

УДК 621.316.718.5

## ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

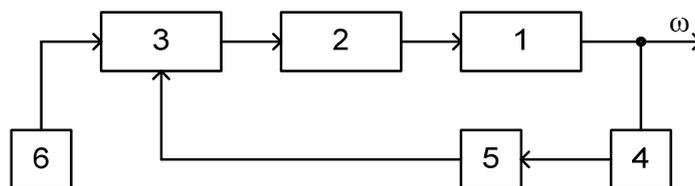
канд. техн. наук, доц. А.С. ВЕРШИНИН  
(Полоцкий государственный университет)

В [1] описан импульсный электропривод постоянного тока, в котором рабочие импульсы обратной связи формируются с помощью механического модулятора с двумя первичными формирователями импульсов, расположенными диаметрально относительно механического модулятора с целью исключения влияния его эксцентриситета на формирование рабочих импульсов обратной связи. Для этого используется специальная цифровая схема обработки импульсов от этих первичных формирователей в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи, на частоту следования которых эксцентриситет механического модулятора практически не влияет [1]. В работе приведены возможные варианты построения цифровой схемы для обработки импульсов от указанных первичных формирователей импульсов в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи для импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока. Также предложен упрощенный метод и цифровая схема обработки импульсов от первичных формирователей импульсов в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи.

**Ключевые слова:** электродвигатель, механический модулятор, формирователь импульсов, эксцентриситет, логические элементы, триггеры, скорость вращения, точность стабилизации.

**Введение.** При решении ряда задач необходимо выдерживать скорость вращения вала электропривода с высокой точностью, например, в приборах для угловых измерений, в которых используется равномерно вращающаяся мера (механический модулятор). С этой целью часто используют системы автоматического регулирования (стабилизации) скорости вращения вала электродвигателя обычно постоянного тока, поскольку управление скоростью вращения таких двигателей проще.

Во многих случаях применяют импульсные астатические системы автоматической стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока [1–3], общая типовая структура которых приведена на рисунке 1.



1 – электродвигатель постоянного тока с механическим модулятором 4 на валу; 2 – ключевой усилитель; 3 – регулятор; 5 – оптронный формирователь импульсов; 6 – задающий генератор

Рисунок 1. – Общая структура импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Конечно, точность стабилизации скорости вращения вала вместе с механическим модулятором в такой системе определяется прежде всего метрологическими характеристиками регулятора 3, стабильностью частоты задающего генератора импульсов 6, а также точностью формирования импульсов обратной связи, частота которых соответствует фактической скорости вращения вала электродвигателя [1].

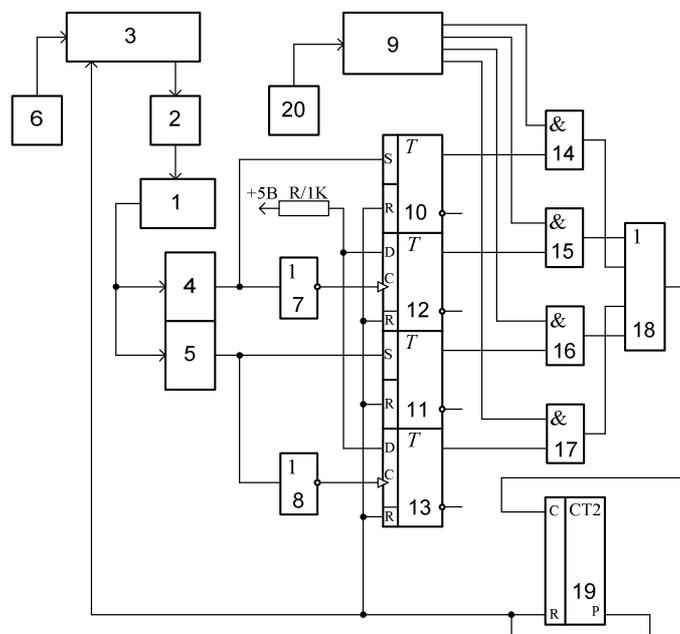
К настоящему времени схемотехника построения систем автоматического регулирования (стабилизации) скорости вращения вала электродвигателей постоянного тока проработана достаточно глубоко, и посредством регулятора 3 повысить точность стабилизации указанной скорости вращения весьма сложно. Однако имеется возможность повысить точность измерения фактической скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока в виде частоты рабочих импульсов обратной связи в системе.

Для этого следует исключить влияние эксцентриситета механического модулятора на формирование рабочих импульсов обратной связи в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока. Наличие эксцентриситета механического модулятора, насаженного на вал электродвигателя (а он есть всегда) я, приводит к неравномерности следования импульсов обратной связи, формируемых по меткам механического модулятора и расположенных по его окружности. В результате точность стабилизации скорости вращения снижается.

В [1] описан импульсный электропривод постоянного тока, в котором рабочие импульсы обратной связи формируются с помощью механического модулятора с метками и двумя первичными формирователями импульсов, расположенными диаметрально относительно механического модулятора с целью исключения влияния его эксцентриситета на формирование рабочих импульсов обратной связи. Там же описан и аналитически доказан способ исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на формируемые выходные импульсы обратной связи, приведена и описана цифровая схема, выполняющая обработку во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирующая рабочие импульсы обратной связи для системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока.

**Цель работы.** Цель данной работы – показать возможные варианты построения более простых цифровых схем для обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирования выходных рабочих импульсов обратной связи, а также разработать упрощенный метод и цифровую схему обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирования выходных рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации.

**Обзор возможных вариантов построения цифровых схем для формирования выходных рабочих импульсов обратной связи.** Приведенная в [1] цифровая схема формирования выходных рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока не является единственной. На рисунке 2 показана функциональная схема импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока с цифровой схемой формирования рабочих импульсов обратной связи по сигналам от двух первичных формирователей импульсов, диаметрально расположенных относительно механического модулятора [1].



**Рисунок 2. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока**

Эта функциональная схема приведена с целью проведения сравнительного анализа с другими схемами аналогичного назначения в части формирования импульсов обратной связи по меткам механического модулятора. Принцип действия схемы описан в [1].

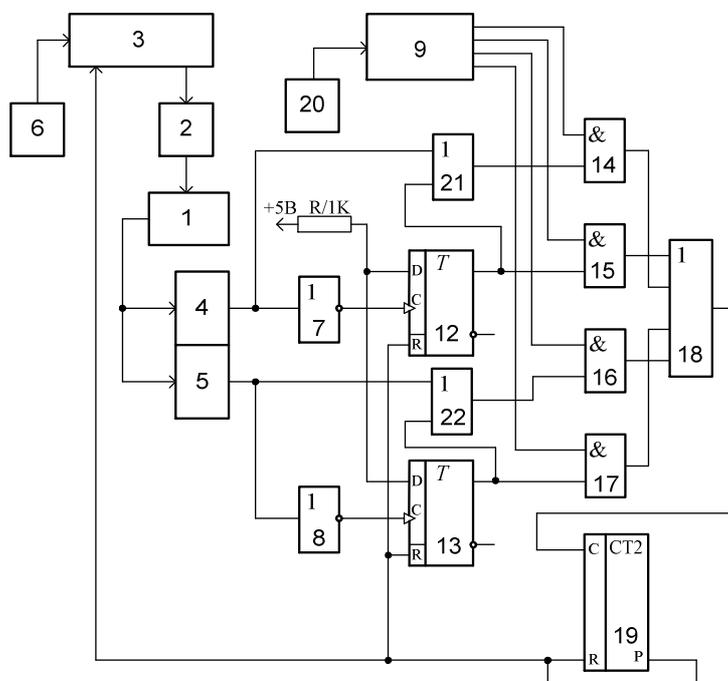
В состав указанной системы стабилизации входят электродвигатель постоянного тока 1 с механическим модулятором, ключевой усилитель 2, регулятор 3, диаметрально расположенные оптронные формирователи импульсов (датчики) 4 и 5, задающий генератор импульсов 6 и цифровая схема формирования рабочих импульсов обратной связи [1].

Совокупность элементов НЕ 7 и 8, распределителя импульсов 9, RS-триггеров 10 и 11, D-триггеров 12 и 13, элементов И 14–17, элемента ИЛИ 18 и двоичного счетчика импульсов 19 вместе с генератором тактовых импульсов 20 образуют цифровую схему, которая формирует рабочие импульсы, снимаемые с выхода переполнения счетчика импульсов и используемые в качестве импульсов отрицательной обратной связи регулятора 3 [1; 4–6].

Позиционные обозначения элементов и узлов, выполняющих одинаковые функции во всех рассматриваемых схемах, сохраним одинаковыми, а вновь вводимые элементы будут иметь другие по порядку позиционные обозначения.

Первое незначительное упрощение схемы формирования рабочих импульсов обратной связи можно получить заменой RS-триггеров 10 и 11 (см. рисунок 2) на элементы ИЛИ 21 и 22 с соответствующими связями (рисунок 3).

Из анализа исходной схемы (см. рисунок 2) следует, что по переднему фронту импульса с выхода первичного формирователя 4 RS-триггер 10 устанавливается в единичное состояние и сохраняет его до появления формируемого выходного импульса обратной связи. И все это время RS-триггер 10 сигналом с прямого выхода разрешает прохождение импульсов от распределителя импульсов 9 через элемент И 14.



**Рисунок 3. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока**

В схеме (см. рисунок 3) выходной импульс первичного формирователя 4 через элемент ИЛИ 21 разрешает прохождение импульсов через элемент И 14. Это продолжается в течении длительности указанного импульса. В момент окончания действия импульса с выхода формирователя 4 через инвертор 7 D-триггер 12 переключается в единичное состояние и сигналом с прямого выхода D-триггера 12 через элемент ИЛИ 21 разрешает прохождение импульсов через элемент И 14.

Аналогично может быть исключен RS-триггер 11 и вместо него установлен элемент ИЛИ 22, входы которого соединены с выходом первичного формирователя импульсов 5, с прямым выходом D-триггера 13. Таким образом, при указанной замене работоспособность схемы полностью сохраняется.

При внимательном рассмотрении функциональных схем, приведенных на рисунках 2 и 3, можно увидеть что совокупность элементов И 14, 15, 16, 17 с элементом ИЛИ 18 близка к внутренней структуре мультиплексора на четыре входа, поэтому указанную группу элементов можно заменить одним мультиплексором, а функции распределителя импульсов 9 ограничить формированием адресных сигналов для мультиплексора (рисунок 4).

Адресные сигналы для мультиплексора 24 в этой схеме формируются двухразрядным двоичным суммирующим счетчиком 23, а в качестве разрешающего (синхронизирующего) сигнала для работы мультиплексора являются импульсы с выхода генератора 20 тактовых импульсов.

По своим функциональным возможностям и метрологическим характеристикам все рассмотренные схемы эквивалентны.

Из сравнения рассмотренных схем в части формирования выходных рабочих импульсов обратной связи видно, что удастся лишь частичное и не очень существенное упрощение схемы. Это связано с тем, что у всех рассмотренных схем реализован один и тот же довольно сложный метод обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5, расположенных диаметрально относительно механического модулятора 1. Указанный метод описан в [1] и заключается в формировании выходных рабочих импульсов обратной связи с постоянной задержкой  $\tau_{зад}$  относительно временного положения середины между центрами исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5.

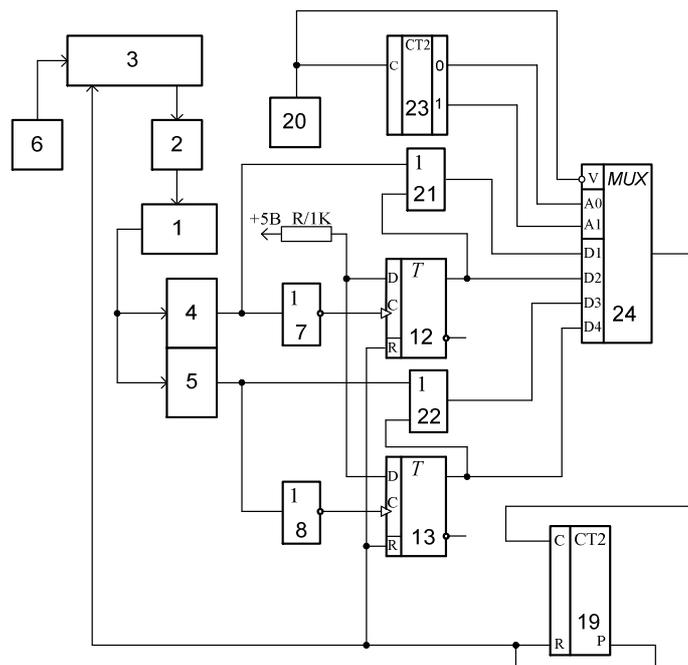


Рисунок 4. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Для более существенного упрощения схемы формирования рабочих импульсов обратной связи нужно упростить метод обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5. Это можно попытаться сделать если формировать рабочие импульсы обратной связи с постоянной задержкой  $\tau_{\text{зад}}$  относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5, расположенных диаметрально относительно механического модулятора.

**Обоснование метода достижения цели.** Также как в [1], для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на частоту следования импульсов обратной связи в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока следует формировать импульсы обратной связи по двум диаметрально расположенным меткам на механическом модуляторе (рисунок 5), с последующей обработкой во времени полученных сигналов и формированием выходных импульсов, привязанных к временному положению середины между передними фронтами исходных импульсов.

На рисунке 5 условно показан механический модулятор, который вращается с круговой скоростью  $\omega$  и в котором геометрический  $O$  и физический  $O_1$  центры вращения не совпадают. Длина отрезка  $OO_1 = \Delta$  и является величиной эксцентриситета модулятора, как следствие неточности изготовления.

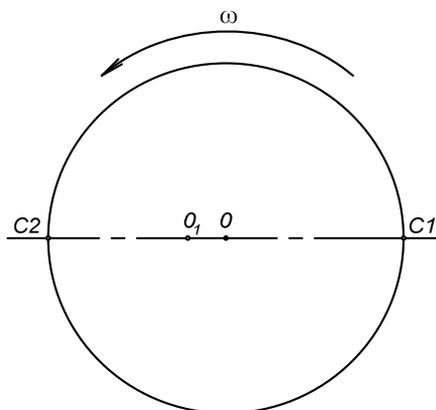


Рисунок 5. – Условное изображение механического модулятора с метками по внешней окружности (например, в виде щелевых прорезей) и диаметрально расположенными оптронными формирователями импульсов  $C_1$  и  $C_2$

Касательные скорости механического модулятора относительно первичных формирователей импульсов  $C1$  и  $C2$  изменяются по законам соответственно [1]:

$$V_{C1} = O_1 \cdot C1 \cdot \omega = [R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega; \tag{1}$$

$$V_{C2} = O_1 \cdot C2 \cdot \omega = [R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega, \tag{2}$$

где  $R$  – рабочий радиус механического модулятора относительно геометрического центра вращения  $O$ . Пусть на механический модулятор нанесены  $N$  меток (дискрет), тогда шаг дискретизации (шаг расположения меток) получим в виде

$$h = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{N}. \tag{3}$$

Частоты выходных импульсов первичных формирователей импульсов  $C1$  и  $C2$  с учетом (1), (2) и (3) получим соответственно в виде [1; 7]

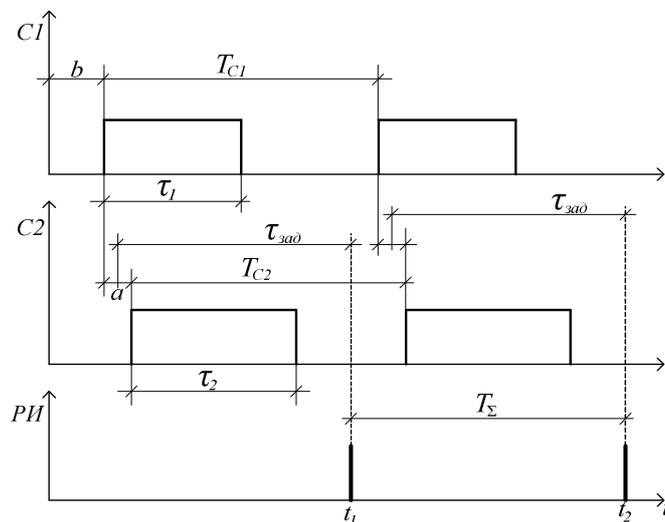
$$f_{C1} = \frac{V_{C1}}{h} = \frac{[R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} \cdot f_B \cdot N, \tag{4}$$

где  $f_B = \omega / 2 \cdot \pi$ ;

$$f_{C2} = \frac{R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} \cdot f_B \cdot N. \tag{5}$$

Из (4) и (5) следует, что частоты получаемых последовательностей импульсов от указанных формирователей импульсов модулированы, и причиной этой модуляции является наличие эксцентриситета механического модулятора.

Для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на формируемую частоту следования импульсов обратной связи предложено формировать ее как результат одновременной обработки импульсов, получаемых от двух диаметрально расположенных первичных формирователей импульсов как в [1], но в отличие от [1] формировать рабочий выходной импульс со смещением на строго постоянную задержку во времени относительно временного положения середины между началами исходных импульсов  $C1$  и  $C2$  (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Временная диаграмма, поясняющая принцип обработки исходных импульсов от диаметрально расположенных формирователей для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора**

На рисунке 6 приняты следующие обозначения:

- $C1$  и  $C2$  – импульсы, формируемые соответственно первым и вторым первичными формирователями импульсов, которые располагаются диаметрально относительно механического модулятора;
- $\tau_1$  и  $\tau_2$  – длительности импульсов первичных формирователей  $C1$  и  $C2$  соответственно;
- $a$  – интервал времени между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ ;

- $T_{C1}$  и  $T_{C2}$  – периоды следования импульсов  $C1$  и  $C2$  соответственно;
- $\tau_{\text{зад}}$  – время постоянной задержки выходных рабочих импульсов относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ ;
- $T_{\Sigma}$  – период следования выходных рабочих импульсов обратной связи;
- $b$  – время смещения переднего фронта опережающего импульса (в данном случае  $C1$ ) относительно начала системы координат.

Согласно рисунку 6 выразим моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , в которые формируются выходные рабочие импульсы обратной связи:

$$t_1 = b + \frac{a}{2} + \tau_{\text{зад}}; \quad (6)$$

$$t_2 = b + \frac{T_{C1} + a + T_{C2}}{2} + \tau_{\text{зад}}. \quad (7)$$

Теперь выразим период следования выходных рабочих импульсов обратной связи:

$$T_{\Sigma} = t_2 - t_1 = b + \frac{T_{C1}}{2} + \frac{a}{2} + \frac{T_{C2}}{2} + \tau_{\text{зад}} - b - \frac{a}{2} - \tau_{\text{зад}} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, для  $T_{\Sigma}$  получен точно такой же результат, как и в [1].

Далее частоту следования выходных рабочих импульсов обратной связи также получим в виде

$$f_p = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{2}{T_{C1} + T_{C2}} = \frac{2}{1/f_{C1} + 1/f_{C2}} = \frac{2 \cdot f_{C1} \cdot f_{C2}}{f_{C1} + f_{C2}}. \quad (9)$$

Обозначив  $f_B \cdot N = f_H$ , выражения (4) и (5) преобразуем к виду

$$f_{C1} = f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad (10)$$

$$f_{C2} = f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (11)$$

где  $\Delta f = \frac{\Delta}{R} \cdot f_B \cdot N = \frac{\Delta}{R} \cdot f_H$ .

Окончательно для частоты рабочих импульсов обратной связи получаем такой же результат как в [1]:

$$f_p = \frac{2 \cdot [f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot [f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)]}{f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t) + f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)} = \frac{f_H^2 - \Delta f^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{f_H} \approx f_H, \quad (12)$$

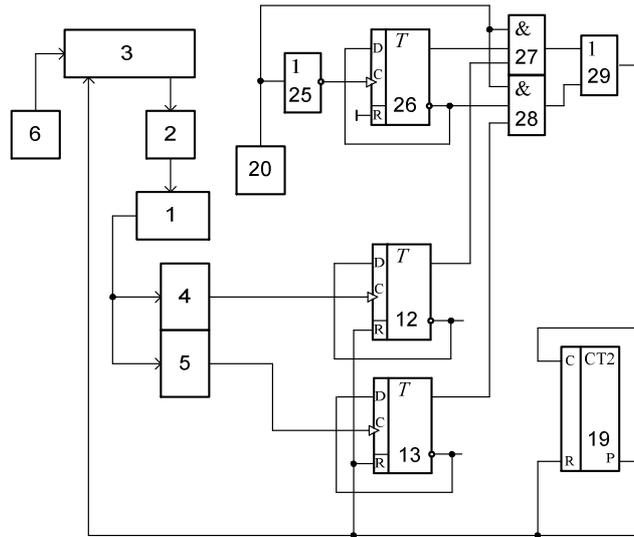
так как  $\Delta f^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) \ll f_H^2$ .

Таким образом, из выражения (12) следует, что влияние эксцентриситета механического модулятора на частоту следования выходных рабочих импульсов  $f_p$  обратной связи практически исключено. Однако при этом выходные рабочие импульсы обратной связи с частотой  $f_p$  формируются в моменты времени, сдвинутые относительно середины между передними фронтами исходных импульсов  $C1$  и  $C2$  на строго постоянное время задержки  $\tau_{\text{зад}}$  (см. рисунок 6). Следовательно, полученный результат совпадает с [1], но при более простом алгоритме обработки во времени исходных импульсов, а значит и при более простой реализации схемы.

**Реализация метода.** Для построения системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока с такой обработкой сигналов от двух диаметрально расположенных датчиков относительно механического модулятора в структуру системы необходимо ввести цифровое устройство, которое в реальном времени выполнит рассмотренный вид обработки исходных импульсов от датчиков  $C1$  и  $C2$ , и сформирует выходной рабочий импульс (рисунок 7).

В состав системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока входят электродвигатель постоянного тока 1 с механическим модулятором, ключевой усилитель 2, регулятор 3, диаметрально расположенные первичные формирователи импульсов (датчики) 4 и 5, задающий генератор импульсов 6 и цифровая схема формирования рабочих импульсов.

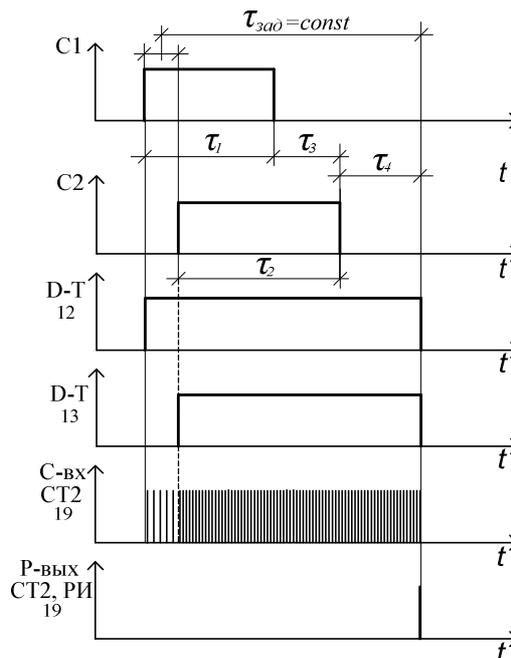
Совокупность D-триггеров 12, 13 и 26 с элементом НЕ 25, элементами И 27 и 28, элементом ИЛИ 29 и двоичного счетчика импульсов 19 вместе с генератором тактовых импульсов 20 образуют цифровую схему, которая формирует рабочие импульсы, снимаемые с выхода переполнения счетчика импульсов 19 и используемые в качестве импульсов отрицательной обратной связи регулятора 3.



**Рисунок 7. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока**

Система стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока работает следующим образом. Регулятор 3 сравнивает между собой последовательности импульсов, поступающих от задающего генератора импульсов 6 и с выхода переполнения счетчика импульсов 19, и выработывает управляющее воздействие через ключевой усилитель 2 на электродвигатель 1. При вращении механического модулятора первичные формирователи импульсов 4 и 5 формируют прямоугольные импульсы C1 и C2 в соответствии с рисунком 6. Частота следования импульсов C1 и C2 пропорциональна скорости вращения механического модулятора, и при наличии эксцентриситета механического модулятора указанная частота модулируется по синусоидальному закону около своего среднего значения согласно (10) и (11). Период модуляции частоты равен периоду одного оборота модулятора, а глубина модуляции частоты пропорциональна величине эксцентриситета. Полученные прямоугольные импульсы C1 и C2 поступают на входы цифровой схемы формирования рабочих импульсов (см. рисунок 7).

Временная диаграмма, поясняющая работу цифровой схемы формирования рабочих импульсов обратной связи, приведена на рисунке 8.



**Рисунок 8. – Временная диаграмма работы цифровой схемы формирования рабочих импульсов**

В соответствии с рисунком 8 выразим величину времени задержки формирования рабочего импульса относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ :

$$\tau_{\text{зад}} = \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4}{2} = 2^n \cdot \frac{1}{f} = \text{const}, \quad (13)$$

где  $\tau_{\text{зад}}$  – время постоянной задержки рабочего импульса обратной связи относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ ;

$\tau_1$  – длительность импульса  $C1$ , формируемого первичным формирователем импульсов 4;

$\tau_2$  – длительность импульса  $C2$ , формируемого первичным формирователем импульсов 5;

$\tau_3$  – время смещения между задними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ ;

$\tau_4$  – время смещения выходного рабочего импульса относительно заднего фронта запаздывающего импульса (в данном случае  $C2$ );

$n$  – число разрядов двоичного счетчика импульсов 19;

$f$  – частота следования тактовых импульсов генератора 20.

Преобразуем выражение (13) к виду

$$\begin{aligned} \tau_{\text{зад}} &= \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4 + \tau_2 - \tau_2}{2} = \\ &= \frac{\tau_1 - \tau_2 + \tau_3 + 2 \cdot \tau_2 + 2 \cdot \tau_4}{2} = \frac{\tau_1 - \tau_2 + \tau_3}{2} + \tau_2 + \tau_4, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $(\tau_1 - \tau_2 + \tau_3)$  – длительность интервала времени между передними фронтами исходных импульсов  $C1$  и  $C2$ .

Тогда в выражении (14) первое слагаемое соответствует длительности интервала времени от временного положения середины между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$  до переднего фронта импульса  $C2$ . Сумма второго и третьего слагаемых в выражении (14) соответствует длительности интервала времени от переднего фронта импульса  $C2$  до момента формирования выходного рабочего импульса обратной связи.

Умножив (14) на частоту  $f$ , с учетом (13) получим

$$2^n = \text{const} = (\tau_1 - \tau_2 + \tau_3) \cdot \frac{1}{2} \cdot f + (\tau_2 + \tau_4) \cdot f. \quad (15)$$

Из (15) следует, что интервал времени  $(\tau_2 + \tau_4)$  необходимо заполнять импульсами с частотой  $f$ , а интервал времени  $(\tau_1 - \tau_2 + \tau_3)$  – импульсами с частотой  $f/2$ .

В исходном состоянии (до появления импульсов  $C1$  и  $C2$ ) D-триггеры 12, 13 и счетчик импульсов 19 находятся в нулевом (сброшенном) состоянии. D-триггер 26 вместе с элементом НЕ 25 выполняют роль распределителя импульсов, поочередно разрешая прохождение импульсов через элементы И 27 и 28. Но поскольку D-триггеры 12 и 13 находятся в нулевых состояниях, то элементы И 27 и 28 заблокированы, следовательно, на С-вход счетчика импульсов 19 импульсы от генератора 20 не проходят.

При появлении импульса  $C1$  на выходе первичного формирователя импульсов 4 D-триггер 12 устанавливается в единичное состояние и разрешает прохождение импульсов от генератора 20 через элемент И 27 и далее через элемент ИЛИ 29 на С-вход счетчика импульсов 19. При этом на С-вход счетчика импульсов 19 поступают импульсы с частотой  $f/2$ . Состояние схемы соответствует интервалу времени  $(\tau_1 + \tau_3 - \tau_2)$  (см. рисунок 8).

При появлении импульса  $C2$  на выходе первичного формирователя импульсов 5 D-триггер 13 также устанавливается в единичное состояние и разрешает прохождение импульсов от генератора 20 через элемент И 28 и далее через элемент ИЛИ 29 на С-вход счетчика импульсов 19. При этом на С-вход счетчика импульсов 19 поступают импульсы с частотой  $f$ , так как импульсы от генератора 20 проходят поочередно через два элемента И 27 и 28. Состояние схемы соответствует интервалу времени  $(\tau_2 + \tau_4)$  (см. рисунок 8).

При переполнении счетчика импульсов 19, когда на его вход подано  $2^n$  импульсов, на выходе переполнения счетчика формируется рабочий импульс, который сбрасывает счетчик импульсов 19 и D-триггеры 12 и 13 в нулевое состояние. Сформированный рабочий импульс используется как импульс отрицательной обратной связи регулятора 3. Временное положение формируемого рабочего импульса строго постоянно относительно средней точки между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$ , а период следования и частота формируемых рабочих импульсов свободны от влияния эксцентриситета механического модулятора.

Структура регулятора 3 может быть практически любой для класса регуляторов, использующих в качестве сигнала обратной связи импульсы таходатчика, связанного с валом электродвигателя, а в качестве задающего воздействия – частоту импульсов задающего генератора.

**Сравнительный анализ быстродействия и точности формирования рабочих импульсов обратной связи.** Для принятых в [1] допущений, а именно  $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \tau_{зад} \approx \tau$ , длительность временного интервала  $a$  между передними фронтами импульсов  $C1$  и  $C2$  (см. рисунок 6) ограничена величиной  $a \leq \tau/2$ ; схемы, приведенные на рисунках 2–4 эквивалентны, то есть имеют одинаковое быстродействие и точность. В [1] показано, что требуемое время на формирование рабочего импульса обратной связи в этих схемах для принятых допущений составляет

$$T_{ФРИ} = 1 \frac{3}{4} \cdot \tau_{зад}, \quad (16)$$

где  $\tau_{зад} = 2^n \cdot \frac{1}{f} = const$ , здесь  $f$  – частота тактовых импульсов генератора 20.

Для предложенного в данной работе метода упрощенной обработки во времени исходных импульсов  $C1$  и  $C2$  и формирования рабочего импульса обратной связи относительно середины между передними фронтами исходных импульсов  $C1$  и  $C2$  требуемое время на формирование указанного импульса обратной связи (см. рисунок 6) можно представить в виде

$$T_{ФРИ} = \frac{a}{2} + \tau_{зад}. \quad (17)$$

Тогда для принятых выше допущений эта длительность времени составит

$$T_{ФРИ} = 1 \frac{1}{4} \cdot \tau_{зад}. \quad (18)$$

Из сравнения (16) и (18) видно, что упрощенный метод формирования импульсов обратной связи при прочих равных условиях обладает большим быстродействием.

Кроме того, можно утверждать, что упрощенный метод формирования импульсов обратной связи позволяет получить более высокую точность формирования этих импульсов. Поскольку рабочие импульсы обратной связи в этом методе формируются относительно временного положения середины между передними фронтами исходных импульсов  $C1$  и  $C2$ , а длительности самих импульсов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  никак не участвуют в процедуре формирования, то этим освобождается значительная часть периода следования импульсов обратной связи, а значит можно увеличить частоту генератора тактовых импульсов 2 и разрядность счетчика импульсов 19. В итоге это позволит увеличить точность формирования импульсов обратной связи и далее увеличить точность стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока.

Также в предложенном методе используются только две частоты для заполнения счетчика импульсов 19 на двух интервалах времени –  $f/2$  и  $f$ , тогда как в [1] используются четыре частоты для заполнения счетчика импульсов 19 на четырех интервалах времени –  $f/4, f/2, 3f/4$  и  $f$ , что снижает точность формирования импульсов обратной связи.

#### Заключение

1. Использование двух первичных формирователей импульсов, расположенных диаметрально относительно механического модулятора в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока, и введенная в систему цифровая схема формирования рабочего импульса обратной связи (см. рисунок 7) относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей позволяют исключить влияние эксцентриситета механического модулятора на скорость вращения вала электродвигателя и тем самым повысить точность стабилизации скорости вращения.

2. Предложенный упрощенный метод формирования рабочих импульсов обратной связи относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей обладает более высоким быстродействием и точностью по сравнению с известным методом [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин, А.С. Стабилизация скорости вращения вала электропривода постоянного тока за счет исключения эксцентриситета механического модулятора / А.С. Вершинин, В.П. Авдейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундам. науки. – 2017. – № 12. – С. 57–64.
2. Трахтенберг, Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением / Р.М. Трахтенберг. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.

3. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода : учеб. / В.В. Москаленко. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 208 с.
4. Цифровой электропривод постоянного тока : а. с. SU 1335106 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1987 г.
5. Цифровой электропривод постоянного тока : а. с. SU 1422349 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1988 г.
6. Цифровой измеритель временного положения середины видеоимпульсов : а. с. SU 1449937 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1989 г.
7. Brindley, K. Sensors and Transducers / K. Brindley. – London, 1988.

Поступила 16.11.2020

## OPTIONS FOR BUILDING HIGH-PRECISION SYSTEMS OF STABILIZING THE ROTATION SPEED OF A DC ELECTRIC MOTOR

A. VERSHININ

*In [1], a DC pulsed electric drive is described, in which working feedback pulses are formed using a mechanical modulator with two primary pulse generators. The primary shapers are located diametrically relative to the mechanical modulator. This makes it possible to exclude the influence of the eccentricity of the mechanical modulator on the formation of working feedback pulses. For this purpose, a special digital scheme is used for processing pulses from these primary shapers in real time with the formation of output working feedback pulses [1]. This paper presents possible options for constructing a digital circuit for processing pulses from these primary pulse generators in real time. A simplified method and a digital scheme for processing pulses from primary pulse generators in real time with the formation of output working feedback pulses are also proposed.*

**Keywords:** *electric motor, mechanical modulator, pulse generator, eccentricity, logic elements, triggers, rotation speed, stabilization accuracy.*