

Фролов А. В., Савин А. Е., Нестерова Н. С., Жданова С. М.
A. V. Frolov, A. E. Savin, N. S. Nesterova, S. M. Zhdanova

**УПРАВЛЕНИЕ ДРАЙВЕРОМ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ
ЦИФРОВОГО ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ДРОБНЫМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЕЛЕНИЯ**

**STEPPER MOTOR DRIVER CONTROL USING A DIGITAL FREQUENCY DIVIDER
WITH VARIABLE FRACTIONAL DIVISION RATIO**

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Савин Артур Евгеньевич – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Artur E. Savin – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Нестерова Наталья Станиславовна – доктор технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных и автомобильных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Natalia S. Nesterova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Surveying and Design of Railways and Highways Department, Far Eastern State University of Railway Transport (Russia, Khabarovsk).

Жданова Светлана Мирзахановна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Svetlana M. Zhdanova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Construction Department, Far Eastern State University of Railway Engineering (Russia, Khabarovsk).

Аннотация. Предложено использование алгоритма сигма-дельта модулятора для реализации делителя частоты с переменным дробным коэффициентом деления. Проведён анализ зависимости характеристик выходных сигналов от коэффициента деления сигма-дельта модулятора. Предложено использование полученных результатов для управления драйверами шаговых электродвигателей с переменной частотой вращения с помощью промышленных логических контроллеров с большим временем программного цикла.

Summary. The use of sigma-delta modulator algorithm for realization of frequency divider with variable fractional division factor is proposed. The dependence of the output signal characteristics on the division factor of the sigma-delta modulator is analyzed. The use of the obtained results for control of stepper motor drivers with variable speed by means of industrial logic controllers with a long program cycle time is proposed.

Ключевые слова: делитель частоты, дробный коэффициент деления, переменный коэффициент деления, сигма-дельта модулятор, алгоритм, шаговый электродвигатель, программируемый логический контроллер.

Key words: frequency divider, fractional division ratio, variable division ratio, sigma-delta modulator, algorithm, stepper motor, programmable logic controller.

Исследования проводились в рамках гранта № ВН001/2023 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах».

Введение. В настоящее время шаговые электродвигатели (ШД) значительно вытеснили сервоприводы постоянного и переменного тока в исполнительных устройствах автоматики малой и средней мощности. Управление ШД осуществляется с помощью драйвера ШД от дискретных систем управления. Для получения заданной частоты вращения вала шагового электродвигателя необходимо на драйвер ШД подавать импульсы с заданной частотой. Так как частота вращения вала ШД должна изменяться с заданной, как правило, малой дискретностью, то необходимо также менять частоту импульсов управления с малой дискретностью [13; 15].

Современные синтезаторы частот обычно используют принцип деления частоты опорного генератора на заданный коэффициент. Поэтому задача получения импульсной последовательности с заданной частотой сводится к задаче разработки цифрового регулируемого делителя частоты. Для деления частоты на целое число традиционно применяются счётчики с заданным коэффициентом счёта [7; 11]. Для получения синтезатора частот с регулируемой частотой применяются делители частоты с переменным коэффициентом деления. Традиционные делители частоты [1–3] используют счётчики с регулируемым коэффициентом счёта. Но коэффициент счёта счётчика – это целое положительное число. Поэтому на выходе такого делителя можно получить набор дискретных частот из следующего ряда: $f_{out} = \frac{f_T}{N}$, $f' = \frac{f_{out}}{f_T} = \frac{1}{N}$, где f_{out} – выходная частота делителя, Гц; f_T – тактовая частота опорного генератора, Гц; f' – относительная выходная частота генератора, Гц; N – коэффициент деления, при этом N – натуральное число (см. рис. 1).

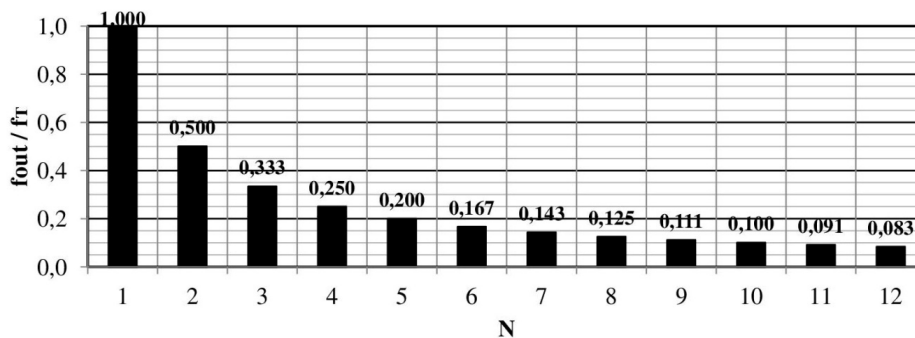


Рис. 1. Зависимость частоты выходных сигналов делителя частот от коэффициента деления

Видно, что применение такого подхода возможно лишь при больших коэффициентах, иначе дискретность выходных частот получается слишком большой. Установить, например, $f_T > f_{out} > 0,5f_T$ в принципе не представляется возможным. Более того, дискретность выходных частот будет описываться формулой вида $\Delta f_{out} = f_T \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right)$, $\Delta f' = \frac{\Delta f_{out}}{f_T} = \left(\frac{1}{N(N+1)} \right)$. Относительная дискретность выходных частот $\delta = \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{N+1}$. Из приведённых формул видно, что шаг сетки частот синтезатора в принципе не может быть равномерным. Более того, для получения хоть сколько-нибудь приемлемого шага частот частота тактовых импульсов должна быть значительно выше максимальной частоты выходных сигналов. Например, для получения шага частот синтезатора, равного $\delta = 1\%$ от максимальной выходной частоты, необходимо применять делители с коэффициентом деления не менее $N = \frac{1}{\delta} - 1 = 99$. А это означает, что частота опорного генератора должна быть минимум в 99 раз выше максимальной частоты выходных сигналов.

Применительно к задаче управления шаговым двигателем от промышленного логического контроллера (ПЛК) описанный подход практически неприменим, т. к. длительность цикла ПЛК составляет порядка 1 мс [10; 18]. Это означает, что ПЛК может менять состояние своих выходов не более чем 1000 раз в секунду, что соответствует максимальной частоте сигналов 500 Гц. Если

частота опорного генератора, определяемая длительностью цикла, равна 500 Гц, то для реализации программного делителя частоты с шагом изменения частоты 1 % максимальная частота выходных сигналов будет составлять порядка 5 Гц. Учитывая, что дискретность вращения большинства ШД составляет 200 имп./об, то максимальная скорость вращения вала ШД будет составлять порядка 1,5 об/мин, что на практике применяется крайне редко.

Для повышения частоты выходных сигналов синтезатора частот можно применить цифровой делитель частоты с дробным коэффициентом деления. Существующие решения данной задачи, как правило, аппаратные [5; 6]. Эти решения подразумевают применение дополнительных функциональных устройств – ждущего мультивибратора с регулируемой длительностью импульса, схемы с фазовой автоподстройкой частоты и т. д. Но эти решения также неприменимы для систем с использованием ПЛК, т. к. требуют применения дополнительных функциональных блоков с аналоговыми элементами и сложности цифрового управления коэффициентом деления.

Представляет интерес алгоритм деления частоты на 1,5 и 2,5 [12], который использует как передний, так и задний фронты входного сигнала для формирования выходных сигналов. При этом получаются импульсы с неизменной скважностью (равной 3 и 2,5) и неизменной длительностью (равной 1 и 2 длительностям входного сигнала). Но данный алгоритм не позволяет реализовать произвольный коэффициент деления, кроме того, длительности выходных сигналов зависят от выбранного коэффициента деления.

Заслуживают внимания схемы делителей частоты с дробным коэффициентом деления [7; 17; 22], использующие следующий алгоритм. Частота входного сигнала сначала делится на заданный целый коэффициент деления N в течение некоторого периода деления, после чего частота входного сигнала делится на коэффициент деления $N+1$ в течение остального времени. Но данный алгоритм приводит к «скачку» частоты при переключении коэффициента деления и, как следствие, к присутствию в спектре выходного сигнала минимум двух гармоник с большой амплитудой. Также во время переключения делителей может возникнуть эффект потери импульса (при наложении импульса одного делителя на импульс второго делителя). Кроме того, схема дробного делителя частоты достаточно сложна – она содержит два делителя с переменными коэффициентами деления и схему выбора этих коэффициентов деления и переключения между ними.

Для улучшения характеристик дробного делителя частоты, упрощения его функциональной схемы или алгоритма работы при программной реализации в статье приводятся результаты исследования работы сигма-дельта модулятора первого порядка [9; 14; 16; 19–21] в качестве программного делителя частоты для управления драйвером шагового двигателя непосредственно от ПЛК с большой длительностью цикла.

Методика эксперимента. Алгоритм сигма-дельта модулятора (СДМ) (см. рис. 2) был выполнен программно. Модулятор выполняет умножение частоты входных сигналов (C) на дробный коэффициент $k = \frac{f_{U_{out}}}{f_c} = \frac{U_{in}}{U_0}$, где $U_0 > 0$; $U_{in} \geq 0$. Для упрощения реализации исследуемого алгоритма U_0 и U_{in} выбирались целыми числами (в этом случае все вычисления целочисленные, что повышает скорость работы алгоритма), хотя исследуемый алгоритм способен работать и при дробных значениях указанных величин.

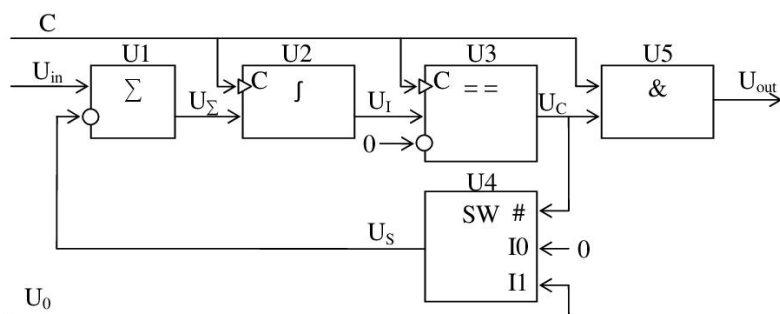


Рис. 2. Функциональная схема сигма-дельта модулятора

Интегратор U2 и компаратор U3 выполнены синхронными и синхронизируются передним фронтом входного сигнала «С». Передний фронт синхросигнала рассчитывается следующим образом:

$$C_{f.i} = \begin{cases} 1, C_i > C_{i-1} \\ 0, C_i \leq C_{i-1} \end{cases}.$$

Выходной сигнал интегратора U2

$$U_{I.i} = \begin{cases} U_{I.i-1}, C_{f.i} = 0 \\ U_{I.i-1} + U_{\Sigma.i}, C_{f.i} = 1 \end{cases}.$$

Выходной сигнал компаратора U3

$$U_{C.i} = \begin{cases} U_{C.i-1}, C_{f.i} = 0 \\ 0, C_{f.i} = 1 \cap U_{I.i} \leq 0 \\ 1, C_{f.i} = 1 \cap U_{I.i} > 0 \end{cases}.$$

Выходной сигнал коммутатора (однобитного цифро-аналогового преобразователя) U4

$$U_{S.i} = \begin{cases} U_0, U_{C.i} = 1 \\ 0, U_{C.i} = 0 \end{cases}.$$

Выходной сигнал сумматора U1 вычисляется по формуле

$$U_{\Sigma.i} = U_{in} - U_{S.i-1} = \begin{cases} U_{in} - U_0, U_{C.i-1} = 1 \\ U_{in}, U_{C.i-1} = 0 \end{cases}.$$

Драйвер шагового двигателя управляется фронтом сигнала управления, а не его уровнем, поэтому выходные импульсы модулятора должны быть минимальной длительности и обязательно разделены паузами. Для получения выходного сигнала минимальной длительности, равной длительности импульса входного сигнала, выходной сигнал генерируется только при наличии сигнала высокого уровня на входе «С», это реализуется с помощью схемы логического «И» U5. То есть этот логический элемент исполняет роль коммутатора, который либо пропускает импульсы опорного генератора, либо нет. Выходной сигнал модулятора

$$U_{out.i} = C_i \cdot U_{C.i}.$$

Для численного анализа выходных сигналов СДМ применительно к задаче управления скоростью вращения вала ШД [4; 8] применялся дискретный спектральный анализ с помощью дискретного преобразования Фурье. Дискретное преобразование Фурье выполнялось по формулам

$$U_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2};$$

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} U_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right);$$

$$B_k = \sum_{n=0}^{N-1} U_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right);$$

$$k = 0, \dots, N - 1,$$

где U_k – амплитуда k -й гармоники; N – количество значений выходных сигналов СДМ за период; U_n – мгновенное дискретное значение сигнала.

Для оценки пульсаций частоты вращения вала ШД рассчитывался коэффициент нелинейных искажений (ТНД):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{N-1} U_k^2}}{U_1}$$

В работе также использовался автокорреляционный анализ выходных сигналов СДМ. Автокорреляционная функция вычислялась по формуле

$$B_u(n) = \sum_{i=0}^{N-1} U_{out.i} U_{out.i-n}$$

Результаты исследований и их анализ. Диаграммы выходных сигналов СДМ для различных коэффициентов деления представлены на рис. 3. Анализ рисунка показывает, что исследуемый алгоритм деления формирует на выходы U_{in} сигналов из U_0 входных сигналов. При этом распределение импульсов и пауз за период выходного сигнала достаточно равномерное, а при делении на целый коэффициент распределение импульсов и пауз равномерное. Также видно, что если коэффициент умножения СДМ $k = \frac{U_{in}}{U_0}$ представляет собой несократимую дробь, U_0 и U_{in} – натуральные числа, то период выходного сигнала равен $N = U_0$.

Считая, что угол поворота оси ШД за один шаг равен $1,8^\circ$, построим диаграммы изменения угла ШД при разных значениях коэффициента деления (см. рис. 4). Диаграммы показывают, что за время периода изменение угла поворота оси ШД происходит дискретно, но достаточно равномерно – отсутствуют явно выраженные «скачки» скорости вращения за исключением скачков скорости из-за дискретного характера вращения вала.

Графики автокорреляционных функций (АКФ) выходных сигналов СДМ при разных значениях коэффициента деления частоты показаны на рис. 5. Из графиков следует, что период выходных импульсов модулятора равен $N = U_0$ при условии, что коэффициент деления представлен в виде неделимой дроби.

Из представленных данных видно, что если $U_{in} = 1$ и U_0 – натуральное число, период и скважность выходного сигнала СДМ неизменны. Иными словами, выходные импульсы СДМ чередуются одинаковыми паузами. Что означает постоянную (хоть и дискретную) скорость вращения вала ШД, т. е. вращение вала без ускорений и замедлений. На рис. 3 описанная особенность видна «невооружённым» глазом, а на рис. 5 этот факт приводит к наличию в графике АКФ только основных «лепестков» с периодом повторения, равным коэффициенту деления.

При делении частоты опорного генератора на другие коэффициенты деления длительность пауз между импульсами меняется, т. е. период импульсной последовательности содержит одиночные импульсы с разным периодом и скважностью. Это явление можно описать как джиттер (jitter), или колебание частоты. Это приводит к изменению скорости вращения вала ШД, что аналогично наложению высших гармоник на среднюю скорость вращения вала. На рис. 3 это также непосредственно видно, а на рис. 5 это выражается в наличии дополнительных «лепестков» на графике АКФ.

Диаграммы выходных импульсов на рис. 3 не позволяют качественно оценить описанный эффект джиттера частоты. По графику АКФ (см. рис. 5) можно лишь косвенно определить «чистоту» частоты выходных сигналов по количеству боковых «лепестков» графика АКФ и отношению их уровня к величине основного «лепестка».

Поэтому для оценки степени колебания частоты выходных сигналов СДМ в работе проводилось моделирование эквивалентного напряжения на обмотке ШД и оценки отношения его коэффициента нелинейных искажений к THD исходного сигнала. Под термином «эквивалентное напряжение» подразумевается дискретное напряжение гармонической формы, которое нужно подавать на одну из обмоток двухобмоточного ШД, чтобы вал ШД совершил 1 оборот за требуемый период (чтобы создать проекцию вращающегося вектора магнитного поля на одну из координатных осей). Из данных рис. 3 и 5 видно, что для исследуемых коэффициентов деления максимальный период выходных сигналов составляет 10 импульсов. Исходя из этого, примем, что один пе-

риод эквивалентного гармонического напряжения питания обмотки двухобмоточного ШД соответствует 10 элементарным поворотам вала ШД, или что шаг вращения вала ШД соответствует 0,1 периода: $\alpha = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ$. Тогда эквивалентные напряжения при разных коэффициентах деления будут иметь вид, представленный на рис. 6.

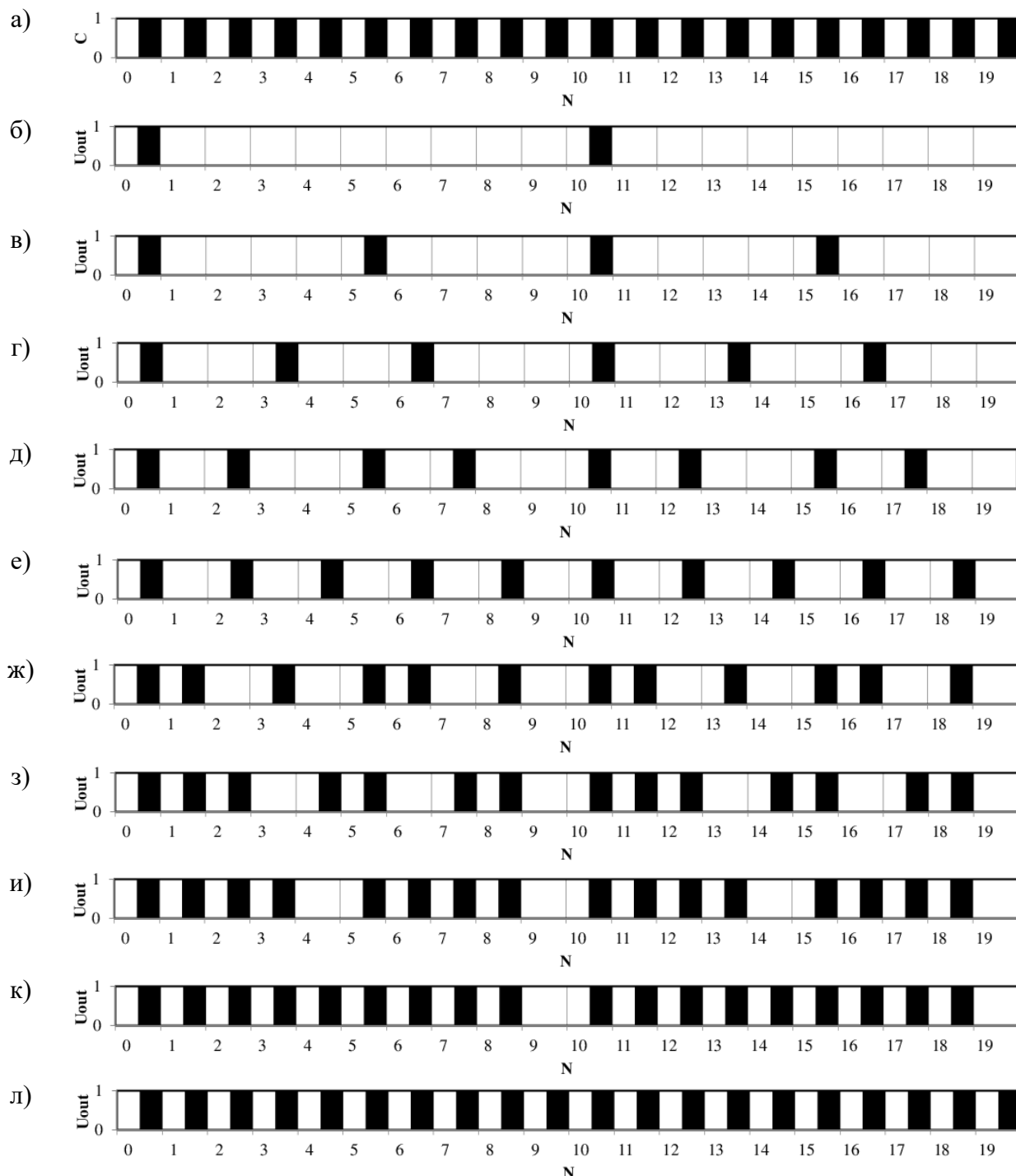


Рис. 3. Диаграммы входных (а) и выходных сигналов СДМ при различных коэффициентах умножения частоты: б – 1/10; в – 1/5; г – 3/10; д – 2/5; е – 1/2; ж – 3/5; з – 7/10; и – 4/5; к – 9/10; л – 1/1

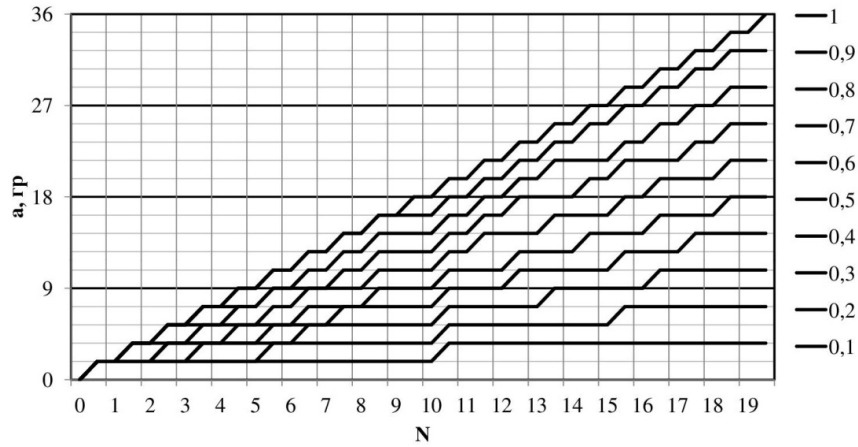


Рис. 4. Диаграммы вращения оси ШД при разных коэффициентах умножения частоты СДМ

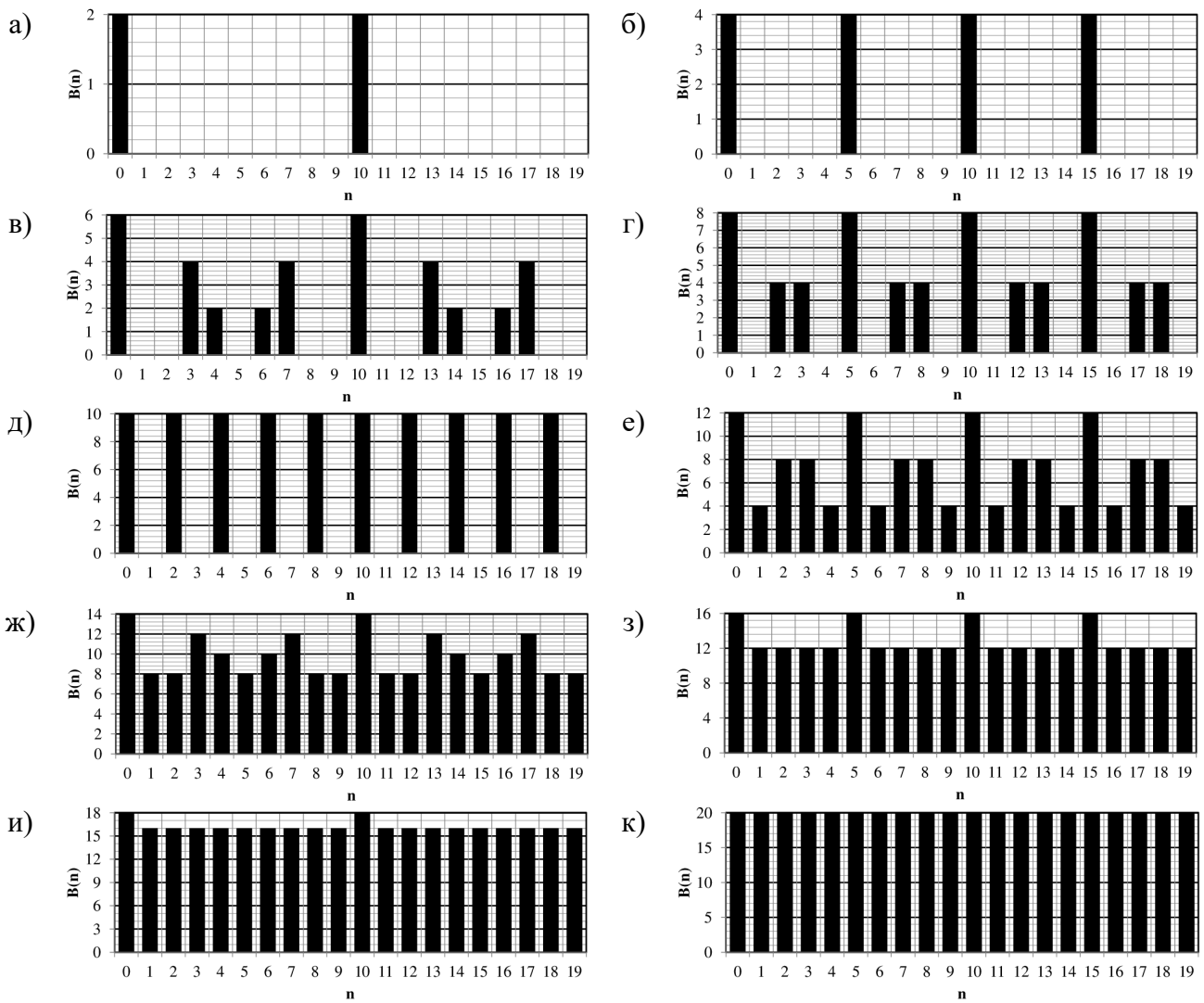


Рис. 5. Автокорреляционные функции выходных сигналов СДМ при разных коэффициентах умножения частоты: а – 1/10; б – 1/5; в – 3/10; г – 2/5; д – 1/2; е – 3/5; ж – 7/10; з – 4/5; и – 9/10; к – 1

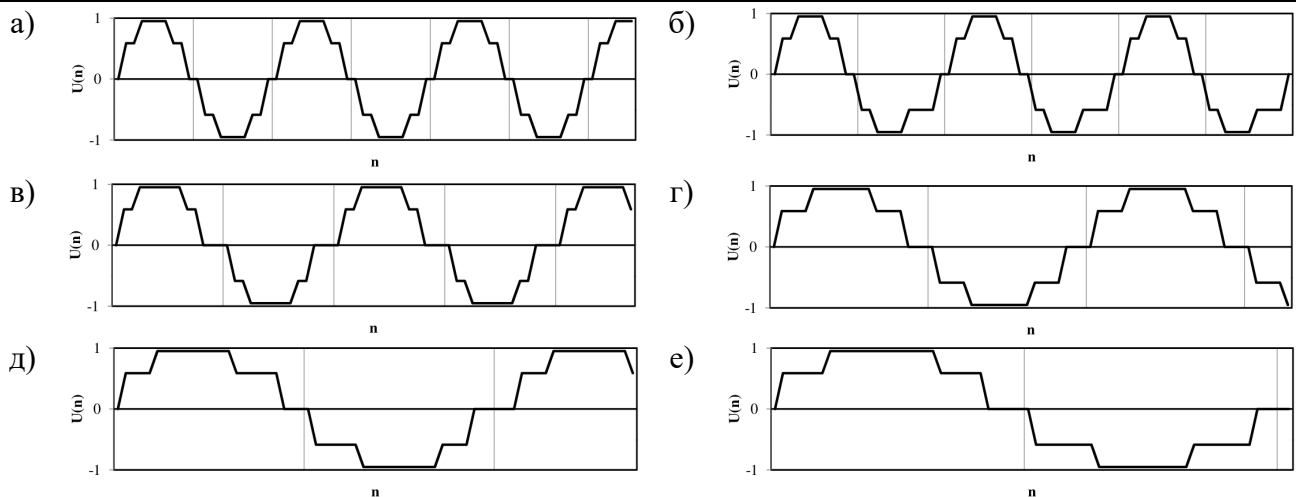


Рис. 6. Диаграммы «эквивалентных» напряжений обмотки ШД, полученные из выходных импульсов СДМ с разными коэффициентами умножения частоты:
 а – 1; б – 9/10; в – 7/10; г – 1/2; д – 2/5; е – 3/10

После разложения в ряд Фурье полученных сигналов (с учётом разных длительностей периодов сигналов с разными коэффициентами деления СДМ) получим соответствующие амплитудные спектры (см. рис. 7) и зависимость коэффициента нелинейных искажений от коэффициента деления СДМ (см. рис. 8).

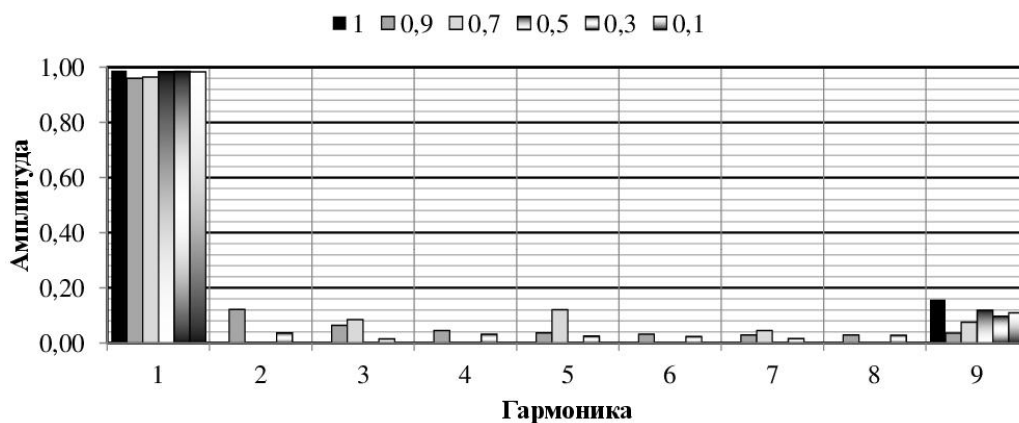


Рис. 7. Амплитудные спектры эквивалентных напряжений при коэффициентах умножения частоты СДМ: 1; 0,9; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1

Представленные диаграммы демонстрируют следующее. Минимальные искажения и минимальный уровень высших гармоник обеспечивает коэффициент деления частоты СДМ, равный 1. При этом THD составляет 16 %, а в спектре отсутствуют высшие гармоники, вплоть до 9. Наличие высокочастотных гармоник вызвано дискретным (ступенчатым) характером представления сигнала «эквивалентного» напряжения. Полученные значения спектрального состава и THD могут использоваться в качестве референсных для оценки качества остальных сигналов. Целочисленные коэффициенты деления частоты (2, 5, 10) обеспечивают спектральные характеристики сигнала, аналогичные характеристике исходного сигнала.

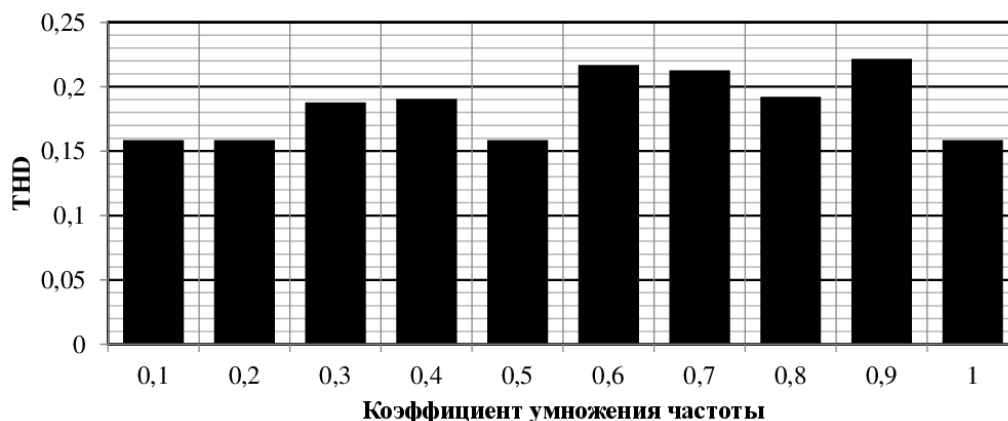


Рис. 8. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от коэффициента умножения СДМ

Деление частоты опорного генератора на дробные коэффициенты деления приводит к появлению в спектре выходного сигнала высших гармоник амплитудой до 12 % от первой гармоники и дополнительно повышает THD на величину до 6 %. Наибольшие искажения формы выходных сигналов соответствуют меньшим значениям коэффициента деления частоты.

Выводы:

1. Алгоритм сигма-дельта модуляции может эффективно использоваться для реализации как аппаратных, так и программных цифровых делителей частоты с дробным переменным коэффициентом деления и формировать выходные сигналы с частотами от 0 до частоты опорного генератора.

2. Применение программного алгоритма сигма-дельта модулятора в ПЛК позволяет использовать универсальные ПЛК с большой длительностью программного цикла для непосредственного управления драйвером ШД с регулировкой скорости вращения вала ШД в широких пределах с малой дискретностью.

3. Выходные сигналы сигма-дельта модулятора в режимах деления частоты на целочисленный коэффициент деления аналогичны сигналам «классических» делителей на счётчиках, обеспечивают постоянные период и скважность импульсной последовательности, что обеспечивает постоянную скорость вращения вала ШД.

4. Дробные коэффициенты умножения частоты вида $k = \frac{U_{in}}{U_0}$ (где U_0 и U_{in} – целые числа, $U_{in} \leq U_0$, $U_0 > 0$, $U_{in} \geq 0$) при условии, что они представляет собой несократимую дробь, обеспечивают формирование выходных сигналов с минимальным периодом, равным U_0 . Внутри этого периода длительность паузы между сигналами меняется максимум на длительность одного периода сигнала опорной частоты. Распределение импульсов в выходном сигнале модулятора достаточно равномерное. В результате гармонические искажения выходного сигнала повышаются не более чем на 6 % за счёт добавления в спектр высших гармоник амплитудой не более 12 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство № 1119177 А1 СССР, МПК H03K 23/00. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления: № 3608445: заявлено 21.06.1983: опубликовано 15.10.1984 / Вакуленко Н. И., Герман С. М.; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-1221.
2. Авторское свидетельство № 1322471 А1 СССР, МПК H03K 23/66. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления: № 3998634: заявлено 30.12.1985: опубликовано 07.07.1987 / Чистяков В. А., Слепнев Ю. М.; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я А-7182.
3. Авторское свидетельство № 822377 А1 СССР, МПК H03K 23/00. Делитель частоты следования импульсов с переменным коэффициентом деления: № 2812704: заявлено 09.07.1979: опубликовано 15.04.1981 /

Власов Г. С., Гарин Л. Д., Добровинская Д. Г., Павленков О. Ф.; заявитель Пензенский филиал Всесоюзного научно-исследовательского технологического института приборостроения.

4. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51). – С. 29-38.
5. Браун, Д. Новые экономичные синтезаторы с дробно-переменным коэффициентом деления / Д. Браун // Новости микроэлектроники. – URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_02/stat_11.htm (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
6. Делитель частоты с регулируемым коэффициентом деления // Журнал РадиоЛоцман. – URL: <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=51065> (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
7. Дингес, С. Делители частоты. Часть 1. Основные сведения о делителях частоты / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии. – 2019. – № 2 (211). – С. 6-16.
8. Иванов, С. Н. Расчёт надёжности привода линейного перемещения машиностроительного оборудования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. Ю. Сариллов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 75-80.
9. Колесников, Д. В. Анализ характеристик verilog-модели сигма-дельта модулятора / Д. В. Колесников, Е. Н. Бормонттов, Е. В. Неужин // Энергия – XXI век. – 2012. – № 1-2 (82-83). – С. 58-63.
10. Лепехина, С. Ю. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков, Ю. А. Давыдов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 68-75.
11. Микушин, А. В. Схемотехника цифровых устройств: учеб. пособие / А. В. Микушин, В. И. Сединин. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2007. – 327 с.
12. Организация делителя частоты с дробным коэффициентом деления в объёме ПЛИС // Хабр, 2006-2024. – URL: <https://habr.com/ru/articles/306132/> (дата обращения: 15.02.2024). – Текст: электронный.
13. Особенности проектирования малоинерционных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, Н. А. Буньков, А. А. Дадынский, А. В. Горбунов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 10-15.
14. Способ анализа работы сигма-дельта модулятора во временной области / И. Я. Апкаев, О. И. Лазарева, К. Ю. Пискаев, М. С. Хитрых // Современные информационные технологии. – 2022. – № 35 (35). – С. 57-62.
15. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 28-40.
16. Толкачев, П. А. Анализ сигма-дельта модулятора / П. А. Толкачев // Автоматизация. Современные технологии. – 2016. – № 5. – С. 38-42.
17. Тышук, Ю. Н. Разработка цифрового делителя частоты с дробным коэффициентом деления в 130 нм сige ВІСМОS технологии / Ю. Н. Тышук, А. С. Кожемякин, А. Г. Говенько // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2019. – № 2. – С. 142.
18. Хрульков, В. Н. Особенности реализации нечётких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 52-62.
19. Чувькин, Б. В. Методика определения низкочастотных периодических колебаний в однобитных сигналах сигма-дельта модуляторов / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 174-181.
20. Шахтарин, Б. И. Анализ сигма-дельта модулятора / Б. И. Шахтарин, А. А. Быков, А. А. Ковальчук // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 1. – С. 28-37.
21. Шахтарин, Б. И. Анализ сигма-дельта модулятора с одной петлёй / Б. И. Шахтарин, А. А. Иванов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2008. – № 126. – С. 74-86.
22. Шахтарин, Б. И. Анализ синтезатора частот с дробно-переменным коэффициентом деления делителя / Б. И. Шахтарин, Е. Г. Качармина, В. В. Вельтищев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 122-131.