Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XX, вып. 1, 1976 г.

ПРИВОД ПОВОРОТА ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ ПО СХЕМЕ ТНПЧ-СД

И.М.СТОЛЯРОВ, З.Б.СЛЕПЦОВА

В ряде случаев при механизации ремонтных и вспомогательных работ, связанных с шаровыми мельницами, используются непосредственные преобразователи частоты с небольшим диапазоном регулирования выходной частоты, работающие в кратковременном режиме, не требующем оптимальной формы кривой выходного напряжения U_2 преобразователя и высокой точности поддержания угла открытия тиристоров. С другой стороны, к таким устройствам, как правило, предъявляются повышенные требования в отношении помехоустойчивости и надежности, поскольку их устанавливают в производственных помещениях с высоким уровнем промышленных помех.

В системах управления таких преобразователей нецелесообразно применять в качестве распределителей импульсов кольцевые пересчетные схемы, выполненные на триггерах, феррит-транзисторных или феррит-диодных ячейках на однопереходных транзисторах и т.п., так как это приводит к излишнему усложнению управляющих цепей и снижению надежности устройства в целом.

На кафедре электрических машин и автоматизированного привода ЛПИ разработан тиристорный преобразователь частоты с непосредственной связью и электромеханическим распределителем импульсов для реализации режимов медленного поворота синхронного двигателя шаровой мельницы со скоростью, составляющей несколько процентов от номинальной [3].

Силовая схема преобразователя (рис.I,а) состоит из шести тиристорных групп, каждая из которых включает в себя три тиристора и питается от трехфазной сети пониженного напряжения ($E_п$ = 380 В) с частотой f_1 = = 50 Гц. Частота U_2 преобразователя изменяется от 0 до 5 Гц, угол регулирования выходного напряжения α = 0.

Ток между группами коммутируется в преобразователе за счет естественного инвертирования через последний включенный вентиль группы, на которую прекращается подача импульсов. Для уменьшения длительности коммутационного процесса в случае работы синхронного двигателя в режиме отстающего тока в фазы обмотки статора включаются последовательно добавочные сопротивления $R_{д1} - R_{д3}$, соизмеримые по величине с активным сопротивлением статора.

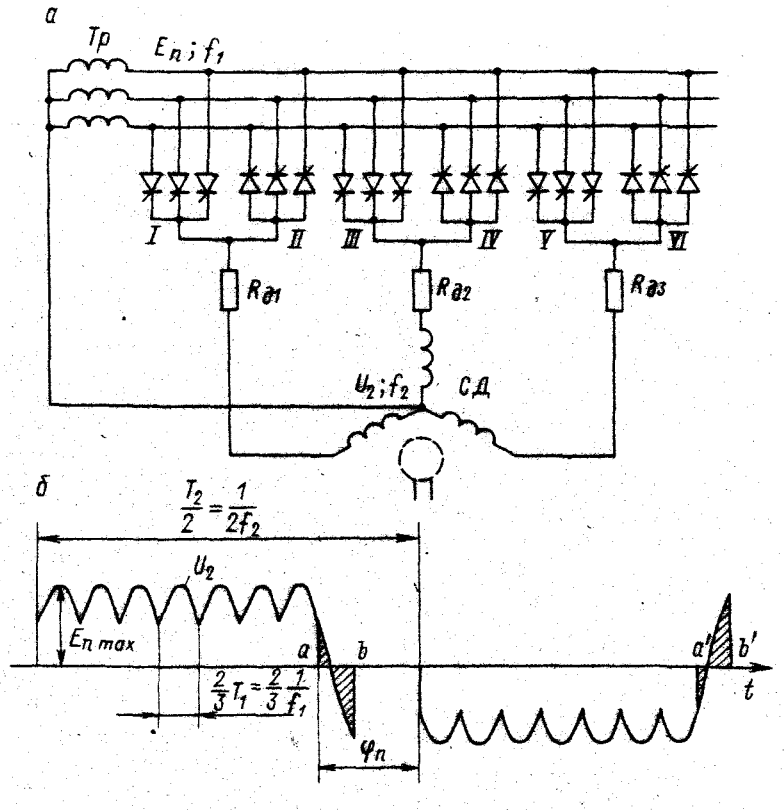


Рис.1. Преобразователь частоты с непосредственной связью: а – принципиальная схема; б – форма кривой напряжения при работе на активно-индуктивную нагрузку

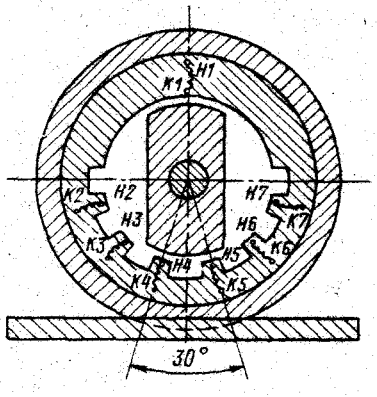


Рис.2. Индукционный распределитель импульсов

Последовательность включения тиристорных групп и интервал между их включениями задаются с помощью индукционного распределителя импульсов (ИРИ), схематический поперечный разрез которого представлен на рис.2.

Распределитель импульсов представляет собой индукционное устройство с магнитной системой электромашинного типа, состоящее из статора с одной первичной (Н1–К1) и шестью вторичными (Н2–К2÷Н7–К7) обмотками и вращающегося ярма, жестко закрепленного на валу. Первичная обмотка ИРИ занимает одну полуокружность расточки статора, а по другой распределены шесть сосредоточенных вторичных обмоток (по числу управляющих каналов), при этом угол между осями вторичных обмоток составляет 30^0.

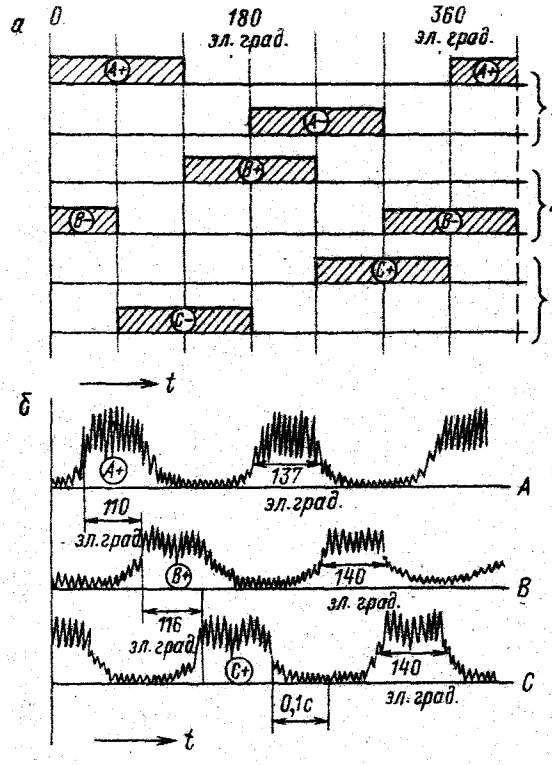


Рис.3. Временные диаграммы распределения управляющих импульсов: а – теоретическая; б – экспериментальная

Ярмо ИРИ приводится во вращение с помощью серводвигателя с регулируемой скоростью через редуктор. Питание ИРИ получает от автогенератора с выходной частотой 1000 Гц или выше. При вращении ярма ИРИ изменяется магнитная проводимость промежутка между первичной и каждой из вторичных его обмоток, в результате чего на шести вторичных обмотках получается шесть одинаковых последовательностей пачек высокочастотных (1000 Гц) импульсов, сдвинутых между собой во времени на угол $\pi/3$ эл.радиан.

Скважность импульсов управления и, как следствие, выходного напряжения преобразователя, т.е. угол перерыва $\varphi_п$ (см. рис.1,б), определяется шириной ярма ИРИ, которое предполагается сменным: 60; 45 и 30°. Временные диаграммы распределения управляющих импульсов по фазам при ширине ярма 60° представлены на рис.3. На осциллограмме приведены импульсы, участвующие в формировании положительной полуволны трех фаз U_2 (импульсы на вибраторы подавались через диоды).

На каждую выпрямительную группу, состоящую из трех тиристоров, импульсы поступают через 4-обмоточный импульсный трансформатор, первичная обмотка которого подключается к соответствующей вторичной обмотке индукционного распределителя. На выходе тиристорного преобразователя формируется напряжение прямоугольной формы, частота его зависит от скорости вращения ярма ИРИ. Форма U_2 преобразователя при работе на активно-индуктивную нагрузку представлена на рис.1,б.

Одной из важнейших характеристик преобразователя является спектральный состав U_2, который для ТНПЧ исследовался в зависимости от угла

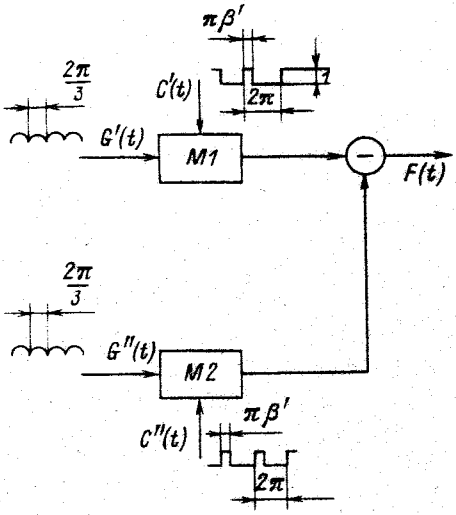


Рис.4. Структурная схема задающей и вентильной частей НПЧ

перерыва $\varphi_п$ и соотношения частот питающей и выходной сети преобразователя. Для анализа процесса формирования выходного напряжения ТНПЧ задающую и вентильную части преобразователя можно представить в виде структурной схемы (рис.4). При этом полагаем, что угол коммутации $\gamma = 0$. Кроме того, из-за относительно низких выходных частот (до 5 Гц) рассматриваемого ТНПЧ можно пренебречь функционированием последнего работающего тиристора в выключаемой вентильной группе (участки ab и $a'b'$ на рис.I,б).

Амплитудные модуляторы MI и M2 управляются соответственно сигналами $G'(t)$ и $G''(t)$. На вход MI и M2 подаются последовательности $C'(t)$ и $C''(t)$, причем

$$G''(t) = G'(t-\tau_1) ; \quad C''(t) = C'(t-\tau_2) ,$$

где

$$\tau_1 = \frac{T_1}{2} ; \quad \tau_2 = \frac{T_2}{2} .$$

Модуляторы MI и M2 преобразуют импульсные (модулируемые) последовательности $C'(t)$ и $C''(t)$ по закону пульсирующих (модулирующих) функций $G'(t)$ и $G''(t)$:

$$G'(t) = \sum_{k=0,1,2\ldots}^{\infty} G_k \sin(k\Omega t + \varphi_k) ,$$

$$G''(t) = \sum_{k=0,1,2\ldots}^{\infty} G_k \sin(k\Omega t + \varphi'_k) ,$$

$$C'(t) = \sum_{i=0,1,2\ldots}^{\infty} C_i \sin(i\omega_м t + \varphi_i) ,$$

$$C''(t) = \sum_{i=0,1,2\ldots}^{\infty} C_i \sin(i\omega_м t + \varphi'_i) ,$$

где Ω – частота повторения пульсаций; $\omega_м$ – частота модулируемой функции; k, i и G_k, C_i – порядковые номера и амплитуды гармоник; φ_k, φ'_k и φ_i, φ'_i – фазы k-й и i-й гармоник;

$$\varphi'_k = \varphi_k - \pi k ; \quad \varphi'_i = \varphi_i - \pi i ;$$

$$C_i = \frac{2\left|\sin\frac{i\beta'\pi}{2}\right|}{\pi i};\quad G_k = \frac{2E_{dm}}{(km)^2-1};\quad (C_i)_{i=0} = \frac{\beta'}{2};\quad (G_k)_{k=0} = E_{dm};$$

$$E_{dm} = \frac{E_{\pi max}}{\frac{\pi}{m}}\sin\frac{\pi}{m};\quad \varphi_i = arctg\left(-ctg\frac{\pi i\beta'}{2}\right);\quad \varphi_k = -\frac{\pi}{2};\quad \beta' = \frac{\pi-\varphi_\pi}{\pi}.$$

Воспользуемся преобразованием Эйлера и теоремами Фурье для получения спектрального состава выходной функции [4]

$$F(t) = C'(t)G'(t) - C''(t)G''(t).$$

Поскольку $C'(t)$; $C''(t)$; $G'(t)$; $G''(t)$ – периодические функции, то, используя понятие δ-функции [I], можно записать:

I) спектр функции $C'(t)$

$$S_1(\omega) = \sum_{i=0,1,2...}^{\infty} C_i\,\delta(\omega - i\omega_M)e^{j\varphi_i};$$

2) функция $C''(t)$ запаздывает на $\tau_2 = \frac{T_2}{2}$ от функции $C'(t)$, значит спектр $C''(t)$

$$S_2(\omega) = S_1(\omega)\,e^{-ji\pi};$$

3) спектр функции $G'(t)$

$$S_3(\omega) = \sum_{k=0,1,2...}^{\infty} G_k\,\delta(\omega - k\Omega)e^{j\varphi_k};$$

4) функция $G''(t)$ отстает от $G'(t)$ на $\tau_1 = \frac{T_1}{2}$, следовательно, спектр $G''(t)$

$$S_4(\omega) = S_3(\omega)\,e^{-jk\pi};$$

5) спектр $S'(\omega)$ произведения функций $C'(t)\,G'(t)$

$$S'(\omega) = S_1(\omega)\,S_3(\omega) = \sum_{i=0,1,2...}^{\infty}\sum_{k=0,1,2...}^{\infty}\frac{1}{2}C_i G_k e^{j\varphi_i}e^{j\varphi_k} \times$$

$$\times\left[\delta(\omega - i\omega_M + k\Omega) + \delta(\omega - i\omega_M - k\Omega)\right];$$

6) спектр $S''(\omega)$ произведения функций $C''(t)\cdot G''(t)$

$$S''(\omega) = S_2(\omega)\,S_4(\omega) = \sum_{i=0,1,2...}^{\infty}\sum_{k=0,1,2...}^{\infty}\frac{1}{2}C_i G_k e^{j\varphi_i}e^{j\varphi_k}e^{-ji\pi}e^{-jk\pi} \times$$

$$\times\left[\delta(\omega - i\omega_M + k\Omega) + \delta(\omega - i\omega_M - k\Omega)\right];$$

7) выражение спектра функции $F(t)$ принимает вид

$$S(\omega) = S'(\omega) - S''(\omega) = \sum_{i=0,1,2...}^{\infty} \sum_{k=0,1,2...}^{\infty} \frac{1}{2} C_i G_k e^{j(\varphi_i + \varphi_k)} \left[\delta(\omega - i\omega_м + k\Omega) + \right.$$

$$\left. + \delta(\omega - i\omega_м - k\Omega)\right]\left[1 - e^{-j\pi(i+k)}\right]. \qquad (I)$$

В результате преобразования спектр выходного напряжения ТНПЧ может быть шире спектров исходных функций, модулируемых $C'(t)$; $C''(t)$ и модулирующих $G'(t)$; $G''(t)$.

Комбинационные частоты спектра

$$\omega_{комб} = \omega_м (i \pm k\varepsilon) , \qquad (2)$$

$$\varepsilon = \Omega / \omega_м .$$

Выражение (I) позволяет вычислить спектральный состав U_2 преобразователя в зависимости от ε и $\varphi_п$ [2]. Выбором $\varphi_п = \pi/3$ можно добиться минимальной величины гармонических составляющих выходного напряжения ТНПЧ, кратных трем.

При учете влияния U_2 преобразователя на характеристики синхронного двигателя амплитудами четных гармонических и постоянной составляющей можно пренебречь, так как из-за относительно низкой выходной частоты (до 5 Гц) $\varepsilon \gg I$. Для $f_2 = 3$ Гц ($\varepsilon = 50$) и $\varphi_п = \pi/3$ при $i = \varepsilon k = 50$ амплитуда постоянной составляющей $A_0 = 0,00018 U_{2max}$, а ближайшая четная гармоническая с достаточно большой амплитудой $i = 52$.

Спектр выходного напряжения ТНПЧ при $f_2 = 5$ Гц ($\varepsilon = 30$), $\varphi_п = \pi/3$ и $\alpha = 0$ вычислен по формуле (I) и определен графоаналитическим методом с использованием экспериментальных данных. Полученные амплитуды гармонических составляющих:

	1-й	5-й	7-й	11-й
Расчет ($\gamma = 0$)	0,931	0,184	0,132	0,085
Эксперимент ($\gamma = 10$ эл.градусов)	0,952	0,201	0,098	0,151

Видно, что для расчета характеристик синхронного двигателя при небольших углах коммутации можно использовать амплитудный спектр, вычисленный по формуле (I).

ЛИТЕРАТУРА

1. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. М., „Наука", 1971.

2. Павлов Ю.П., Слепцова З.Б. Исследование спектрального состава напряжения НПЧ для приводов шагового поворота шаровых мельниц. - РЖ. Сводный том „Электротехника и энергетика", 1975, № 9, реф. 9К 134-75.

3. Устройство для поворота барабана шаровой мельницы. - Авт. свидет. № 498959. Бюлл. изобр., 1976, № 2. Авт.: З.Б.Слепцова, И.М.Столяров, К.А.Ананьев, А.В.Смирнов.

4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М., Гостехиздат, 1952.