

УДК 621.311.153

Б. С. СЕРЕБРЕННИКОВ, канд. экон. наук, доцент

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев

Е. Г. ПЕТРОВА, аспирант

Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Доказана возможность сокращения потерь электроэнергии в сетях промышленных предприятий и расходов на ее оплату за счет выравнивания графика электрических нагрузок методом сетевого планирования и управления.*

*Доведено можливість скорочення витрат електроенергії в мережах промислових підприємств і економії витрат на її оплату за рахунок вирівнювання графіка електричних навантажень методом сітьового планування та управління.*

### Постановка проблемы

Обычно при поиске возможностей электросбережения на промышленных предприятиях (ПП) первоочередное внимание уделяется мероприятиям в освещении, компенсации реактивной мощности, электронагреве и др., в тоже время недостаточно полно рассматриваются вопросы оптимизации режима электропотребления. Практический интерес представляет исследование возможности повышения эффективности электропотребления за счет использования технологического ресурса, поскольку при этом можно ожидать как снижения потерь энергии в сетях ПП, так и экономии в оплате электрической энергии (ЭЭ).

К выравниванию режима электропотребления во времени стремятся, прежде всего, объединенная энергосистема (ОЭС) и производители ЭЭ, в то время как для потребителей наиболее важным является, чтобы в результате регулировок было достигнуто сокращение платы за ЭЭ. Для достижения совокупности этих целей в действие введены дифференцированные во времени тарифы, которые призваны стимулировать к перераспределению мощности электропотребления из зон пика и полупика графика электрических нагрузок (ГЭН) в ночную зону. Однако, малое количество ПП, перешедших на дифтарифы, свидетельствует о слабой экономической заинтересованности, а также об отсутствии несложных, эффективных методов регулирования режима электропотребления за счет технологического ресурса.

### Анализ исследований и публикаций

В [1–3] освещаются аспекты управления электропотреблением для его выравнивания в течение суток. Вместе с тем, в отмеченных работах не учитываются специфика и индивидуальные возможности отдельных потребителей к регулированию. В наименее выгодном положении находятся ПП с жестким технологическим процессом (ТП) и трехсменным режимом работы, наиболее ограниченные в возможности регулирования режима электропотребления. Для таких ПП целесообразно применять либо аддитивное смещение всего ТП во времени [4], либо локальную регулировку в пределах технологического цикла [5]. Авторы [5] усовершенствовали метод управления режимами электропотребления с использованием ресурса ТП путем построения концептуальной модели электропотребления обобщенного ТП и определения условий перераспределения электрической мощности на интервале времени технологического цикла. В то же время, предложенные подходы отличаются сложностью и применимы лишь для ограниченного круга ТП, например, – при электролизе, измельчении полезных ископаемых, транспортировке нефти с использованием регулируемых электроприводов.

Поэтому, актуальным является дальнейший поиск универсальных методов

снижения общей неравномерности режима электропотребления.

**Целью статьи** является изыскание упрощенных инженерных методов регулирования режима электропотребления с использованием технологического ресурса для снижения потерь энергии в сетях ПП и уменьшения расходов на оплату ЭЭ.

### Материал исследований

Как правило, модернизация ТП на ПП сопряжена с повышением производительности и качества продукции; в нашем же примере, предлагаемые изменения в ТП осуществляются с целью оптимизации режима электропотребления. Адаптируя метод сетевого планирования и управления (СПУ) к поставленной задаче, попытаемся уменьшить общую неравномерность ГЭН, сохранив при этом неизменными структуру, длительность и энергоемкость ТП.

Исходными данными о ТП, необходимыми для расчета регулирующих действий, являются: перечень энергоемких операций, последовательность их выполнения, длительность и мощность электронагрузок каждой из них. На основе этой информации синтезируем сетевую модель (СМ), отображающую все технологические взаимосвязи и результаты операций.

Проиллюстрируем применение метода СПУ на примере реального цеха ПП с дискретным ТП, схема СМ которого представлена на рис. 1.

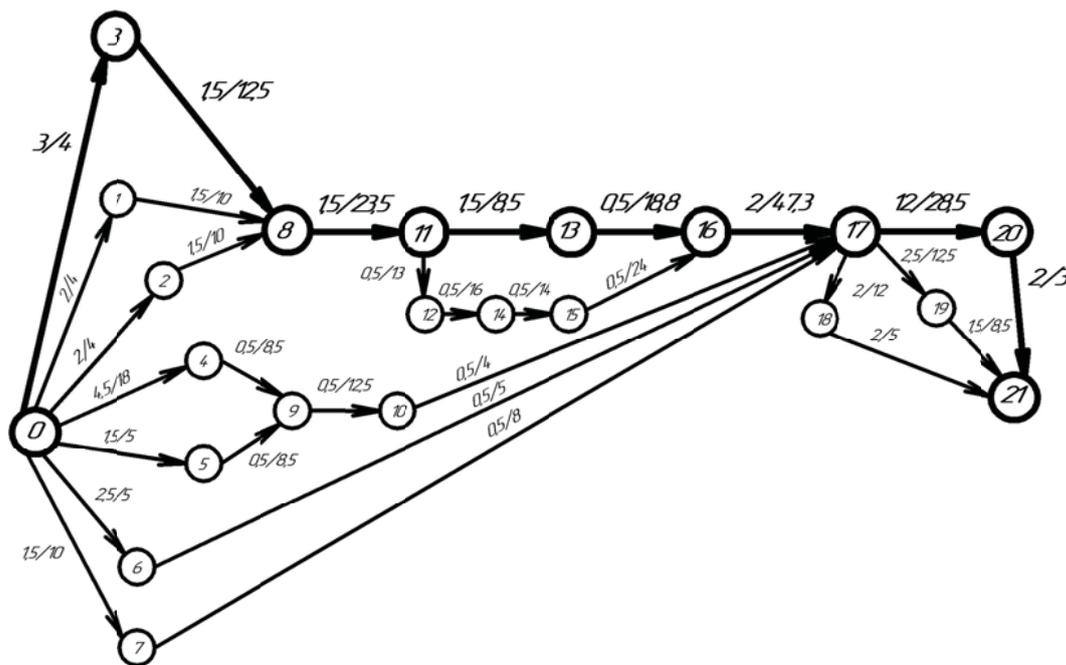


Рис. 1. Схема сетевой модели технологического процесса (в числителях дробей – длительность операций в часах, в знаменателях – потребляемая электрическая мощность в кВт)

События на СМ обозначены номерами от 0 до 21 (событием является итог выполнения одной или нескольких предыдущих операций). Каждая операция требует определенных энергоресурсов и времени на выполнение; графически операции изображены в виде направленных отрезков, связывающих события, с обозначением возле них длительности  $t$  и потребляемой электрической мощности  $P$  ( $t/P$  на рис. 1). СМ содержит разветвления, каждое из которых включает определенную последовательность операций. На рис. 1 утолщенной линией показана последовательность максимальной длительности, которая является критической. Все другие последовательности имеют меньшую длительность, что и обеспечивает наличие резервов времени  $R_t$ , которые рассчитываются как разница длительностей критической и рассматриваемой последовательностей. Значение  $R_t$  определяет степень регулирования режима

электропотребления, поскольку показывает наибольшую возможную величину смещения электронагрузок параллельных операций вдоль технологического цикла (без влияния на скорость и качество других операций и ТП в целом).

Аналитический расчет параметров регулирования включает два этапа: на 1-м производится оценка показателей СМ [6] и определение  $R_t$ , в котором можно смещать ту или иную операцию без ущерба для ТП; после этого можно приступить ко 2-му этапу – непосредственно к фазе регулирования, где из пиковой зоны ГЭН (рис. 2) целесообразно выводить ту или иную мощность нагрузки в пределах найденного оптимального диапазона смещения  $\Delta t$ . При этом эффективность регулирования оценивается по значению показателей неравномерности ГЭН, сокращению потерь ЭЭ и ее оплаты.

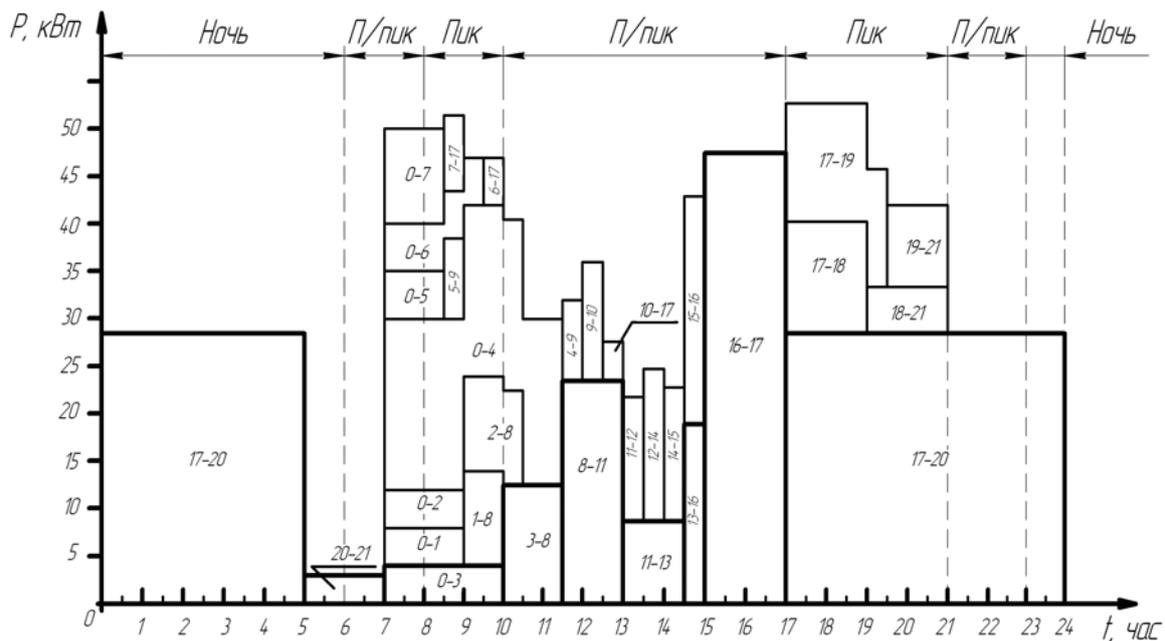


Рис. 2. Исходный график электропотребления цеха в течение суток (номера «i-j» обозначены шифры операций; пунктирной линией выделены границы тарифных зон)

Проанализируем неравномерность исходного суточного ГЭН ТП (рис. 2), предварительно разложив его на прямоугольники, ширина которых равна длительности соответствующей операции, а высота – мощности, потребляемой задействованным электрооборудованием. При этом, сначала выделим цепочку прямоугольников для операций критической последовательности (прямоугольники с утолщенной линией), а над ними надстроим прямоугольники соответствующих некритических операций. Площадь каждой фигуры на рис. 2 характеризует энергию  $W_{i,j}$ , потребляемую при выполнении операции «i-j». Вся электроэнергия, потребляемая ТП за сутки, составляет  $W_{СУТ}=822,5$  кВт·час.

Синтез нового ГЭН (рис.3) следует проводить на основе результатов расчета  $R_t$  и  $\Delta t$  путем целенаправленного перераспределения стартов и финишей операций, руководствуясь прежде всего критерием уменьшения неравномерности ГЭН.

Так, благодаря реализации найденных резервов  $R_{i,j}=0...8$  часов [6] ( $R_{i,j}=0$  для операций критической последовательности), нами перемещено время выполнения 6 операций энергоемкостью  $W_{i,j}=78$  кВт·ч (9,5 % от  $W_{СУТ}$ ) в пределах  $\Delta t=4...5$  час; например, операцию «17–19» перемещено из пиковой зоны частично в зону полупика ( $W_{17-19}^1=25$  кВт·ч) и частично – в ночную зону ( $W_{17-19}^2=6,25$  кВт·ч); операцию «19–21» из пиковой – полностью в ночную зону ( $W_{19-21}=3,75$  кВт·ч) и т. д. (см. рис. 3).

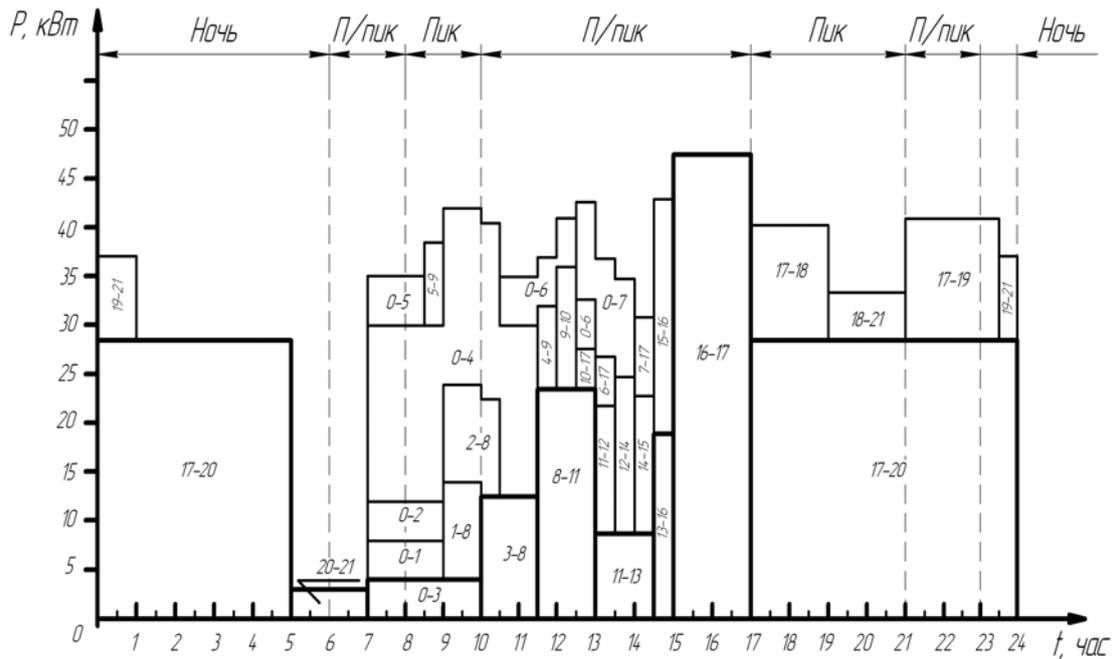


Рис. 3. График электропотребления  $P(t)$  после регулирования

Из сравнения конфигураций ГЭН на рис. 2 и рис. 3 видно, что в результате такого регулирования достигнуты повышение равномерности суточного ГЭН, о чем свидетельствуют изменение основных показателей неравномерности (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение показателей неравномерности ГЭН до и после регулирования режима электропотребления

Варианты режима электропотребления	Основные показатели неравномерности ГЭН				
	$K_{зг}$	$K_M$	$K_{нр}$	$K_\phi$	$Dp$
Исходный (рис.2)	0,6466	1,5465	0,0566	1,5206	183,28
После регулирования (рис.3)	0,7245	1,3801	0,06342	1,4835	147,058

Из анализа приведенных в табл.1 показателей неравномерности двух ГЭН следует, что:  
 – коэффициент заполнения графика  $K_{зг}$  увеличился на 12 %, а следовательно, возросла и общая равномерность (для абсолютно равномерного ГЭН  $K_{зг} \rightarrow 1$ );

– коэффициент неравномерности  $K_{нр}$  увеличился на 10,8 %, то есть снизился размах графика (разница между  $P_{MIN}$  и  $P_{MAX}$ );

– коэффициент формы  $K_\phi$  уменьшился с 1,5206 до 1,4835, что говорит о приближении  $P_{СРКВ}$  к  $P_{СР}$ .

Улучшились так же остальные показатели неравномерности ГЭН – коэффициент максимума  $K_M$  и дисперсия  $Dp$ .

Выравнивание ГЭН способствует электросбережению за счет минимизации потерь ЭЭ в сетях ПП; по известным значениям коэффициентов формы до и после выравнивания ГЭН (табл. 1) при средней величине потерь в сетях ПП 20,7 % [7] от всей потребляемой ТП электроэнергии  $W_{свт}$ , вычислим величину уменьшения потерь электроэнергии за сутки согласно [3]:

$$\delta W_c = \Delta W_H \cdot \left( 1 - \frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} \right) = \frac{20,7 \% \cdot 822,5}{100 \%} \left( 1 - \frac{1,4835^2}{1,5206^2} \right) = 8,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где  $\Delta W_H$  – потери электроэнергии в электросети цеха ПП до реализации мероприятий по выравниванию графика нагрузки;

$K_{\phi_1}$ ,  $K_{\phi_2}$  – коэффициенты формы графика соответственно до и после выравнивания.

Кроме эффекта электросбережения, проведенное выравнивание ГЭН приводит так же к уменьшению оплаты ЭЭ по дифференцированному тарифу (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета оплаты ЭЭ по дифференцированному тарифу

№ п/п	Зона суток	Варианты регулирования электропотребления	
		Исходный, до регулирования	После регулирования
1	Потребление электроэнергии по зонам суток $W_i$ , кВт·час		
	а) пик	289,75	226,75
	б) полупик	358,75	402,75
	в) ночь	174	193
	<b>Всего за сутки</b>	<b>822,5</b>	<b>822,5</b>
2	Плата за электроэнергию по зонам суток, грн		
	а) пик	461	361
	б) полупик	346	389
	в) ночь	58	64
	<b>Всего за сутки</b>	<b>865</b>	<b>814</b>

### Выводы

1. При регулировании ГЭН, в частности, при его выравнивании, рационально использовать метод СПУ. Универсальность метода и его доступность обуславливаются минимальным количеством исходной информации относительно ТП, простотой расчетов и возможностью применения к ПП любой отрасли.

2. В результате выявления резервов времени производства операций ТП и соответственного перемещения электрических нагрузок, достигается требуемая конфигурация ГЭН. Выравнивание ГЭН сопровождается сокращением потерь электроэнергии в сетях ПП и экономией в оплате потребленной электроэнергии.

3. Дальнейшего повышения уровня энергетической эффективности техпроцессов ПП можно ожидать при всеобъемлющем охвате регулированием ТП в целом, а так же при углублении регулирования за счет варьирования скорости выполнения операций и более широкого использования в ТП энергоэффективного оборудования.

### Список литературы

1. Праховник А. В. Контроль ефективності енерговикористання – ключові проблеми управління енергозбереженням / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, О. В. Борисенко // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит. – 2009. – № 8. – С. 41–54.

2. Розен В. П. Алгоритм и многокритериальная модель управления режимом электропотребления промышленного предприятия в условиях ограничений энергосистемы / В. П. Розен, А. Н. Закладный // Энергетика та електрифікація, – 2009. – № 2. – С.41–44.

3. Бондарчук А. С. Прогностичне оцінювання енергетичного, економічного та екологічного ефекту вирівнювання графіка електричного навантаження міста / А. С. Бондарчук, В. В. Поносов // Труды Одесского политехнического университета: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. Вып. 2 (32). – Одесса: ОГПУ, 2009. – С. 84–87.

4. Серебренников С. В. Удосконалення критеріїв пріоритетно-крокового методу регулювання електроспоживання / С. В. Серебренников, К. Г. Петрова // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 1. – С. 65–69.

5. Розен В. П. Використання внутрішніх резервів технологічних процесів при керуванні режимами електроспоживання промислових підприємств / В. П. Розен, М. В. Прокопець // Автоматизація виробничих процесів: Всеукр. наук.-техн. журн. – 2006. – №1 (22). – С. 26–30.

6. Серебренніков С. В. Підвищення економічної ефективності електроспоживання промислових споживачів методами сітьового планування та управління в умовах дії диференційованих тарифів / С. В. Серебренніков, К. Г. Петрова // Вісник Східноукраїнського національного університету: наук. журн. – № 11 (182), Ч. 2. – Луганськ: СНУ, 2012. – С. 208 – 217.

7. Сайт ПАО «Кировоградоблэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kiroe.com.ua/>

## INCREASE IN POWER EFFICIENCY OF ENGINEERING PROCESSES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

B. S. SEREBRENNIKOV, Cand. Ekon. Scie., associate professor  
K. G. PETROVA, graduate student

*The possibility of reduction of electric power losses in networks of industrial enterprises and of electric power costs due to electric load leveling by using the method of network planning and management.*

Поступила в редакцию 12.11 2012 г.