

Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко

(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Постановка вопроса. Показатели графиков электрических нагрузок отдельных электротехнологических установок имеют большое значение при расчетах нагрузок, решения вопросов компенсации реактивной мощности, обеспечения качества напряжения. Применение неполнофазных режимов питания электропечей изменяет в значительной степени параметры графика электрических нагрузок, поэтому при использовании стандартных коэффициентов неизбежно появление значительных погрешностей в определении расчетной мощности электроприемников. В данной статье рассматриваются диапазоны изменения показателей графика нагрузок при всех возможных вариантах фазности питания нагревателей печи [1].

Актуальность таких исследований обоснована недостаточным объемом информации относительно показателей графиков нагрузки трехфазных электроприемников в случае неполнофазных режимов их работы. Результаты исследований показывают, что эти параметры изменяются в очень широком диапазоне, поэтому определение зависимости параметров неполнофазных режимов электропечей от показателей графика электрических нагрузок является актуальной научно-технической задачей.

В данной работе продолжаются исследования режимов работы электропечей сопротивления (ЭПС) нового поколения с тиристорным регулированием параметров. При расчетах системы электроснабжения таких электроприемников представляет интерес характер изменения показателей графика электрических нагрузок от фазности питания установки.

Цель работы – установить зависимости показателей графика электрических нагрузок ЭПС от режимных параметров при неполнофазном питании, а также получить средние значения этих показателей, которые более удобно использовать при расчетах системы электроснабжения.

Основная часть. Регулируемые зависимости ЭПС как симметрирующего устройства [1] получены на основе установившихся значений мощности печной установки. В реальных режимах работы печи эти значения мощности изменяются на протяжении цикла термообработки в весьма широком диапазоне. Поэтому для повышения точности расчета более корректно определять параметры несимметрии, используя средние мощности. Для этого необходимо исследовать области значений коэффициентов, характеризующих изменение электрических нагрузок. Такими являются коэффициенты использования k_u , включения k_B и загрузки k_z ЭПС [4,5].

При использовании нового подхода к управлению режимами электропотребления ЭПС, который основан на применении неполнофазных режимов пи-

тания нагревателей, можно выделить три характерных режимных зоны работы электропечей: трехфазный режим прогрева печи, двухфазный режим при отключении одной из фаз и однофазный режим при использовании электропечи в температурных режимах намного ниже номинальных. Характер изменения мощности во времени технологического цикла нагрева показан на рис. 1. На графиках показаны все возможные зоны изменения мощности, заявленные заводами-изготовителями:

1. *Первая зона трехфазного питания нагревателей.* В этом режиме происходит прогрев рабочего пространства печи, а также основной процесс термообработки при максимальной загрузке печи и максимальной рабочей температуре. Используемая при этом мощность изменяется в диапазоне $0,67 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 1,4$. По данным заводов-изготовителей, время прогрева современных ЭПС при полной загрузке заготовками не превышает 0,5 часа [2,3];

2. *Вторая зона двухфазного питания нагревателей.* При этом отключены нагреватели в одной из фаз, а оставшаяся мощность перераспределена по двум рабочим фазам. Такой режим наблюдается при потребляемой печью мощности ниже $P_{ЭПС}=0,67$. Используемая при этом мощность изменяется в диапазоне $0,33 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 0,67$. Характер дальнейшего изменения мощности во времени зависит от требуемой температуры нагрева. Если требуемая мощность не снижается ниже $P_{ЭПС}=0,33$, то печь остается в двухфазном режиме до конца цикла термообработки. В противном случае время работы печи в двухфазном режиме весьма мало и зависит от скорости изменения параметров ПИД-регуляторов мощности нагревателей;

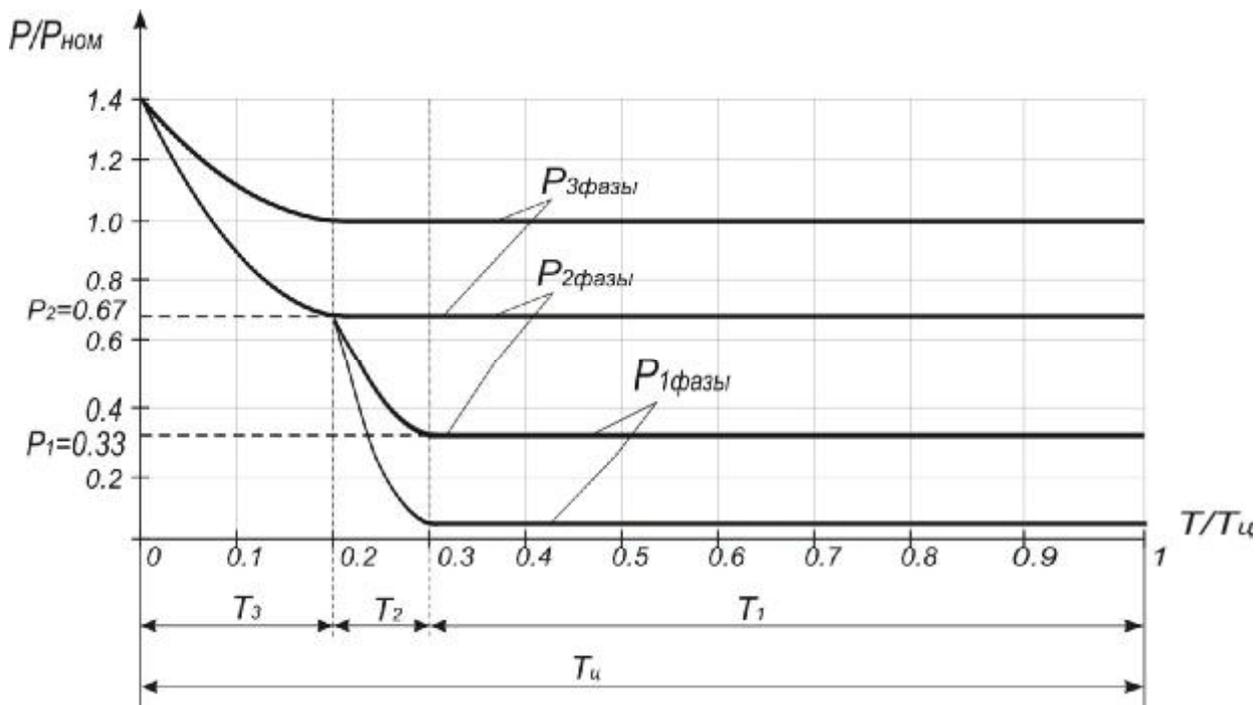


Рис. 1. Изменение мощности ЭПС во времени цикла термообработки при использовании специальных режимов

3. *Третья зона однофазного питания нагревателей.* Данный электрический режим может иметь место при использовании ЭПС для сушки изделий или запечки изоляции электрических машин, когда не требуются высокие температуры. В этом случае используются нагреватели только в одной фазе, а мощность изменяется в диапазоне $0,05 \leq \frac{P}{P_{ном}} \leq 0,33$.

Основным показателем потребления электроэнергии является средняя мощность. Для ее определения в электроснабжении используют ряд коэффициентов. Как было отмечено раньше, изменение мощности ЭПС во времени носит довольно сложный характер и пользоваться справочными значениями коэффициентов использования недопустимо из-за значительной погрешности. Для устранения этого разработаем алгоритм определения коэффициентов использования с учетом специальных режимов работы ЭПС. Будем полагать, что в трех характерных зонах мощность изменяется по-разному, поэтому определение k_u будем производить для всех зон отдельно.

Необходимо отметить, что применение указанных коэффициентов для расчета электрических нагрузок и оценки потребления электроэнергии допустимо лишь в случае приведения полученных значений к длительности рабочей смены предприятия.

Для определения зонных коэффициентов использования введем некоторые ограничения, позволяющие сделать расчеты более универсальными

1. Изменение времени цикла термообработки наиболее точно может характеризоваться коэффициентом включения k_B , который определяется в характерных зонах следующим образом:

а) при приведении мощности к длительности цикла:

— *трехфазный режим (первая зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_u}{T_u} = 1; \quad (1)$$

— *двухфазный режим (вторая зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_3}{T_u}; \quad k_{B2} = \frac{(T_u - T_3)}{T_u}, \quad (2)$$

где T_u — длительность цикла термообработки;

T_3 — длительность работы печи в трехфазном режиме;

— *однофазный режим (третья зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_3}{T_u}; \quad k_{B2} = \frac{T_2}{T_u}; \quad k_{B1} = \frac{(T_u - T_3 - T_2)}{T_u}, \quad (3)$$

где T_2 — длительность работы печи в двухфазном режиме; T_1 — длительность работы печи в однофазном режиме;

б) при приведении мощности к длительности смены:

— *трехфазный режим (первая зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_{ц}}{T_{смены}}, \quad (4)$$

где $T_{смены}$ — длительность рабочей смены;

— *двухфазный режим (вторая зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_3}{T_{смены}}; \quad k_{B2} = \frac{(T_{ц} - T_3)}{T_{смены}}; \quad (5)$$

— *однофазный режим (третья зона)*

$$k_{B3} = \frac{T_3}{T_{смены}}; \quad k_{B2} = \frac{T_2}{T_{смены}}; \quad k_{B1} = \frac{(T_{ц} - T_3 - T_2)}{T_{смены}}. \quad (6)$$

2. Длительность цикла термообработки изделий в электропечах сопротивления зависит от технологии, но, как правило, не превышает длительности рабочей смены, поэтому для анализа примем следующее время циклов: $T_{ц}=1, 2, 4, 6, 8$ часов. Длительность смены $T_{смены}=8$ часов, что соответствует действительности на большинстве машиностроительных предприятий;

3. Для определения коэффициентов использования воспользуемся положением, что коэффициент k_u равен произведению коэффициентов включения k_B и загрузки k_3 . Коэффициенты загрузки определены в каждой характерной зоне и имеют указанные выше интервалы. Примем для расчетов следующие их значения:

- *трехфазный режим (первая зона)* $k_3=1,4; 1,0; 0,67;$
- *двухфазный режим (вторая зона)* $k_3=0,67; 0,5; 0,33;$
- *однофазный режим (третья зона)* $k_3=0,33; 0,2; 0,05.$

С учетом указанных допущений был произведен расчет коэффициентов использования на всех возможных циклах работы ЭПС. Результаты представлены в табл. 1 – 3. Также представлены графические зависимости активной мощности электропечи во времени для трех режимов ее работы (рис. 2 – 4). Зависимости построены при приведении времени нагрева электропечи к длительности одного цикла термообработки. Такой подход позволяет выделить временные интервалы работы печи в неполнофазных режимах на общем времени цикла термообработки ЭПС. Поэтому результаты данных исследований можно использовать только для печей с периодической (циклической) загрузкой.

Таким образом были получены значения коэффициентов использования для различных режимных комбинаций работы печи. Для практического применения полученных значений при оценке несимметричных режимов необходимо

Таблица 1

Коэффициенты использования ЭПС (режим 1)

• Трехфазный режим								
$T_{\text{пч}}$	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			k_3			k_3		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	1,0	0,13	1,40	1,0	0,67	0,18	0,13	0,08
2	1,0	0,25	-	1,0	0,67	-	0,25	0,17
4	1,0	0,50	-	1,0	0,67	-	0,50	0,34
6	1,0	0,75	-	1,0	0,67	-	0,75	0,50
8	1,0	1,00	-	1,0	0,67	-	1,00	0,67
• Двухфазный режим — отсутствует								
• Однофазный режим — отсутствует								

Таблица 2

Коэффициенты использования ЭПС (режим 2)

• Трехфазный режим								
$T_{\text{пч}}$	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			k_3			k_3		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	0,50	0,06	0,70	0,50	0,34	0,09	0,06	0,04
2	0,25	0,06	-	0,25	0,17	-	0,06	0,04
4	0,13	0,06	-	0,13	0,08	-	0,06	0,04
6	0,08	0,06	-	0,08	0,06	-	0,06	0,04
8	0,06	0,06	-	0,06	0,04	-	0,06	0,04
• Двухфазный режим								
$T_{\text{пч}}$	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			k_3			k_3		
			0,67	0,5	0,33	0,67	0,5	0,33
1	0,50	0,06	0,34	0,25	0,17	0,04	0,03	0,02
2	0,75	0,19	0,50	0,38	0,25	0,13	0,09	0,06
4	0,88	0,44	0,59	0,44	0,29	0,29	0,22	0,14
6	0,92	0,69	0,61	0,46	0,30	0,46	0,34	0,23
8	0,94	0,94	0,63	0,47	0,31	0,63	0,47	0,31
• Однофазный режим — отсутствует								

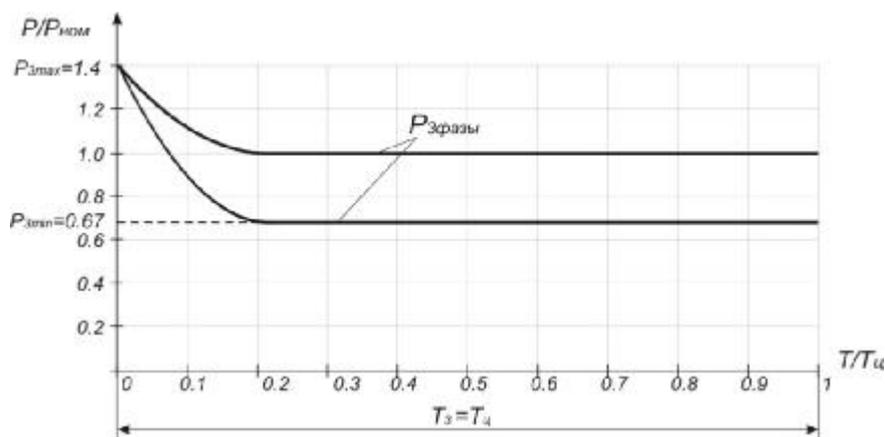


Рис. 2. Характер изменения активной мощности печи в первом режиме ее работы

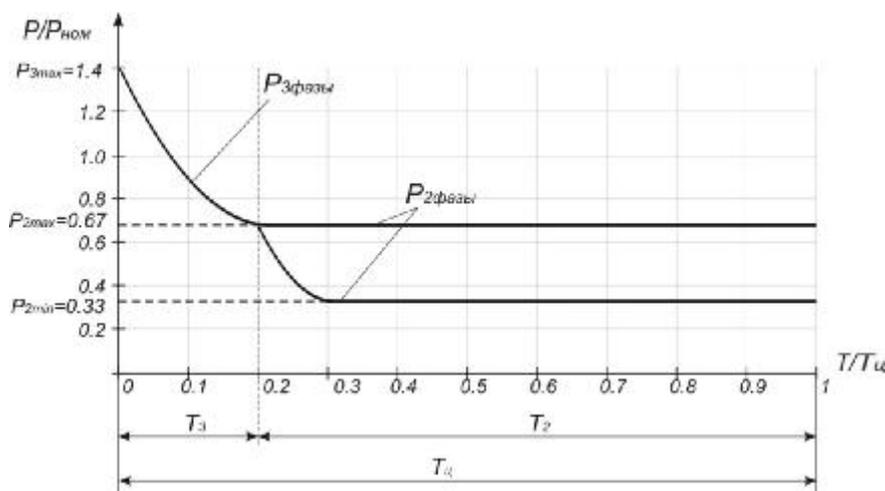


Рис. 3. Характер изменения активной мощности печи во втором режиме ее работы

Таблица 3

Коэффициенты использования ЭПС (режим 3)

• Трехфазный режим								
$T_{\text{ц}}$ ч	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			k_3			k_3		
			1,4	1	0,67	1,4	1	0,67
1	0,50	0,06	0,70	0,50	0,34	0,09	0,06	0,04
2	0,25	0,06	-	0,25	0,17	-	0,06	0,04
4	0,13	0,06	-	0,13	0,08	-	0,06	0,04
6	0,08	0,06	-	0,08	0,06	-	0,06	0,04
8	0,06	0,06	-	0,06	0,04	-	0,06	0,04
• Двухфазный режим								
$T_{\text{ц}}$ ч	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			k_3			k_3		
			0,67	0,5	0,33	0,67	0,5	0,33
1	0,10	0,01	0,07	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00
2	0,05	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
4	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
6	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00

• Однофазный режим								
$T_{\text{п}} / \text{ч}$	$k_{\text{В цикла}}$	$k_{\text{В смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$			$k_{\text{и смены}}$		
			$k_{\text{з}}$			$k_{\text{з}}$		
			0,33	0,2	0,05	0,33	0,2	0,05
1	0,40	0,05	0,13	0,08	0,02	0,02	0,01	0,00
2	0,70	0,18	0,23	0,14	0,04	0,06	0,04	0,01
4	0,85	0,43	0,28	0,17	0,04	0,14	0,09	0,02
6	0,90	0,68	0,30	0,18	0,05	0,22	0,14	0,03
8	0,93	0,93	0,31	0,19	0,05	0,31	0,19	0,05

рассчитать средние значения коэффициентов использования в характерных зонах и общие средние коэффициенты использования. Значения указанных коэффициентов приведены в табл. 4.

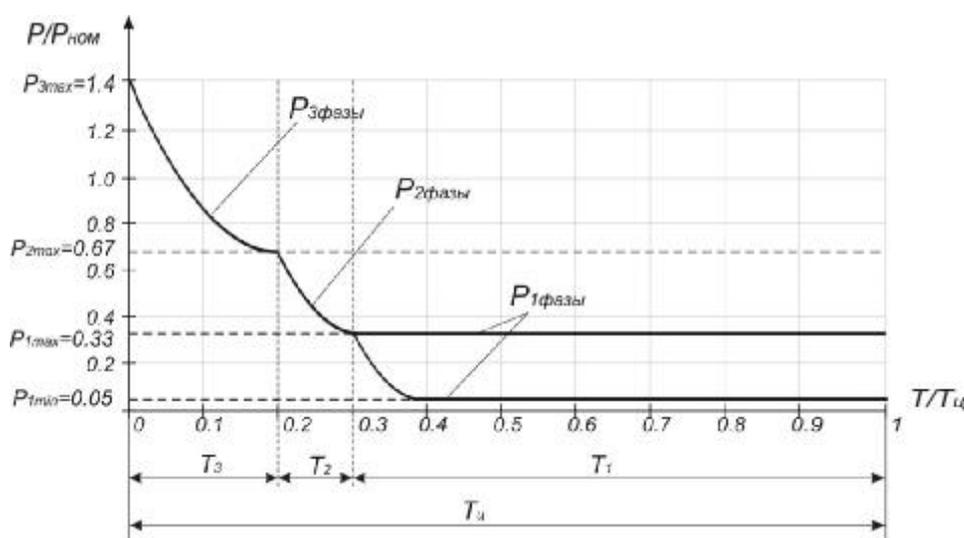


Рис. 4. Характер изменения активной мощности печи в третьем режиме ее работы

Таблица 4

Средние значения коэффициентов $k_{\text{и}}$

$T_{\text{п}} / \text{ч}$	Режим 1				Однофазный
	Трехфазный		Двухфазный		
	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$			
1	1,02	0,13			
2	0,84	0,21			
4	0,84	0,42	—		—
6	0,84	0,63			
8	0,84	0,84			
$T_{\text{п}} / \text{ч}$	Режим 2				Однофазный
	Трехфазный		Двухфазный		
	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$	
1	0,51	0,06	0,25	0,03	
2	0,21	0,05	0,38	0,09	
4	0,10	0,05	0,44	0,22	—
6	0,07	0,05	0,46	0,34	
8	0,05	0,05	0,47	0,47	

$T_{\text{п}}$ ч	Режим 3					
	Трехфазный		Двухфазный		Однофазный	
	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$	$k_{\text{и цикла}}$	$k_{\text{и смены}}$
1	0,51	0,06	0,05	0,01	0,08	0,01
2	0,21	0,05	0,03	0,01	0,14	0,03
4	0,10	0,05	0,01	0,01	0,16	0,08
6	0,07	0,05	0,01	0,01	0,17	0,13
8	0,05	0,05	0,01	0,01	0,18	0,18

Полученные средние значения коэффициентов использования позволяют объективно оценить потребление электроэнергии ЭПС при управлении ее режимами питания в реальном времени.

Выводы

1. Предложено ввести понятие коэффициентов использования мощности при характерных неполнофазных режимах работы печи сопротивления. Определены аналитические зависимости для расчетов коэффициентов. Это позволяет решать задачу симметрирования цеховой нагрузки с учетом режимов работы печи сопротивления.

2. Значения коэффициентов использования в режимах, характерных для эксплуатации ЭПС, принимают различные значения при изменении времени рабочего цикла и загрузки печи. Причем, с увеличением времени рабочего цикла при применении специальных неполнофазных режимов работы печи средние значения коэффициентов возрастают.

3. В результате исследования показателей графика электрических нагрузок ЭПС с тиристорным регулированием были получены средние значения коэффициентов использования на интервале длительности цикла работы печи и интервале длительности рабочей смены предприятия. Эти значения позволяют более точно оценить среднюю мощность электроустановки (ЭПС), значения которой необходимы при разработке способа симметрирования напряжений в цеховой сети с помощью специальных неполнофазных режимов электропечей.

Список литературы

1. Папаика Ю.А., Лысенко А.Г. Обоснование применения специальных режимов нагрева электропечей сопротивления для повышения качества электроэнергии в распределительных сетях промышленных предприятий. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2008. – Вип. 80. – С. 12–17.
2. Шулаев В.М. Энергосберегающие электропечи сопротивления нового поколения для термической и химико-термической обработки сталей и сплавов // Сб. докл. IV междунар. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Х., 2003. – Ч.1. – С. 9–31.
3. Арендарчук А.В. Общепромышленные электропечи периодического действия. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 187 с.
4. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техника, 1989. – 287 с.
5. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.