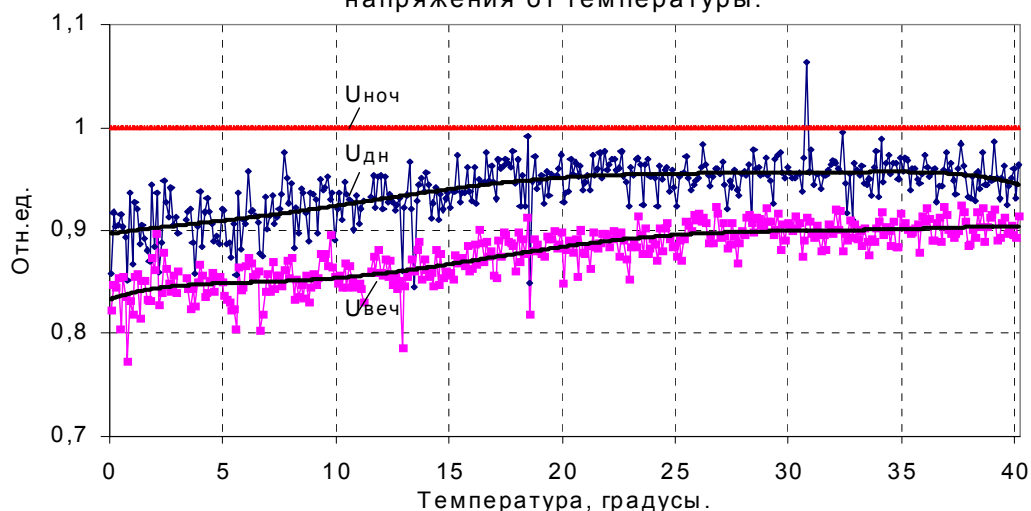


Рис.8. Зависимость коэффициентов формы графика тока от температуры.

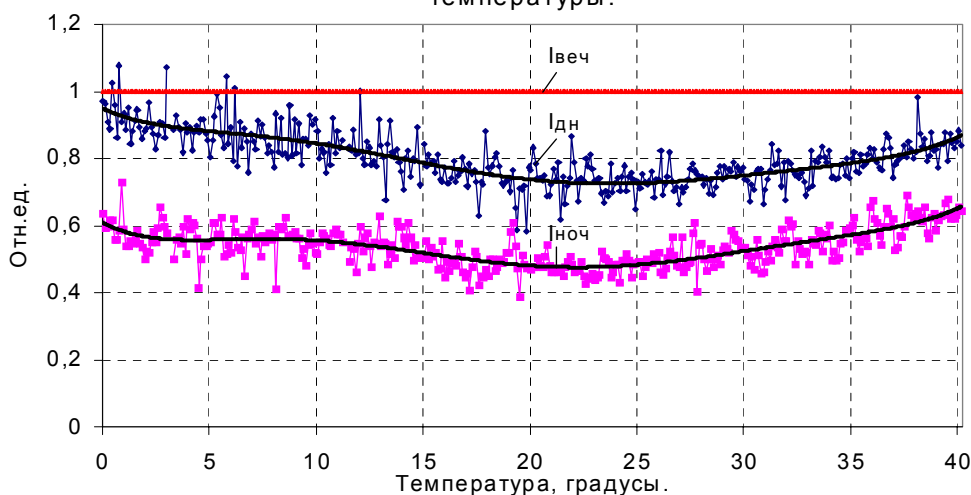


Рис.9. Зависимость коэффициентов формы графика электропотребления от температуры.

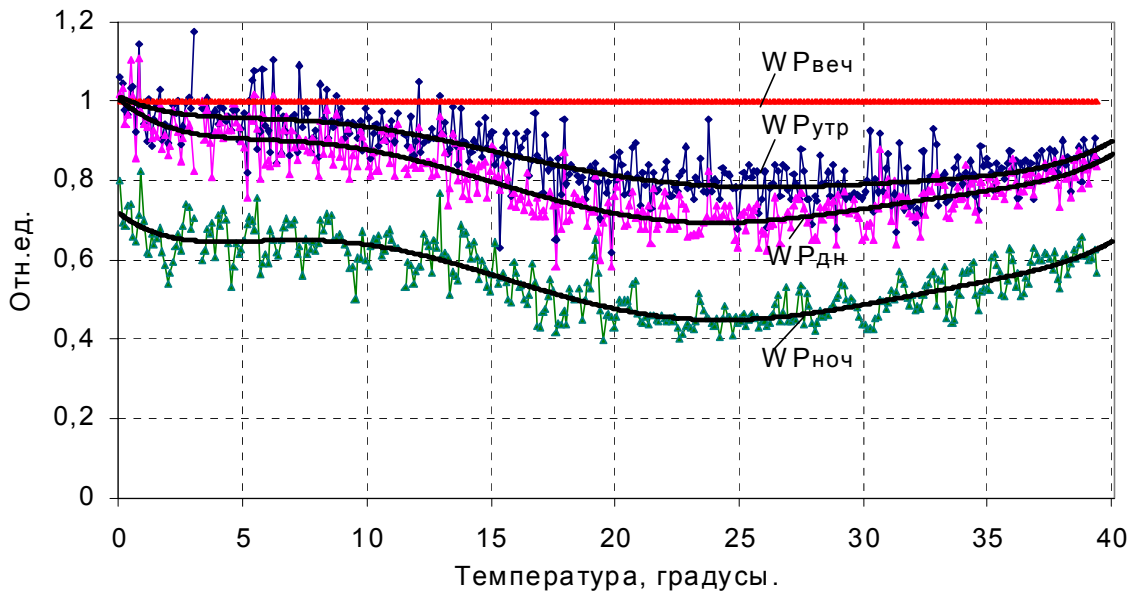
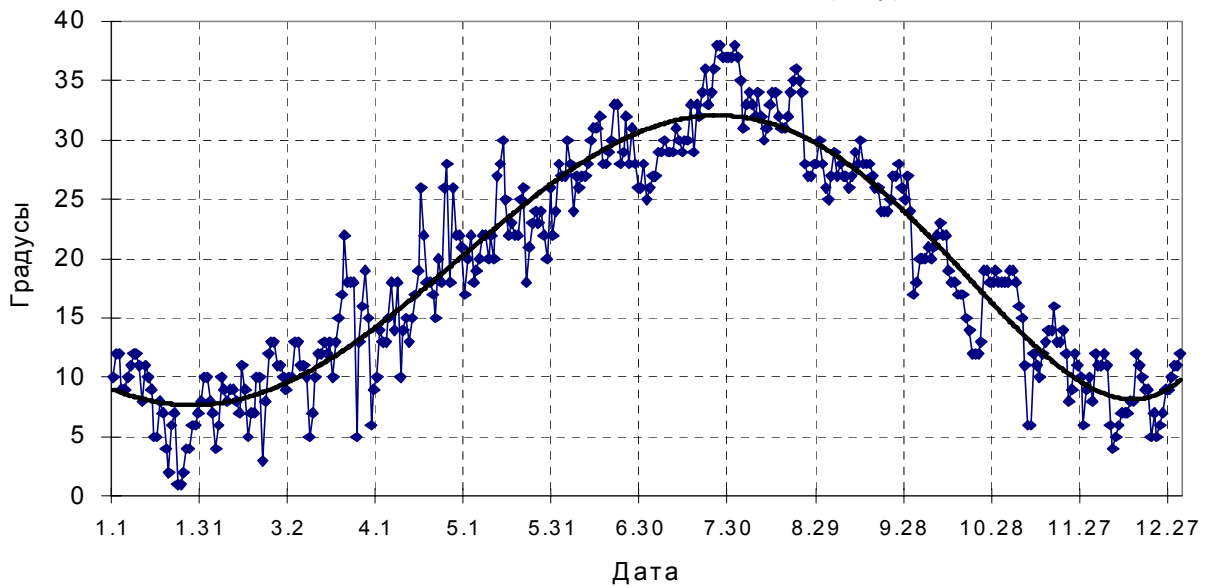


Рис.10. Годовые изменения температуры



На всех диаграммах сезонной зависимости коэффициентов формы суточных графиков нагрузки - рис.4-6, прослеживаются статистические закономерности на фоне случайных колебаний значений этих коэффициентов. Колебания, с одной стороны, имеют случайную природу, с другой - обусловлены случайными погодными условиями и колебаниями температуры в течение года – рис.10. Среднемесячные дневные температуры и отклонения их в течение года производства замеров (2001 г.) представлены в таблице 5.

Таблица 5.

№	Температура	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
1	Средняя	7,4	8,7	12,4	17,8	22,4	28,5	31,7	32,3	26,7	18	12,5	8,6
2	Отклонение	2,8	1,9	3,2	3,6	2,3	1,9	3,3	2,4	1,3	2,2	3	2,1

Для каждого времени сезона характерны некоторые среднестатистические дневные температуры, значения которых можно приближенно оценить с помощью выражения:

$$T^0(n) = 20^0 - 15^0 * \cos(2\pi * (n-30)/365) \pm 3\sigma(N),$$

где n – день года ($n=1 \div 365$),

N – месяц года ($N=1 \div 12$),

σ – стандартное отклонение.

Усредненные значения коэффициентов формы суточных графиков нагрузки для ожидаемой средней температуры, определяемой по вышеприведенной формуле, можно найти по кривым - рис.7-9. Скорректировать приближенные значения этих коэффициентов можно по более точным прогнозам температур для конкретных дней года.

Кривые температурной зависимости коэффициентов формы суточных графиков нагрузки – рис.7-9, получены с помощью компьютерных методов фильтрации данных годовой регистрации нагрузки и режимных параметров и упорядочены по возрастанию температуры в виде последовательности данных, позволяющих построить аппроксимирующие кривые и найти с помощью численных методов коэффициенты полиномов нелинейной регрессии. Ниже в виде уравнений регрессии даются температурные зависимости коэффициентов формы суточных графиков для напряжений, токов и электропотребления. Суточный график электропотребления совпадает по форме с суточным графиком активной мощности. Поэтому коэффициенты суточного графика активной мощности могут приниматься такими же, как и суточного графика электропотребления активной мощности.

Температурные зависимости коэффициентов формы суточных графиков напряжения, тока и нагрузки.

Коэффициенты формы суточного графика напряжения.

- Напряжение в дневное время суток по отношению к максимальному напряжению в ночное время:

$$U_{\text{дн}}(T) = 0,896 + 1,63 * 10^{-3} T + 1,36 * 10^{-4} T^2 - 3,952 * 10^{-6} T^3$$

- Напряжение в вечернее время по отношению к максимальному напряжению в ночное время:

$$U_{\text{веч}}(T) = 0,838 + 2,841 * 10^{-4} T + 1,651 * 10^{-4} T^2 - 3,975 * 10^{-6} T^3$$

Коэффициенты формы суточного графика тока.

- Ток в дневное время по отношению к максимальному току в вечернее время:

$$I_{\text{дн}}(T) = 0,602 - 3,456 * 10^{-3} T - 2,791 * 10^{-4} T^2 + 1,125 * 10^{-5} T^3$$

- Ток в ночное время по отношению к максимальному току в вечернее время:

$$I_{\text{ноч}}(T) = 0,977 - 0,014 T - 5,693 * 10^{-5} T^2 + 8,46 * 10^{-6} T^3$$

Коэффициенты формы суточного графика электропотребления (мощности).

- Утренняя нагрузка (мощность) по отношению к максимальной нагрузке в вечернее время:

$$WP_{\text{утр}}(T) = 1,015 - 2,579 * 10^{-3} T - 7,358 * 10^{-4} T^2 + 1,907 * 10^{-5} T^3$$

- Дневная нагрузка (мощность) по отношению к максимальной нагрузке в вечернее время:

$$WP_{\text{дн}}(T) = 0,999 - 9,782 * 10^{-3} T - 5,03 * 10^{-4} T^2 + 1,779 * 10^{-5} T^3$$

- Ночная нагрузка (мощность) по отношению к максимальной нагрузке в вечернее время:

$$WP_{\text{ноч}}(T) = 0,696 + 5,498 * 10^{-4} T - 1,075 * 10^{-3} T^2 + 2,761 * 10^{-5} T^3$$

Смещения в течение года моментов времени наступления характерных суточных нагрузок (T_1, T_2, T_3, T_4) представлены на рис.11 и достаточно хорошо согласуются с характером изменения светлого времени суток в течение года. Характер изменения в течение года продолжительности максимума и минимума нагрузки ($T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$), приведенный на рис.12, также соответствует изменению в течение года продолжительности светлого времени суток.

Рис.11. Время минимумов T1, T3 и максимумов T2, T4 суточного графика нагрузки.

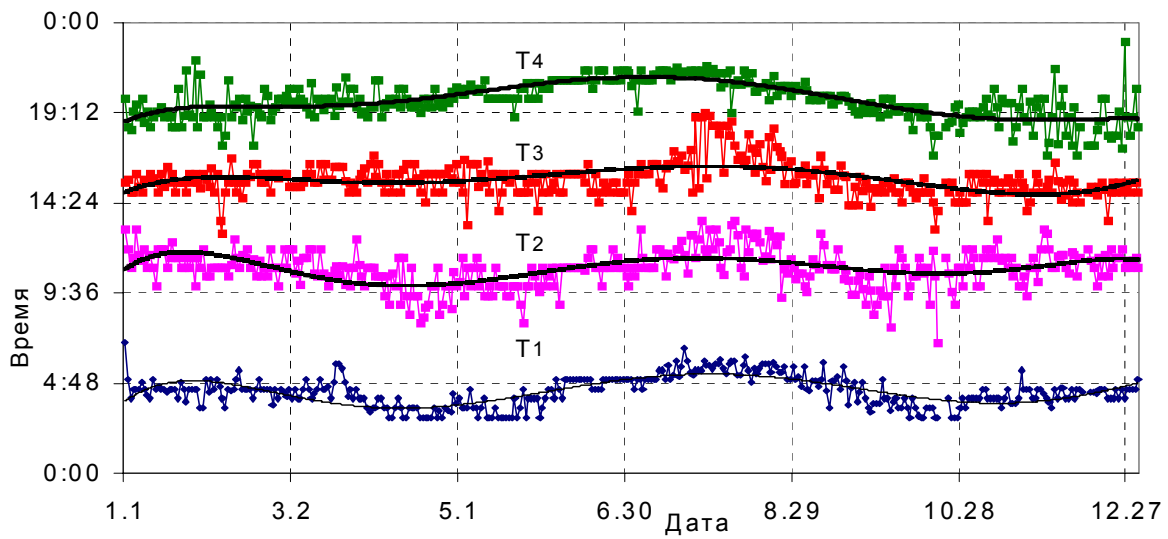
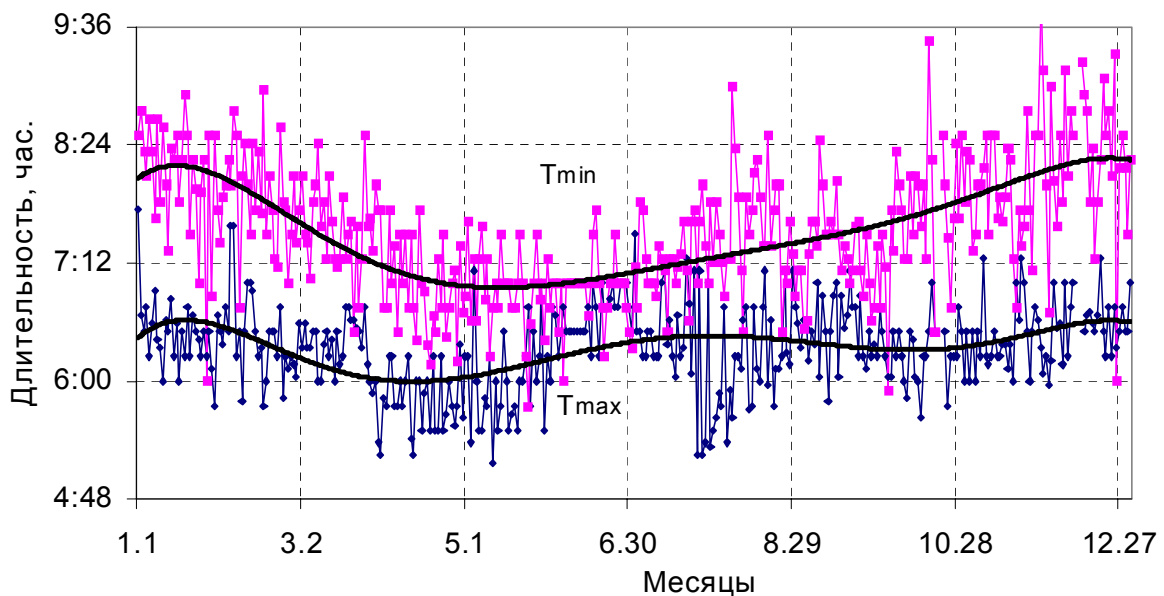


Рис.12. Длительность вечернего максимума и ночного минимума нагрузки



Резюме: На основании данных замеров нагрузки и режимных параметров построены диаграммы сезонной зависимости коэффициентов формы суточных графиков напряжения, тока и электропотребления. Найдены математические выражения зависимости коэффициентов формы от температуры и построены соответствующие диаграммы этих зависимостей. Полученные зависимости могут быть использованы, например, для прогнозирования максимальных суточных нагрузок по результатам выборочных замеров нагрузки, прогноза качества напряжения, планирования ограничений при дефиците мощности энергосистемы.

1. Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г. Сезонная зависимость электропотребления. «Проблемы энергетики» 2002 г №4, с.31-39.
2. Тимченко В.Ф. Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем. М. Энергия. 1975 г. с.208.

3. *Мустафаев Р.И., Миронов Г.А., Миронов Р.Г.* Сезонные колебания напряжения в распределительных сетях 6-10 кВ. «Проблемы энергетики» 2002 г №1-2, с.25-53

REJİM PARAMETRLƏRİ VƏ SUTKALIQ YÜK QRAFİKLƏRİ

MUSTAFAYEV R.İ., MIRONOV R.G.

Rejim parametrlərinin avtomatik qeydiyyatına əsasən, sutkalıq yük qrafiklərinin formalarının mövsümdən asılılığı əmsalları tədqiq olunur. Sutkalıq qrafiklərin temperaturdan asılılığı əmsalları formalarını müəyyən edən reqressiya tənlikləri verilmişdir.

THE DAILY DIAGRAMS of LOADING and REGIME PARAMETERS

MUSTAFAYEV R.I., MIRONOV R.G.

On the basis of automatic registration of regime parameters the seasonal dependences of factors of the form of the daily diagrams of loading are investigated. The equations of regresses determining dependence of factors of the form of the daily diagrams from temperature are submitted.