

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУППОВЫХ УСТАНОВОК С ТИРИСТОРНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Введение. Электротехнологические установки, в частности электрические печи сопротивления (ЭПС), широко распространены в черной и цветной металлургии, в машиностроении, приборостроении и др. отраслях народного хозяйства. ЭПС делят на общепромышленные и прецизионные, последние должны поддерживать с высокой точностью заданный температурный режим или его изменение по определенной программе.

Для плавного и непрерывного регулирования температуры в высокотемпературных и прецизионных печах часто используются тиристорные регуляторы переменного напряжения (ТРПН) [1]. Это вызвано высоким КПД, малыми массогабаритными показателями по отношению к способам регулирования напряжения (тока) с дросселями насыщения, автотрансформаторами и трансформаторами для фазоступенчатого регулирования.

Импульсное регулирование при частоте коммутации, равной удвоенной частоте питающего напряжения, может быть осуществлено изменением момента замыкания (рисунок 1, а) или размыкания (рисунок 1, б) ключа, а также комбинацией первых двух способов (рисунок 1, в, г).

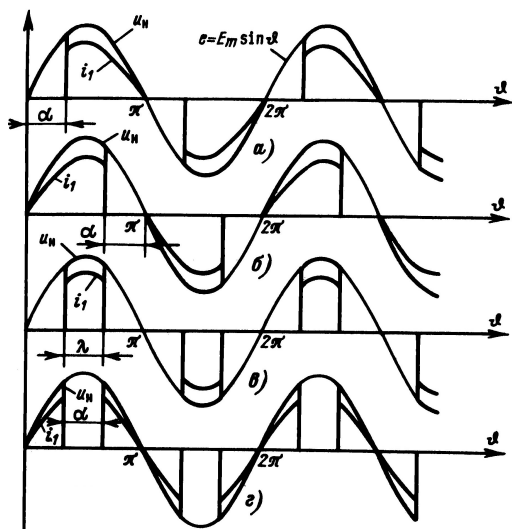


Рисунок 1 Диаграммы напряжений при различных способах фазового регулирования мощности

Целью исследования является сравнение энергетических показателей и гармонического спектра одиночных и групповых ТРПН при различных способах управления.

Результаты анализа. Известные исследования, относящиеся к энергетическим режимам преобразо-

вательных устройств (ПУ), в частности к системам с ТРПН, посвящены в основном одиночным установкам и используют аналитические зависимости, полученные интегральным [2] или спектральным [3] методами. В свою очередь получение энергетических зависимостей, характеризующих качественные характеристики преобразования параметров электрической энергии в сложных электроэнергетических структурах с групповыми ПУ является важным этапом в создании высокоэффективных энергосберегающих структур и технологий [4].

В качестве примера на рисунке 2 представлен наиболее простой вариант применения ТРПН с активной нагрузкой – трехфазные симметричные схемы с нулевым проводом. Ток каждой фазы представленных схем не зависит от тока других фаз и описывается теми же соотношениями, что и для однофазной схемы при различной нагрузке.

Специфика работы таких установок характеризуется тем, что даже при условиях симметрии конструкции и симметрии напряжения процесс электропотребления может быть отнесен к режиму работы установок с несимметричными несинусоидальными токами.

Исходя из общей концепции представления полной мощности S_Σ в трехфазной несимметрично нагруженной несинусоидальными токами электрической системе с ПУ, при условии первого аналитического приближения, имеем

$$S_\Sigma = \sqrt{S_{(1)\Sigma}^2 + P_{n\Sigma}^2 + P_{n\Sigma}^2 + (3n_0 + 1)P_{(1)0\Sigma}^2},$$

где $S_{(1)\Sigma} = \sqrt{P_{(1)a\Sigma}^2 + Q_{(1)\Sigma}^2}$ – полная мощность первой (основной) гармоники;

$P_{n\Sigma}, P_{(1)n\Sigma}$ – мощности искажения и несимметрии (пульсаций);

n_0 – коэффициент, характеризующий отношение сопротивлений нулевого провода и фазы;

$P_{(1)0\Sigma}$ – скрытая мощность.

Активную $P_{(1)a\Sigma}$ и реактивную $Q_{(1)\Sigma}$ составляющие полной мощности можно найти, например, используя их интегральные суммы

$$\left. \begin{aligned} P_{(1)a\Sigma} &= \sum_{i=1}^n P_{(1)ai} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T} \int_0^T U_i i_i dt; \\ Q_{(1)\Sigma} &= \sum_{i=1}^n Q_{(1)i} = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega T} \int_0^T i_i \frac{dU_i}{dt} dt, \end{aligned} \right\},$$

где $P_{(1)ai}, Q_{(1)i}$ – активная и реактивная мощности i-х ПУ, определяемые на интервале T с учетом функций напряжения U_i и тока i_i цепи нагрузки;

где $\kappa_{M\Sigma}$ - коэффициент мощности групповой структуры в системе показателей КЭ;

$\kappa_{c\Sigma}$, $\kappa_{u\Sigma}$, $\kappa_{h\Sigma}$, $\kappa_{0\Sigma}$ - коэффициенты сдвига, искажения, несимметрии и скрытой мощности;

$\nu_{p\Sigma}$ - общий показатель системы показателей КЭ относительно активной мощности групповой структуры;

$\nu_{c\Sigma}$, $\nu_{u\Sigma}$, $\nu_{h\Sigma}$, $\nu_{0\Sigma}$ - локальные показатели системы некачества электроэнергии, определяемые отношениями неактивных составляющих $Q_{(1)\Sigma}$, $P_{u\Sigma}$, $P_{(1)h\Sigma}$, $P_{(1)0\Sigma}$ к активной мощности $P_{(1)a\Sigma}$ групповой структуры;

$\nu_{Q\Sigma}$, $\nu_{pu\Sigma}$, $\nu_{p h\Sigma}$, $\nu_{p0\Sigma}$ - локальные показатели системы некачества электроэнергии, определяемые отношениями неактивных составляющих $Q_{(1)\Sigma}$

, $P_{u\Sigma}$, $P_{(1)h\Sigma}$, $P_{(1)0\Sigma}$ к полной мощности S_{Σ} групповой структуры.

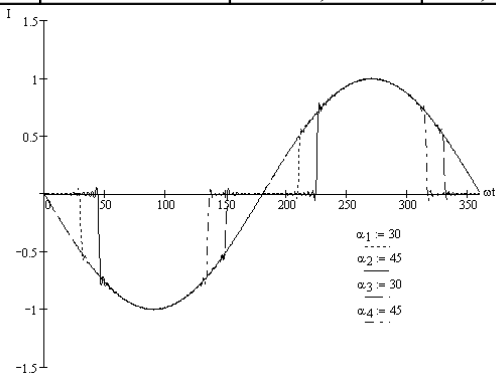
Соотношения для показателей КЭ и НКЭ для одной фазы групповых структур с трехфазными i -ми ТРПН сведены в таблицу 2.

На первом этапе оценим величину коэффициента мощности и уровень высших гармоник тока для одиночного ТРПН и при работе ТРПН в группе. При работе в группе, расчеты проводим при фазовом регулировании с отстающим и опережающим коэффициентами сдвига. Для упрощения принимаем, что нагрузка и угол регулирования пары ПУ одинаков. Полученные результаты приведены в таблице 3.

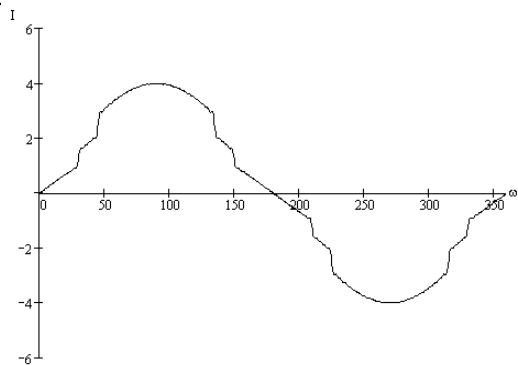
На рисунке 3 приведены графики токов для двух пар ТРПН с управлением по переднему и заднему фронту и углами управления $\alpha_1 = \alpha_3 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = \alpha_4 = 45^\circ$ (а) и график суммарного тока данных ТРПН (б).

Таблица 3

Гармонический спектр и коэффициент мощности для одиночных и групповых ТРПН								
№ п/п	ПУ	Угол управления α , эл. град.	κ_M	Амплитуды высших гармоник тока, о.е.				
				$I_{(3)}$	$I_{(5)}$	$I_{(7)}$	$I_{(9)}$	$I_{(11)}$
1.	Один ТРПН с управлением по переднему фронту	10	0,999	$9,598 \cdot 10^{-3}$	$9,469 \cdot 10^{-3}$	$9,277 \cdot 10^{-3}$	$9,026 \cdot 10^{-3}$	$8,721 \cdot 10^{-3}$
		30	0,985	0,08	0,07	0,058	0,044	0,032
		45	0,953	0,159	0,119	0,075	0,045	0,038
		75	0,814	0,297	0,123	0,088	0,075	0,051
		90	0,707	0,318	0,106	0,106	0,064	0,064
2.	Два ТРПН с управлением по переднему и заднему фронтам	10	1,0	$4,643 \cdot 10^{-3}$	$7,364 \cdot 10^{-3}$	$9,56 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,012
		30	0,993	0,097	0,097	0,049	0,001	0,028
		45	0,978	0,225	0,075	0,075	0,045	0,045
		75	0,943	0,21	0,172	0,124	0,071	0,023
		90	1,0	0	0	0	0	0
3.	Две пары ТРПН с управлением по переднему и заднему фронтам	10; 30	0,992	0,098	0,098	0,05	0,015	0,041
		30; 45	0,969	0,245	0,123	0,089	0,046	0,06
		30; 60	0,941	0,308	0,138	0,069	0,088	0,055
		30; 90	0,846	0,097	0,097	0,049	0,01	0,039
		30; 30	0,993	0,138	0,138	0,069	0,014	0,055
		45; 45	0,978	0,318	0,106	0,106	0,064	0,064
		60; 60	0,943	0,413	0,138	0,069	0,124	0,055
		75; 75	1,0	0,297	0,244	0,175	0,101	0,032



(а)



(б)

Рисунок 3 Графики токов для двух пар ТРПН с управлением по переднему и заднему фронту (а) и график суммарного тока для четырех ТРПН (б)

3. Процесс формирования гармоник в групповой системе сопровождается снижением всего спектра

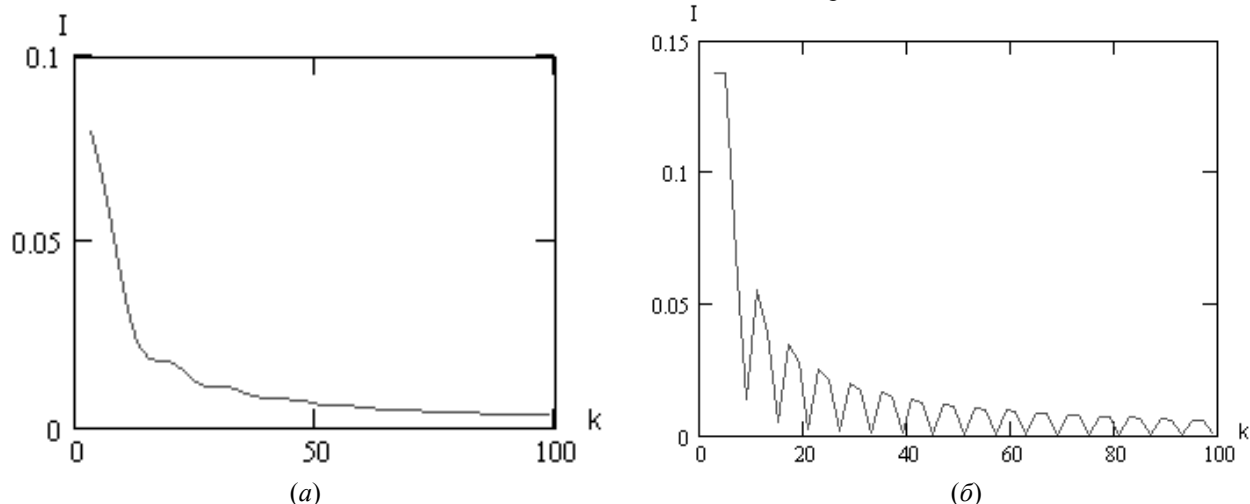


Рисунок 4 Графики амплитуд высших гармоник тока для одиночного ТРПН (а) и двух пар ТРПН с управлением по переднему и заднему фронту (б) при $\alpha = 30$ эл. градусов

На рисунке 4 показаны полученные графики амплитуд высших гармоник тока для одиночного ТРПН (а) и двух пар ТРПН с управлением по переднему и заднему фронту (б) при $\alpha = 30$ эл. градусов.

Выводы 1. Анализ и расчет показателей электропотребления групповых систем с ТРПН целесообразно проводить структурно-аналитическим методом, что позволяет исключить сложные графо-аналитические операции как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации оборудования. При этом точность расчетов устанавливается выбором исходных аналитических выражений для токов индивидуальных установок.

2. Полученные результаты позволяют выявить наиболее рациональные законы управления как одиночными, так и за счет комбинации различных методов управления в групповой системе.

гармоник, например, для третьей гармоники на 100-300% при угле управления равном 45 эл. градусов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колкер М.И., Полищук Я.А., Обухов С.Г., Яров В.М. Электронные сопротивления с широтно-импульсным управлением с применением тиристор. М.: Энергия, 1977. – 104с.
2. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320с.
3. Каганов И.Л. Электронные и ионные преобразователи. М.: Госэнергоиздат, 1956. Ч.3. – 456с.
4. Синолицы А.Ф. Энергетические зависимости групповых преобразовательных устройств // Техн. электродинамика. – 1998. - №1. С.30-34.