



УДК 621.314:646.2

© 2007

Член-корреспондент НАН України **А. Е. Божко**

Структурно-аналитическая интерпретация сигналов в системах фазового управления вентильных преобразователей

The structural image of the passage of signals in phase control systems by means of valve transformers is proposed. The mathematical description of processes in these systems is realized on the basis of a special expansion of step functions.

Управляемые вентильные преобразователи переменного тока в постоянный широко применяются в промышленности в качестве источников постоянного напряжения и тока. Наиболее часто используемыми являются управляемые выпрямители, собранные по схеме Ларионова [1], изображенной на рис. 1 *а, б*, где ИТ — источник трехфазного тока; z_H — полное сопротивление нагрузки; СФ — сглаживающий фильтр; Т1–Т6 — тиристоры; Тр1–Тр6 — транзисторы; СФУ — система фазового управления. Схемы Ларионова изображены на рис. 1 в виде цепей, состоящих из Т1–Т6 (рис. 1, *а*) и Тр1–Тр6 (рис. 1, *б*).

Эти схемы относятся к шестифазным схемам выпрямления. В СФУ система генератора сигналов управления (ГСУ) имеет шесть выходов, с каждого из которых подается сигнал управления на один из T_k или Tr_k . Причем одновременно должны быть открытыми хотя бы два T_k или Tr_k , но в разных фазах.

Ниже рассмотрим и опишем математически в новой интерпретации работу СФУ. Известно [1], что СФУ в основном построены на основе “вертикального принципа” формирования сигналов управления T_k , Tr_k , $k = \overline{1,6}$. Эти СФУ состоят из двух функциональных устройств: устройства фазосмещения (УФ) и генератора сигнала управления ГСУ управляемым выпрямителем (УВ). При работе УВ в СФУ возможны самые различные помехи, которые могут влиять на точность функционирования СФУ и, следовательно, искажать работу УВ вплоть до появления аварийных режимов. Поэтому математическое описание прохождения полезных сигналов в СФУ без или совместно с помехами весьма необходимо. Однако принятая функциональная структура $УФ \rightarrow ГСУ \rightarrow УВ$ не дает возможности четкого математического описания системы автоматического регулирования вентильным преобразователем с учетом обобщенного описания работы СФУ. В [2] была предпринята попытка описания функционирования СФУ с представлением ее структуры в релейном виде.

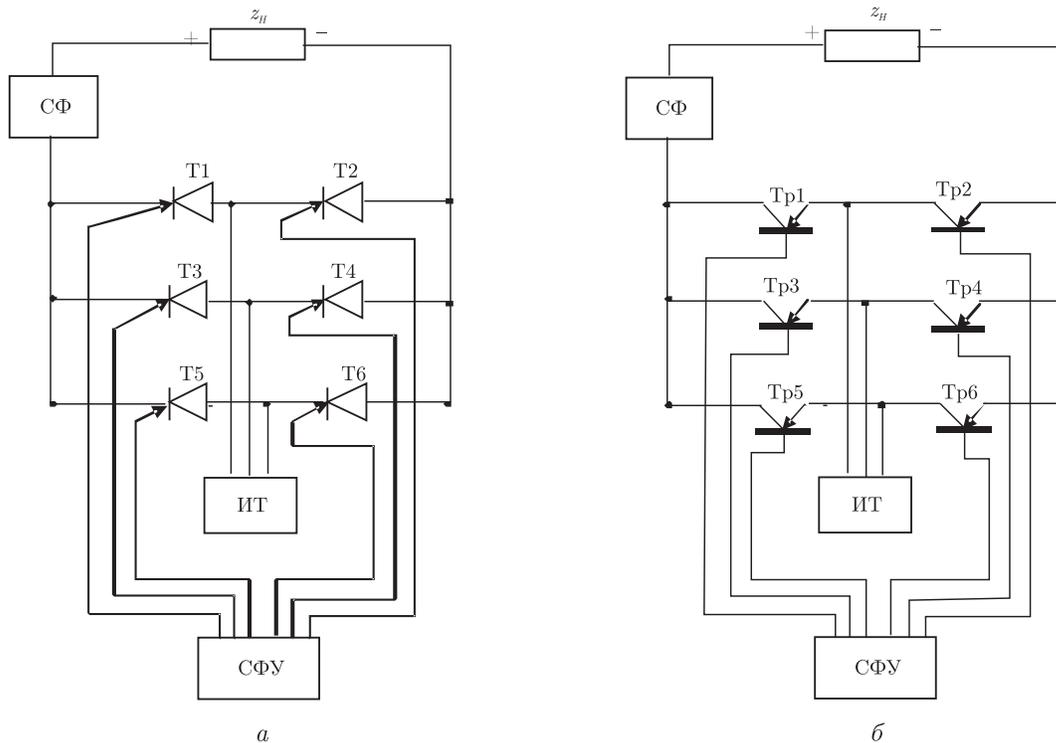


Рис. 1

На наш взгляд, такое релейное представление более точно отражает процесс прохождения сигнала от устройства задания до управляющих электродов силовых выпрямителей в УВ. Причем этот подход функционально тождествен работе СФУ. Данная работа базируется на положениях работы [2]. Однако развитием ее является применение особого разложения скачкообразных функций, предложенного в работе [3] для описания сигнала управления УВ. В нашем случае, как и в работе [2], СФУ рассматривается как релейная система с регулируемым порогом срабатывания.

На рис. 2, *a* изображена структурная схема одного из каналов СФУ. Заметим, что число каналов определяется количеством “плечей” УВ. На рис. 2 $y(t)$ — выходной сигнал РЭ, являющийся сигналом управления двух T_k или Tr_k , $k = \overline{1, 6}$, УВ; $x_1(t)$ — внешнее периодическое воздействие, синхронизирующее работу РЭ с анодным (для соответствующего T_k) или коллекторным (для соответствующего Tr_k) напряжением УВ; $x_2(t)$ — внешнее постоянное по полярности, регулируемое по величине воздействие (напряжение), представляющее собой эквивалент порога срабатывания РЭ; $x_3(t)$ — сигнал задания угла срабатывания УВ, который в данной схеме определяет момент срабатывания РЭ; W — передаточная функция линейной части управления СФУ. Линейная часть СФУ в схемном решении (в структуре также) представляет собой совокупность суммирующих усилителей, фильтров, согласующих каскадов и др.

Сигнал управления $y(t)$ вентилем УВ должен иметь большую крутизну переднего фронта. Поэтому можно предположить, что РЭ является безынерционным и его выходной сигнал может быть описан скачкообразной нелинейной функцией $\Phi[x(t)] = A1(x - x_0)$ или в функции времени $y(t) = A1(t - \tau)$, где τ — момент времени, когда $x_1 - x_2 = x_0$ равно порогу срабатывания РЭ; A — амплитуда $y(t)$. Здесь $1(x - x_0)$, $1(t - \tau)$ — единичные функции.

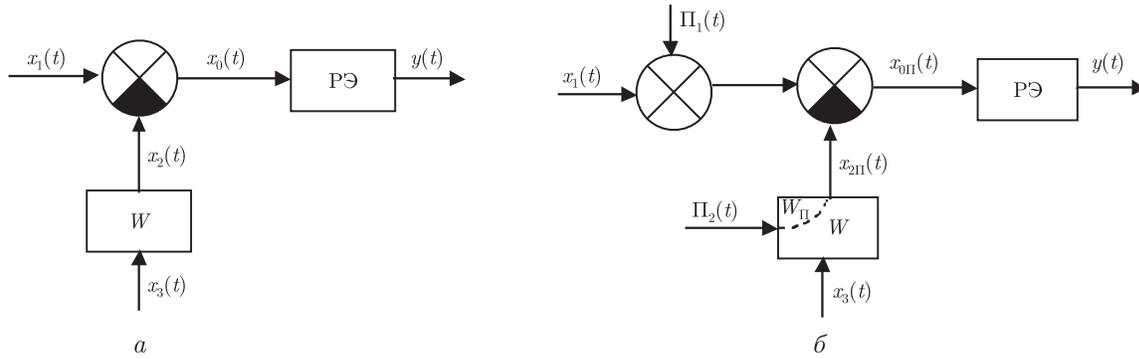


Рис. 2

Безынерционная характеристика РЭ в виде $\Phi[x(t)]$ представляет собой несимметричную характеристику с зоной нечувствительности, равной $x_0(t)$. Величина $x_0(t)$ определяется выражением

$$x_0(t) = x_1(t) - x_2(t) = x_1(t) - L^{-1}[x_3(p)W(p)], \quad (1)$$

где $x_3(p)$ — изображение $x_3(t)$; L^{-1} — оригинал функции в квадратных скобках; $p = d/dt$ — оператор. Используя (1) и $\Phi[x(t)]$, запишем уравнение РЭ в следующем общем виде:

$$y(t) = \Phi\{x_1(t) - L^{-1}[x_3(p)W(p)]\}. \quad (2)$$

Заметим, что при таком (2) описании $y(t)$ можно учитывать дополнительные внешние воздействия, приложенные ко входу РЭ, изменяющие момент его срабатывания, например, помехи. Сигналы помехи могут быть приращением к $x_1(t)$ и проходить через линейную часть СФУ.

На рис. 2, б изображена структурная схема одноканального тракта СФУ при одновременном воздействии помех $\Pi_1(t)$, $\Pi_2(t)$ в канале $x_1(t)$ и в линейной части СФУ. Здесь W_{Π} — передаточная функция помехи $\Pi_2(t)$ в линейной части СФУ; $x_{0\Pi}(t)$ — измененный из-за действия помех сигнал срабатывания РЭ; $x_{2\Pi}(t)$ — выходной сигнал линейной части СФУ при наличии $\Pi_2(t)$. С учетом помех $\Pi_1(t)$ и $\Pi_2(t)$ выходной сигнал РЭ

$$y(t) = \Phi\{x_1(t) + \Pi_1(t) - L^{-1}[W(p)x_3(p) + W_n(p)\Pi_2(t)]\}. \quad (3)$$

Подобно выражениям (2), (3) описываются выходные сигналы всех РЭ в СФУ. Отличием в каждом сигнале $y(t - \tau_k)$, $k = \overline{1, 6}$, является момент его появления τ_k . Ограничение продолжительности $y(t - \tau_k)$ в каждом канале определяется сигналами x_{1k} , $k = \overline{1, 6}$, синхронизирующего устройства СФУ. Такое функционирование структурно изображено на рис. 3 для шестиканальной СФУ.

На вход каждого РЭ $_k$, $k = \overline{1, 6}$, поступает периодический сигнал x_{0k} , являющийся функцией разности $x_{1k} - x_2$. В этой СФУ сразу на выходе появляется два сигнала y_k , необходимых для включения вентиля УВ в левом и правом плечах разных фаз схемы Ларионова (см. рис. 1).

На рис. 3 обозначения x_{11} и x_{12} , x_{13} и x_{14} , x_{15} и x_{16} попарно относятся к фазам А, В, С соответственно; x_{11} , x_{13} , x_{15} подаются на каналы СФУ левого плеча УВ, а x_{12} , x_{14} , x_{16} — на каналы СФУ правого плеча УВ. Например, при одновременном включении Т1, Т4

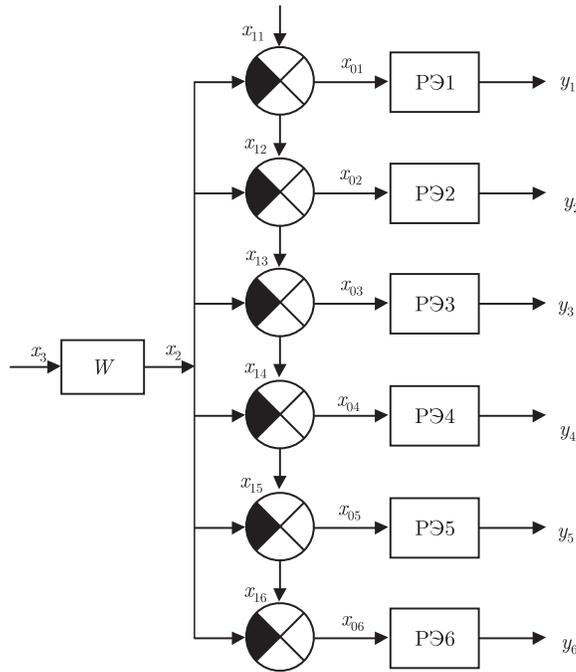


Рис. 3

или Тр1, Тр4 (см. рис. 1) срабатывают РЭ1 и РЭ4 в СФУ. В этом случае на Т1 и Т4 или Тр1 и Тр4 подается сигнал У1. Сигнал У2 одновременно подается на Т2 и Т5 или Тр2 и Тр5. В шестиканальной СФУ вследствие поочередного включения двух вентилей в УВ необходимо учитывать сдвиг начальных моментов сигналов синхронизации $x_{11} \div x_{16}$ и затем $y_1 \div y_6$. Эти сигналы сдвинуты относительно друг друга на интервал времени $t_0 = T/m = 1/f_m = 2\pi/(\omega m)$, где T, f, ω — период, частота, круговая частота соответственно; m — число плечей в УВ (в схеме Ларионова $m = 6$); $\pi = 3,14$. Если принять для x_{11} начальный момент $t_{01} = 0$, то $x_{11}(t), x_{12}(t - t_0), x_{13}(t - 2t_0), x_{14}(t - 3t_0), x_{15}(t - 4t_0), x_{16}(t - 5t_0)$, т. е. $x_{1k}[t - (k - 1)t_0], k = \overline{1,6}, y_k, k = \overline{1,6}$, также сдвинуты относительно друг друга на t_0 . В этом случае при x_2 установившемся общем уравнение шестиканальной СФУ представляет собой следующую систему нелинейных уравнений:

$$y_k(t) = \Phi\{x_{1k}[t - (k - 1)t_0] - y_{k+1}(t - kt_0) - L^{-1}[W(p)x_3(p)]\}, \quad k = \overline{1,6}. \quad (4)$$

Система уравнений (4) является входным сигналом УВ, что позволяет при импульсном представлении выходного сигнала каждого вентиля УВ математически увязать функционирование СФУ в замкнутой системе автоматического регулирования с УВ. Представление СФУ с помощью РЭ, как отмечено в работе [2], дало возможность исследовать СФУ с позиций гармонического анализа. В нашем случае скачкообразные функции $y_k(t)$ по форме представляют собой прямоугольные импульсы вида, изображенного на рис. 4, где t_{1k}, t_{2k} — начало и конец импульса соответственно.

Вначале рассмотрим один канал шестифазной СФУ (рис. 4). Пусть задан угол открывания УВ, т. е. сигнал $x_2(t) = \text{const} = C$. В этом случае входной сигнал РЭ $x_0 = x_1(t) - C$ и является периодической функцией сигнала $x_1(t + 2\pi/\omega)$. Выходной сигнал РЭ $y(t)$ также является периодическим. Из-за наличия зоны нечувствительности РЭ, равной C , функция $y(t)$ в некоторых интервалах времени в течение периода $T = 2\pi/\omega$ равна нулю. Это

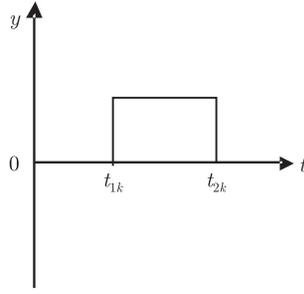


Рис. 4

накладывает на сигнал $x_1(t+T)$ необходимость пересечения зоны нечувствительности С минимум два раза в течение каждого периода. Моменты времени t_{1k}, t_{2k} , изображенные на рис. 4, являются моментами включения и выключения РЭ $_k$, $k = \overline{1,6}$, соответственно. Момент времени t_{1k} может регулироваться в зависимости от величины входного сигнала $x_2(t) = C$ в интервале $0 - \pi/\omega$. Момент времени t_{2k} следует относительно t_{1k} на $\pi/3\omega$, т. е. $t_{2k} = t_{1k} + \pi/(3\omega)$.

Итак, в нашем исследовании имеется прямоугольный импульс $y(t_{1k}, t_{2k})$ с амплитудой A , который может быть математически выражен с помощью двух единичных функций таким образом:

$$y(t_{1k}, t_{2k}) = A[1 - (t - t_{1k}) - 1(t - t_{2k})], \quad (5)$$

где

$$1(t - t_{1k}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{1k}, \\ 1 & \text{при } t \geq t_{1k}, \end{cases} \quad 1(t - t_{2k}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{2k}, \\ 1 & \text{при } t \geq t_{2k}. \end{cases}$$

В соответствии с представленным в работе [3] особым разложением скачкообразных функций в виде

$$A1(t) = A(1 - e^{-\alpha t}) + e^{-\alpha t} \sum_{l=1}^n A_l \cos \omega_l t, \quad \sum_{l=1}^n A_l = A, \quad (6)$$

где α — коэффициент затухания; A_l — амплитуда l -й гармоники $A_l = A_1/\pi\omega_l$; ω_l — круговая частота l -й гармоники, воспользуемся соотношением (6) и введем его в выражение (5). Тогда получим следующий вид выходного сигнала РЭ $_k$, $k = \overline{1,6}$:

$$y(t_{1k}, t_{2k}) = A[1 - e^{-\alpha(t-t_{1k})}] + e^{-\alpha(t-t_{1k})} \sum_{l=1}^n A_l \cos[\omega_l(t - t_{1k})] - \\ - A[1 - e^{-\alpha(t-t_{2k})}] - e^{-\alpha(t-t_{2k})} \sum_{l=1}^n A_l \cos[\omega_l(t - t_{2k})]. \quad (7)$$

Проверим правильность выражения (7), учитывая, что

$$1(t - t_{1k}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{1k}, \\ 1 & \text{при } t \geq t_{1k}, \end{cases} \quad 1(t - t_{2k}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{2k}, \\ 1 & \text{при } t \geq t_{2k}. \end{cases}$$

При $t = t \geq t_{1k}$ и $t < t_{2k}$ $y(t_{1k}, t_{2k}) = A$. При $t \geq t_{2k}$ $y(t_{1k}, t_{2k}) = 0$. При $\alpha = \infty$ в промежутке $(t_{1k} \div t_{2k})$ $y(t_{1k}, t_{2k}) = A$, а вне этого промежутка $y(t_{1k}, t_{2k}) = 0$.

Таким образом, выражение (7) верное.

Так как $t_{2k} = t_{1k} + \pi/(3\omega)$, то для всей СФУ выходной сигнал релейных элементов может быть описан системой уравнений вида

$$y_k \left(t_{1k}, t_{1k} + \frac{\pi}{3\omega} \right) = A \left[e^{-\alpha(t-t_{1k}-\pi/(3\omega))} - e^{-\alpha(t-t_{1k})} \right] + e^{-\alpha(t-t_{1k})} \sum_{l=1}^n A_l \cos \omega_l (t-t_{1k}) - e^{-\alpha(t-t_{1k}-\pi/(3\omega))} \sum_{l=1}^n A_l \cos \omega_l \left(t - t_{1k} - \frac{\pi}{3\omega} \right), \quad k = \overline{1, 6}. \quad (8)$$

Как видно из (8), сигнал управления каждого вентиля УВ состоит из экспоненциальных и гармонических составляющих. Причем последние являются затухающими. Влияние помех $\Pi_1(t)$ и $\Pi_2(t)$ сказывается на изменении моментов t_{1k} , $k = \overline{1, 6}$, а не на длительности выходных импульсов РЭ_k. Заметим, что если в УВ встроены транзисторы Tr_k , $k = \overline{1, 6}$, то выпрямленное напряжение до СФ имеет больше пульсаций, чем в УВ с тиристорами. Это явление связано с тем, что транзистор по физике работы открывается и закрывается при изменении полярности базового тока, что отсутствует в тиристоре при изменении сигнала на управляющем электроде. После включения тиристор на сигнал управляющего электрода не реагирует. Кроме того, наличие в выходном сигнале РЭ_k, $k = \overline{1, 6}$, экспоненциальных составляющих в УВ с транзисторами создает в последних режим работы в активной области (усилительный), уменьшая тем самым выходное выпрямленное напряжение, вызывая потери электроэнергии и опасность выхода из строя этих транзисторов.

Следует иметь в виду, что схема Ларионова УВ может быть упрощена за счет включения тиристоров или транзисторов только в одно плечо, например левое, каждой фазы. В других плечах включаются неуправляемые диоды. В этом случае СФУ упрощается, включаются только по одному каналу управляемые выпрямители. Синхронизирующая система в этом случае трехфазная. Но суть рассмотрения СФУ с позиций данной работы не изменяется. Изменяется только зона углового регулирования момента включения тиристора (транзистора). Здесь $t_{2k} = t_{1k} + 2\pi/(3\omega)$.

Таким образом, в работе представлено структурно-аналитическое описание процесса формирования управляющих сигналов вентиля УВ. Сам процесс исследования СФУ ранее был предложен нами [2] с использованием ряда Фурье. Позднее, с получением экспериментальным путем на анализаторах спектра новых данных мною сформировано и названо особым разложение скачкообразных функций [3], которое использовано в данной работе.

1. Шипило В. П., Булатов О. Г. Расчет полупроводниковых систем управления вентилями преобразователями. – Москва: Энергия, 1966. – 154 с.
2. Михайлов В. А., Божко А. Е. К анализу систем фазового управления вентилями преобразователями // Изв. вузов. – 1969. – № 1. – С. 98–103.
3. Божко А. Е. Новая интерпретация переходных процессов в электроцепях // Доп. НАН Украины. – 2004. – № 9. – С. 83–87.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 20.03.2006