

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-52-83:656.56

А.В. Серебряков, В.Г. Титов, Е.А. Чернов, А.В. Шахов

## ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены процессы формирования графиков нагрузки автономных потребителей. Определены средняя установленная мощность и критическая минимальная нагрузка автономного жилого дома, они не превышают 20 кВт и 2 кВт соответственно. Предложено создание системы электроснабжения с обособлением тепловой нагрузки с целью экономии средств на создание автономного генераторного комплекса. Проведен сравнительный анализ схем автономных систем электроснабжения для определения экономического эффекта от использования схемы с дифференцированием нагрузки. Эффект выразился в экономии топлива традиционного источника по сравнению со схемой с постоянно работающей дизель-энергетической установкой (ДЭУ) при суммарной установленной мощности автономных источников энергии 20 кВт.

*Ключевые слова:* автономный источник энергии, ветроэнергетическая установка, электромеханическая часть, инвариантная система, преобразователь частоты, синхронный генератор.

### Введение

Положительная динамика развития отечественной промышленности и увеличение уровня потребления электроэнергии населением стимулируют расширение масштабов исследований и разработок, направленных на совершенствование топливно-энергетического комплекса РФ и экономии традиционных углеводородных источников электроэнергии (ТИЭ) [1, 2]. Это обусловило поиск новых стратегий энергоэффективного и экономичного энергообеспечения российских потребителей с привлечением нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Новая аппаратная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники дополнительно стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых агрегатов и систем [3].

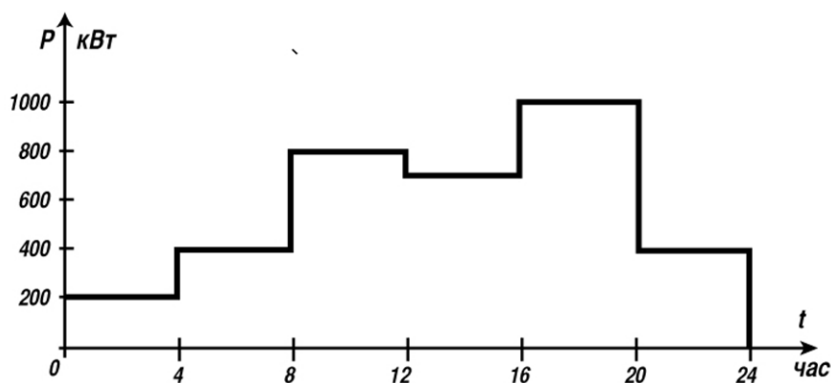


Рис. 1. Характерный график нагрузки автономного потребителя

Автономный источник энергии должен обеспечивать длительное бесперебойное питание объекта при различных параметрах окружающей среды. Значительное влияние на формирование структуры системы электроснабжения (СЭС) оказывает электрическая нагрузка [4]. Процесс формирования электрических нагрузок потребителя имеет вероятностный характер (рис. 1), поэтому при определении закономерностей формирования и числовых значений графика нагрузок потребителя можно использовать общепринятые методы теории вероятностей и математической статистики. На основании этих методов устанавливаются числовые характеристики и законы распределения рассматриваемых величин.

### Математическая модель системы электроснабжения автономных потребителей

Рассмотрим процесс формирования графика нагрузки группы электроприемников автономных потребителей. Включение и выключение отдельных электроприемников можно рассматривать как случайные события. Как известно, случайный процесс - график нагрузки - характеризуется функцией распределения, математическим ожиданием и корреляционной функцией, которая отражает зависимость между параметрами процесса. Если допустить, что электроприемники включаются независимо друг от друга, то число электроприемников из общего их числа, работающих одновременно и составляющих групповую нагрузку может быть определено по биномиальному закону. В этом случае вероятность работы  $m$  электроприемников из общего их числа  $n$  определяется при помощи следующего выражения

$$P_{(n,m)} = \sum \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}. \quad (1)$$

Произведем построение модели нагрузок «среднего» автономного жилого дома (усадыбы) с небольшим хозяйством, энергоснабжение которого осуществляется от автономного источника энергии. Сложность моделирования нагрузок заключается, прежде всего, в большом разнообразии электроприемников. Тем не менее, несмотря на зависимость вида и количества электроприемников от таких факторов как вид хозяйства, уклад семьи, состав семьи, уровень жизни, район и многих других, возможно, построить модель некоего «среднего» автономного жилого дома (усадыбы) с небольшим хозяйством. Для построения такой модели разработана карта сбора статистических данных, которая была предложена владельцам 12 хозяйств в разных районах РФ.

На основании результатов обработки данных по набору электроприемников, их мощности и годового потребления электроэнергии (табл. 1), а также характерного графика нагрузки автономного потребителя, можно сделать следующие выводы:

- установленная мощность электроприемников в большинстве индивидуальных хозяйств не превышает 20 кВт;
- критическая минимальная нагрузка, которую должен обеспечивать источник питания, не превышает для большинства хозяйств 2 кВт. Таким образом, можно определить минимальную мощность  $P_{\min}$  резервного источника в самом худшем варианте.

Таблица 1

#### Характеристики электроприемников

№ п/п	Наименование	Кол-во	Вт	Число часов работы в день	кВт*ч в год
1	2	3	4	5	6
	Хозяйственно-бытового назначения				
1	Холодильник	1	350	8	1022
2	Телевизор	2	120	6	262,8

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
3	DVD проигрыватель	1	17	4	24,82
4	Музыкальный центр	1	75	4	109,5
5	Кондиционер	1	1700	2	1241
6	Утюг	1	1400	0,25	150
7	Пылесос	1	900	0,2	65,7
8	Стиральная машина	1	2000	0,2	146
9	Вентилятор	1	50	2	36,5
10	Швейная машина	1	210	0,1	7,665
11	Электромиксер	1	150	0,2	10,95
12	Электробритва	1	15	0,2	1,095
13	Электрическое освещение	-	850	3	930,75
14	Электрический насос	1	270	6	591,3
15	Машина сверлильная	1	420	0,5	76,65
16	Машина шлифовальная угловая	1	1200	0,1	43,8
17	Электрорубанок	1	300	0,2	21,9
18	Пила дисковая	1	1500	0,2	109,5
19	Компрессор	1	420	0,2	30,66
20	Фен промышленный	1	480	0,2	35,04
Производственного назначения					
21	Опрыскиватель	1	250	0,1	9,125
22	Станок токарный	1	1600	1	584
23	Кормодробилка	1	2000	1	730
24	Сепаратор	1	350	1	127,75
25	Электрокосилка	1	1000	0,5	182,5
	Итого		17627		6912,005

На основе полученных данных можно построить имитационную модель потребления электрической энергии (рис. 2).

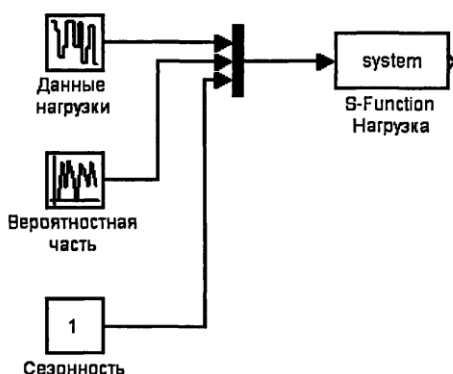


Рис. 2. Упрощенная модель нагрузки автономных потребителей

Данная модель включает постоянную часть (реальные усредненные статистические данные потребителей) и переменную часть (вероятностная составляющая на основе нормального распределения). При построении модели учитывались также следующие факты. В целях устранения возможных убытков от перерыва в энергоснабжении источник питания должен

обеспечивать минимально необходимую мощность  $P_{\min}$  для питания определенных электроприемников. Принимаем  $P_{\min} \sim 2000$  Вт.

Таким образом, мощность источника гарантированного питания не должна быть ниже 2000 Вт. Сезонность графика нагрузки учитывалась коэффициентами для весенне-летнего ( $K=1$ ) и осенне-зимнего периодов. Приведенная модель может быть использована для расчета вероятности совпадения нагрузки и поступления энергии для включения в общую модель системы автономного электроснабжения.

Однако обособление тепловой нагрузки 3-й категории позволяет значительно снизить установленную мощность силовой преобразовательной части АГК и повысить энергетические показатели ДЭУ. Поэтому необходимо знать суточные графики потребления не только общей нагрузки, но и отдельно тепловой, которая является также случайной величиной, зависящей, главным образом, от температуры окружающего воздуха в данном пункте.

### Построение суточных графиков нагрузки автономных потребителей

Для получения графиков нагрузки необходимо проводить систематические измерения потребляемой мощности в течение суток [5].

При определении степени согласованности случайных величин допускается для получения графиков их изменения применять экспертные оценки - один из видов пассивного эксперимента. Для сокращения времени экспериментов воспользуемся правилом приведения одной случайной величины к другой, которое состоит в следующем. Чтобы случайную величину  $X$  привести к случайной величине  $Y$ , имеющей такой же закон распределения, но другие статистические параметры распределения, необходимо фактически наблюдаемые значения  $X_j$  изменить, предварительно вычислив коэффициенты приведения.

На основании изложенного правила воспользуемся методикой ускоренного получения графиков нагрузки автономного пункта:

- на основании малого количества опытов (или небольшого числа экспертов) определяются значения мощности  $j$ -х нагрузок за  $i$ -й интервал и строится усредненный график нагрузки;
- определяются опытные параметры распределения нагрузки (среднее значение и среднее стандартное отклонение мощности);
- сравниваются опытные параметры с параметрами генеральной совокупности;
- изменяются значения нагрузки в  $i$ -й интервал по изложенному правилу приведения;
- строятся графики нагрузки, приведенной к генеральной совокупности.

В соответствии с изложенной методикой опрошено девять экспертов в автономных пунктах с высокой насыщенностью электрооборудованием. В результате экспертной оценки были получены данные о времени работы  $j$ -х нагрузок в  $i$ -й интервал, по которым распределение нагрузок подчиняется нормальному закону, то результаты экспертного опроса проверялись на согласие по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,05. Для этого вычислялись коэффициенты парной корреляции между значениями  $k$ -го эксперта и усредненными данными. Коэффициент корреляции вычисляется по формуле

$$r_k = \frac{\overline{P_{cp}} \overline{P_{ji}} - \overline{P_{cp}} * \overline{P_{ji}}}{\sigma_k \sigma_{cp}}, \quad (2)$$

где  $r_k$  - коэффициент корреляции между данными  $k$ -го эксперта и средними данными;  $\overline{P_{cp}}$ ,  $\overline{P_{ji}}$  - средние значения усредненного графика и по данным  $k$ -го эксперта;  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{cp}$  - стандартные отклонения усредненного графика и по данным  $k$ -го эксперта.

В соответствии с данной методикой проверки наблюдаемое значение критерия Стьюдента должно вычисляться по формуле (4) и сравниваться со стандартным значением при заданном уровне значимости и числе степеней свободы  $s = n - 2$  ( $n$  - объем выборки).

$$T = r_k \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_k^2}}. \quad (3)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента сравнивались с нормированными значениями для уровня значимости 0,05. Данные эксперта считались согласованными с реальными данными, если расчетное значение критерия Стьюдента превышало нормированное, в противном случае корреляционная связь экспертных данных с реальными данными считалась несущественной, и такие данные исключались из дальнейшего анализа.

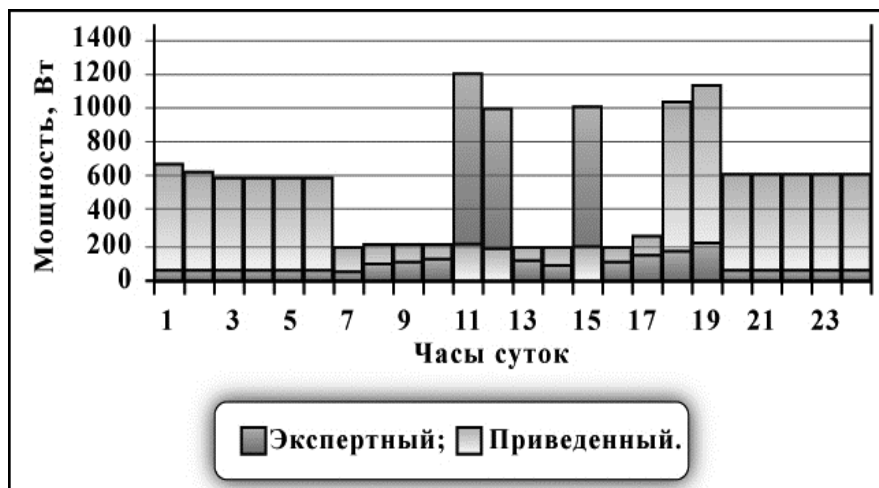


Рис. 3. График нагрузки в весенне-летний период

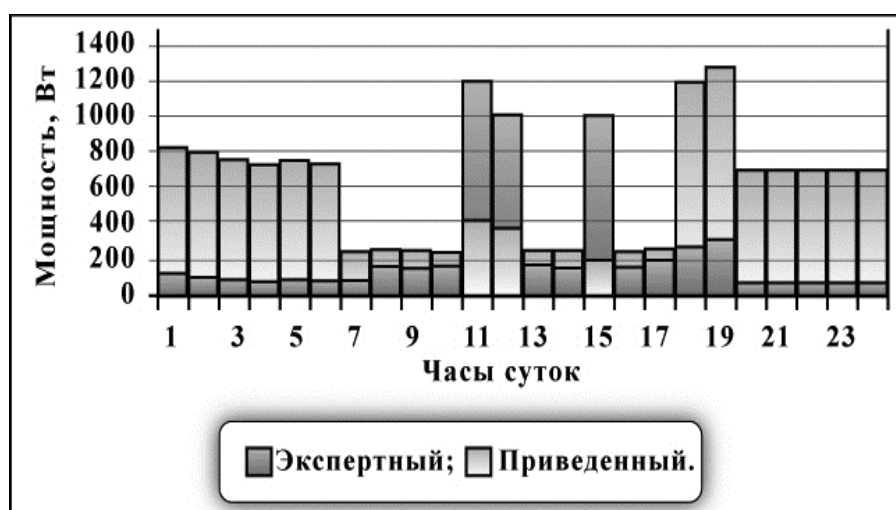


Рис. 4. График нагрузки осенне-зимний период

В справочниках приводятся параметры распределения нагрузки за дневной и вечерний максимумы. В связи с этим, для приведения экспертных графиков нагрузки к генеральной совокупности рассчитаны среднесуточные значения параметров распределения по формулам

$$\sigma_{cp} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_v^2}; \tag{4}$$

$$\bar{P}_{cp} = \frac{\bar{P}_d + \bar{P}_v}{2}; \tag{5}$$

$$\sigma_{cpj} = k_{cj} \cdot \sigma_{cp}; \tag{6}$$

$$\bar{P}_{cpj} = k_j \cdot \bar{P}_{cp}, \tag{7}$$

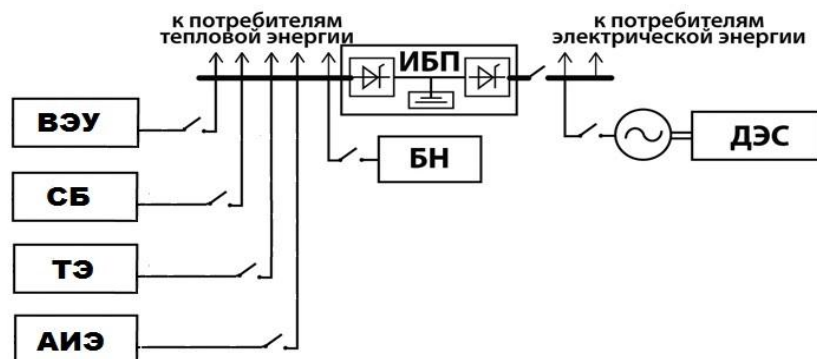
где  $\sigma_{cp}$ ,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_v$  - соответственно стандартное отклонение суточной нагрузки за дневной и вечерний периоды, Вт;  $\bar{P}_{cp}$ ,  $\bar{P}_d$ ,  $\bar{P}_v$  - математические ожидания соответственно суточной нагрузки за дневной и вечерний периоды, Вт;  $\sigma_{cpj}$  - стандартное отклонение суточной нагрузки за  $j$ -

ый сезон года, Вт;  $\bar{P}_{срj}$  - математическое ожидание суточной нагрузки за  $j$ -ый сезон года, Вт;  $k_j$  - коэффициент сезонности для  $j$ -го сезона года.

Приведенные графики электрических нагрузок (рис. 3, рис. 4) отражают наиболее вероятные значения нагрузок для генеральной совокупности объектов.

### Структура автономной системы электроснабжения с дифференцированием нагрузки

Авторами предлагается создание более экономичной структуры автономной СЭС в рамках комбинированного генераторного комплекса с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки потребителей (рис. 5).



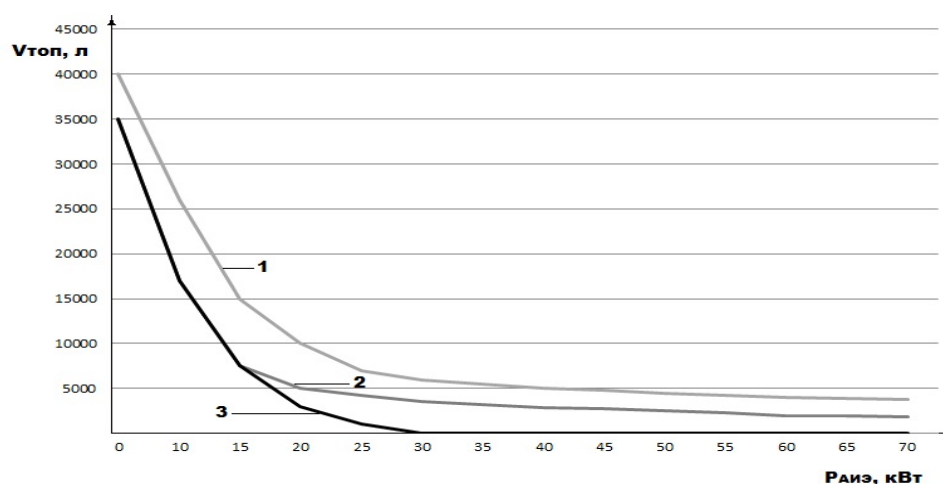
**Рис. 5. Схема автономной СЭС с дифференцированием нагрузки:**

ВЭУ - ветроэнергетическая установка; СБ - солнечные батареи; ТЭ - топливные элементы;

АИЭ - альтернативный источник энергии; БН - балластная нагрузка;

ИБП - источник бесперебойного питания; ДЭС - дизель-энергетическая станция

Данная схема обеспечивает подключение потребителей 3-й категории напрямую к шинам источника энергии, а все потребители электроэнергии питаются от автономного источника энергии через ИБП. При этом ДЭУ выполняет функцию резерва с подключением только в номинальный режим. Данная структура АГК позволяет обеспечить автономные СЭС высококачественной электроэнергией при оптимальной загрузке ДЭУ и минимальном расходе топлива ТИЭ. Сравнительный анализ схем АГК и соответствующие расчеты затрат на топливо при равных условиях эксплуатации показывают значительный экономический эффект (рис. 6) при работе по схеме с дифференцированием тепловой и электрической нагрузки.



**Рис. 6. Расход топлива ДЭУ за год в зависимости от суммарной мощности АИЭ для комбинированного АГК с ДЭУ:**

1 - АГК с постоянно работающей ДЭУ; 2 - АГК с накопителем энергии;

3 - АГК с дифференцированием нагрузки и накопителем энергии

### Выводы

Анализ результатов обработки данных по набору электроприемников, их мощности и годового потребления электроэнергии, характерного графика нагрузки автономного потребителя, суточных графиков нагрузки потребителей показал:

- установленная мощность электроприемников в большинстве индивидуальных хозяйств не превышает 20 кВт;
- критическая минимальная нагрузка, которую должен обеспечивать источник питания, не превышает для большинства хозяйств 2 кВт;
- тепловая нагрузка 3-й категории составляет до 60 % от общей установленной мощности автономного потребителя.

Предложенная структура автономной СЭС с дифференцированием нагрузки позволяет значительно экономить топливо ТИЭ и снизить капитальные затраты на создание автономного источника энергии за счет питания потребителей 3-й категории напрямую от шин источника энергии.

### Библиографический список

1. **Онищенко, Г.Б.** Новое поколение автономных ветроэнергетических установок / Г.Б. Онищенко, Л.Я. Хаскин // МГОУ-XXI-Новые технологии. 2007. №5. С. 41–47.
2. **Онищенко, Г.Б.** Развитие энергетики России. Направления инновационно-технологического развития / Г.Б. Онищенко, Г.Б. Лазарев. – М.: РСА, 2008. – 200 с.
3. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Редакция 5.0 / В.Е. Фортов [и др.]. – М.: ОАО «НТЦ Электроэнергетики», 2012. – 220 с.
4. **Дарьенков, А.Б.** Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. Т. 77. С. 68–72.
5. **Васенин, А.Б.** Концепция систем автономного электроснабжения объектов / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, В.Г. Титов // Сб. тезисов XII Всемирного электротехнического конгресса (ВЭЛК-2011). – М.: ВЭИ. 2011. С. 28–30.

*Дата поступления  
в редакцию 16.04.2015*

**A.V.Serebryakov, V.G.Titov, E.A. Chernov, A.V. Shahov**

### DIFFERENTIATION LOADS IN POWER SYSTEMS AUTONOMOUS CONSUMERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Processes of formation of load graphs of autonomous consumers have been considered. Medium set power and critical minimal load of autonomous house have been determined, they don't exceed 20 kW and 2 kW correspondingly. Creation of power supply system with separation of thermal load for the purpose of economy of means on creation of autonomous generator complex has been suggested. Comparative analysis of schemes of autonomous power supply systems for determination of economic effect from the usage of the scheme with load differentiation has been carried out. Effect has been expressed in economy of the fuel of traditional energy comparing to the scheme with the constantly working electrical plant with the summary set power of autonomous energy sources 20 kW.

*Key words:* autonomous energy source, wind power plant, electromechanical part, invariant system, frequency converter, synchronous generator.