

УДК 621.316.718.5

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ИСКЛЮЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ
ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА МЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА**

*канд. техн. наук, доц. А.С. ВЕРШИНИН, канд. техн. наук, доц. В.П. АВДЕЙКО
(Полоцкий государственный университет)*

В данной работе проведен метрологический анализ влияния неточности диаметральной установки первичных формирователей импульсов относительно механического модулятора на стабильность формирования рабочих импульсов обратной связи, используемых в импульсном электроприводе постоянного тока.

Ключевые слова: *импульсный электропривод постоянного тока, рабочие импульсы обратной связи, механический модулятор, формирователь импульсов, схема обработки, временная диаграмма, метрологический анализ.*

Введение. Часто высокие требования к точности регулирования скорости вращения вала электропривода постоянного тока нередко предъявляются в системах автоматического управления скоростью вращения и в частности, в приборах для выполнения угловых измерений. В них предъявляются жесткие требования к стабильной скорости вращения, например, механического модулятора, сочлененного с валом электропривода, который используется как угловая мера. Этим обеспечивается повышение точности измерений.

В таких случаях часто применяют импульсные астатические системы автоматической стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока [2, 3, 7].

Точность стабилизации скорости вращения вала в такой системе определяется не только стабильностью частоты импульсов задающего генератора, но и точностью формирования импульсов обратной связи. Одним из возмущений, в такой системе стабилизации скорости вращения электропривода является неравномерность следования импульсов обратной связи, формируемых, например, оптронным формирователем импульсов по меткам, расположенным по окружности модулятора. Это имеет место при наличии эксцентриситета модулятора, насаженного на вал двигателя постоянного тока. При любом изготовлении механического модулятора какой-то эксцентриситет всегда будет иметь место.

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 для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора. При этом используется специальная схема обработки импульсов от этих первичных формирователей [1], и показана эффективность исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на точность формирования рабочих импульсов обратной связи, используемых в импульсном электроприводе постоянного тока.

При использовании такого электропривода возникает вопрос: как влияет отклонение установки первичных формирователей от строго диаметрального положения относительно механического модулятора. Для оценки указанного влияния необходимо выполнить метрологический анализ точности формирования рабочих импульсов обратной связи при наличии отклонений положений первичных формирователей импульсов от строго диаметрального положения относительно механического модулятора.

Цель работы. Целью данной работы является оценка влияния отклонений положений первичных формирователей импульсов от строго диаметрального положения относительно механического модулятора на стабильность формирования рабочих импульсов обратной связи, используемых в импульсном электроприводе постоянного тока.

Обоснование метода. Для достижения поставленной цели следует сдвинуть один из первичных формирователей импульсов на некоторый небольшой угол от строго диаметрального положения относительно механического модулятора и другого первичного формирователя импульсов (рисунок 1).

На рисунке 1 условно показан механический модулятор, который вращается с круговой скоростью ω 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. Но, в отличие от [1], первичный формирователь импульсов C_2 сдвинут на угол β по ходу вращения механического модулятора, который вращается относительно физического центра вращения O_1 . В результате первичные формирователи импульсов C_1 и C_2 расположены не строго диаметрально относительно механического модулятора. Для того, чтобы оценить возникающую погрешность при формировании рабочих импульсов обратной связи по импульсам формирователей C_1 и C_2 необходимо применить обработку во времени полученных сигналов и формировать выходные рабочие импульсы обратной связи, привязанные к временному положению середины между серединами исходных импульсов [1, 4, 5].

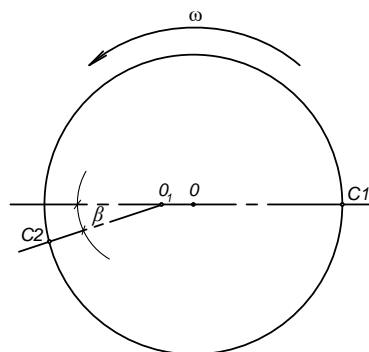


Рисунок 1. – Условное изображение механического модулятора с метками по внешней окружности (например, виде щелевых прорезей) и не диаметрально расположенными, (например, оптронными) первичными формирователями импульсов C1 и C2

Принцип обработки исходных импульсов от формирователей C1 и C2 во времени и формирования рабочих импульсов обратной связи показан на временных диаграммах (рисунок 2) [1, 5, 6].

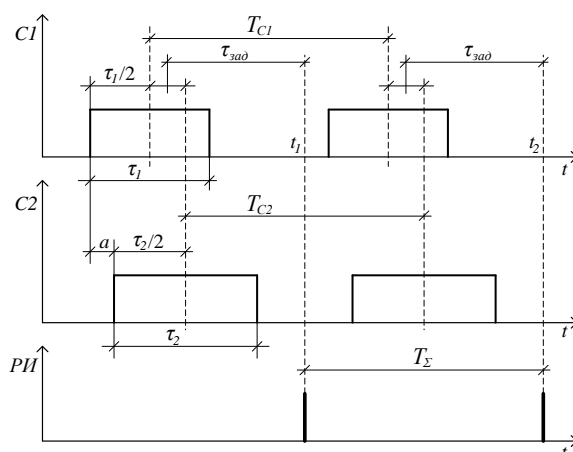


Рисунок 2. – Временная диаграмма, поясняющая принцип обработки исходных импульсов от диаметрально расположенных формирователей для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

- C1 и C2 – импульсы, формируемые соответственно первым и вторым оптронными формирователями импульсов, которые располагаются примерно диаметрально относительно механического модулятора;
- τ_1 и τ_2 – длительности импульсов соответственно C1 и C2;
- a – интервал времени между передними фронтами импульсов C1 и C2;
- T_{C1} и T_{C2} – периоды следования импульсов соответственно C1 и C2;
- $\tau_{зад}$ – время постоянной задержки выходных рабочих импульсов относительно средней точки между центрами импульсов C1 и C2;
- T_{Σ} – период следования выходных рабочих импульсов обратной связи.

В [1, 5] получены аналитические выражения и для промежуточных преобразований, и для формируемой рабочей частоты импульсов обратной связи, которые могут быть использованы для проведения метрологического анализа влияния отклонений положений первичных формирователей импульсов от строго диаметрального положения относительно механического модулятора.

Метрологический анализ. Согласно рисунку 2 период следования формируемых выходных рабочих импульсов обратной связи T_{Σ} равен разности моментов времени t_2 и t_1 [1]:

$$T_{\Sigma} = t_2 - t_1, \tag{1}$$

а моменты времени t_2 и t_1 соответственно равны [1]

$$t_1 = \frac{\tau_1/2 + a + \tau_2/2}{2} + \tau_{зад}, \tag{2}$$

$$t_2 = \frac{\tau_1/2 + T_{C1} + a + \tau_2/2 + T_{C2}}{2} + \tau_{зад}. \quad (3)$$

Тогда период следования выходных рабочих импульсов обратной связи T_{Σ} вычисляется по формуле, приведенной в работе [1]

$$T_{\Sigma} = t_2 - t_1 = \frac{\tau_1}{4} + \frac{T_{C1}}{2} + \frac{a}{2} + \frac{\tau_2}{4} + \frac{T_{C2}}{2} + \tau_{зад} - \frac{\tau_1}{4} - \frac{a}{2} - \frac{\tau_2}{4} - \tau_{зад} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2}. \quad (4)$$

Тогда частота следования выходных рабочих импульсов обратной связи f_p принимает вид [1]

$$f_p = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{2}{T_{C1} + T_{C2}} = \frac{2}{1/f_{C1} + 1/f_{C2}} = \frac{2 \cdot f_{C1} \cdot f_{C2}}{f_{C1} + f_{C2}}. \quad (5)$$

Далее необходимо выразить частоты f_{C1} и f_{C2} следования импульсов от первичных формирователей импульсов $C1$ и $C2$.

Пусть механический модулятор (см. рисунок 1) вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = \text{const}$ относительно физического центра вращения O_1 . Касательная скорость V_{C1} механического модулятора относительно первого формирователя импульсов $C1$ изменяется по закону [1]

$$V_{C1} = O_1 \cdot C_1 \cdot \omega = [R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega, \quad (6)$$

где R – рабочий радиус механического модулятора относительно геометрического центра вращения O .

Касательная скорость V_{C2} механического модулятора относительно второго формирователя импульсов $C2$ с учетом смещения его на угол β будет изменяться по закону

$$V_{C2} = O_1 \cdot C_2 \cdot \omega = [R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)] \cdot \omega. \quad (7)$$

Шаг дискретизации (шаг расположения меток) h механического модулятора может быть представлен в виде

$$h = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{N}, \quad (8)$$

где N – число дискрет (щелевых прорезей) механического модулятора.

Тогда частота выходных импульсов, формируемых первым формирователем импульсов $C1$ с учетом (6) и (8), будет изменяться по закону [1]

$$f_{C1} = \frac{V_{C1}}{h} = \frac{[R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} \cdot f_B \cdot N, \quad (9)$$

где $f_B = \omega/2 \cdot \pi$.

Частота следования выходных импульсов, формируемых вторым формирователем импульсов $C2$ при наличии смещения на угол β с учетом (7) и (8) будет изменяться по аналогичному закону:

$$f_{C2} = \frac{V_{C2}}{h} = \frac{[R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)] \cdot \omega \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)}{R} \cdot f_B \cdot N. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что частоты получаемых последовательностей импульсов от указанных формирователей импульсов не остаются постоянными и изменяются по синусоидальному закону.

Введем обозначение $f_B \cdot N = f_H$, тогда выражения (9) и (10) преобразуются к виду

$$f_{C1} = f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (11)$$

$$f_{C2} = f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta), \quad (12)$$

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

Преобразуем выражение (5) с учетом (11) и (12):

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{2 \cdot [f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot [f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)]}{f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t) + f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)} = \\ &= \frac{2 \cdot [f_H^2 + f_H \cdot \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t) - f_H \cdot \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta) - \Delta f^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)]}{2 \cdot f_H + \Delta f \cdot [\sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega \cdot t + \beta)]} = \end{aligned} \quad (13)$$

$$= \frac{f_H^2 + f_H \cdot \Delta f \cdot [\sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega \cdot t + \beta)] - \Delta f^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta)}{f_H + \frac{\Delta f}{2} \cdot [\sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega \cdot t + \beta)]}$$

В числителе полученного выражения слагаемое

$$\Delta f^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta) \approx 0 \quad (14)$$

представляет собой малую величину второго порядка.

Кроме того,

$$\begin{aligned} \sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega \cdot t + \beta) &= \sin(\omega \cdot t) - \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\beta) - \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) = \\ &= \sin(\omega \cdot t) \cdot [1 - \cos(\beta)] - \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) \approx -\sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t), \end{aligned} \quad (15)$$

так как при достаточно узком диапазоне изменения угла β при установке формирователя импульсов C_2 (см. рисунок 1), например, не более $\pm 5^\circ$, справедливо соотношение

$$1 - \cos(\beta) \approx \sin(\beta). \quad (16)$$

Тогда с учетом (14) и (15) выражение (13) преобразуем к виду

$$f_p \approx \frac{f_H - \Delta f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{1 + \frac{\Delta f}{2 \cdot f_H} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)}. \quad (17)$$

Абсолютная погрешность формирования рабочих импульсов обратной связи составит

$$\begin{aligned} \Delta f_p = f_H - f_p &\approx f_H - \frac{f_H - \Delta f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{1 + \frac{\Delta f}{2 \cdot f_H} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)} \approx \\ &\approx \frac{f_H + \frac{\Delta f}{2} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) - f_H + \Delta f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)}{1 + \frac{\Delta f}{2 \cdot f_H} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t)} \approx \\ &\approx 1,5 \cdot \Delta f \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) \approx 1,5 \cdot \frac{\Delta}{R} \cdot f_H \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t), \end{aligned} \quad (18)$$

поскольку $1 + \frac{\Delta f}{2 \cdot f_H} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) \approx 1$, так как $\frac{\Delta f}{2 \cdot f_H} \cdot \sin(\beta) \approx 0$ из-за того, что $\Delta f \ll f_H$, и значение $\sin(\beta)$ мало.

Из (18) следует, что абсолютная погрешность формирования рабочих импульсов обратной связи изменяется по косинусоидальному закону.

Относительная погрешность формирования указанной частоты с учетом (18) [8]

$$\delta_{f_p} \approx \frac{\Delta f_p}{f_H} \cdot 100\% \approx 1,5 \cdot \frac{\Delta}{R} \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot 100\%. \quad (19)$$

Относительная погрешность также не остается постоянной величиной и тоже изменяется по косинусоидальному закону.

Из (19) следует, что максимальная относительная погрешность формирования рабочих импульсов обратной связи f_p (как амплитудное значение), в диапазоне изменения угла β не более $\pm 5^\circ$, достаточно мала.

Так, например, в таблице представлены расчеты максимальной относительной погрешности (амплитудных значений) формирования указанной частоты при величине эксцентриситета $\Delta = 0,1$ мм, радиуса механического модулятора $R = 40$ мм, и изменении угла β от 1° до 5° .

Таблица.

Значение β , град	Относительная погрешность δ_{fp} , %
1	0,00654
2	0,01309
3	0,01963
4	0,02618
5	0,03269

На рисунке 3 представлен график изменения относительной погрешности формирования указанной рабочей частоты обратной связи для тех же условий.

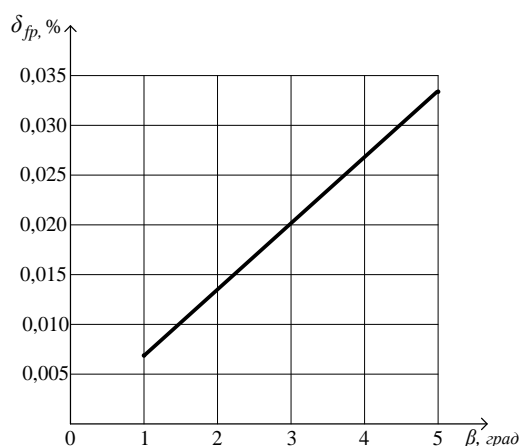


Рисунок 3. – Зависимость максимальной относительной погрешности формирования рабочих импульсов обратной связи при смещении первичных формирователей от диаметального положения относительно механического модулятора

Таким образом, выражение (19) позволяет оценить влияние неточности диаметальной установки первичных формирователей импульсов C_1 и C_2 относительно механического модулятора на стабильность формирования рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации скорости вращения электропривода.

Заключение. На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенного метрологического анализа получено аналитическое выражение (19), которое позволяет получить количественную оценку относительной погрешности формирования рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации электропривода при неточно диаметальной установке первичных формирователей импульсов C_1 и C_2 относительно механического модулятора.
2. Указанная относительная погрешность формирования рабочих импульсов обратной связи изменяется по косинусоидальному закону с частотой вращения механического модулятора, и максимальное (амплитудное) значение пропорционально величине смещения первичных формирователей импульсов C_1 и C_2 от строго диаметального положения относительно механического модулятора.
3. Зависимость максимального (амплитудного) значения относительной погрешности формирования рабочих импульсов обратной связи отличается малой крутизной при малых смещениях первичных формирователей импульсов C_1 и C_2 от строго диаметального положения относительно механического модулятора (в диапазоне изменения угла $\beta = \pm 5$, см. рисунок 1).
4. При установке первичных формирователей C_1 и C_2 относительно механического модулятора по возможности следует стремиться расположить их диаметально, но при этом небольшие смещения, например, в пределах изменения угла $\beta = \pm 3^\circ$ (рисунок 1) вполне допустимы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин, А.С. Стабилизация скорости вращения вала электропривода постоянного тока за счет исключения эксцентриситета механического модулятора / А.С. Вершинин // 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.
8. Основы метрологии и электрические измерения : учеб. для вузов / Е.М. Душин [и др.] ; под ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

Поступила 05.09.2019

EVALUATION OF THE FEEDBACK PULSES' FORMATION STABILITY FOR A DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE WITHOUT ECCENTRICITY INFLUENCE OF A MECHANICAL MODULATOR

A. VERSHININ, V. AVDEYKO

In this study, we perform a metrological analysis of the influence of that inaccuracy of the diametrical installation of the primary pulse shapers relatively to the mechanical modulator on the stability of the formation of feedback pulses used in a pulsed DC electric drive.

Keywords: *direct current pulse electric drive, operating feedback pulses, mechanical modulator, pulse shaper, processing circuit, temporal diagram, metrological analysis.*