

## СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОПУСКА ШАГОВ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Уляшев Артём Евгеньевич**

Аспирант, Ухтинский государственный  
технический университет, Ухта  
artem.ulyashev@gmail.com

**Старцев Андрей Эврикович**

К. т. н., доцент, Ухтинский государственный  
технический университет, Ухта  
astarcev@ugtu.net

### METHODS FOR DETERMINING LOSING STEPS OF A STEPPER MOTOR

**A. Ulyashev  
A. Startsev**

*Summary.* When using stepper motors, the problem of skipping steps can occur. The essence of this problem is that when the control system sets the number of steps, for some reason the motor takes fewer steps. There are several reasons for this problem: driver failure in the motor control system, incorrectly set current in the motor phases, insufficient voltage in the motor windings, excessive load on the stepper motor shaft, high acceleration of the shaft, as well as the problem in the mechanical part — failure of gear or belt transmission. To solve this problem, angle sensors are used, which can detect a skipped step. The use of sensors with their control system increases the cost of the drive, as well as require additional space for their location. The task of the presented research is to determine the ways of skipping steps based on electric sensors, which are available to directly measure the coordinates of the stepper motor, through the use of its mathematical model. To solve the problem we used methods of mathematical modeling and experimental research. With the help of the mathematical model the equations were obtained, from which it is possible to judge the dynamics of the mechanical coordinates of the motor. As investigated parameters were considered the current in stator windings and the counter EMF generated during rotation of the rotor, which acts as a permanent magnet. The result of the study is the determination of parameters, which allow to register with a high degree of probability the skipping of steps by the motor.

*Keywords:* stepper motor, mathematical model, step loss.

*Аннотация.* При эксплуатации шаговых двигателей может возникать проблема пропуска шагов. Её суть заключается в том, что при заданном системой управления количестве шагов, двигатель по некоторым причинам делает меньшее число шагов. Причин возникновения данной проблемы несколько: неисправность драйвера в системе управления двигателем, неверно выставленный ток в фазах двигателя, недостаточное напряжение в обмотках двигателя, чрезмерная нагрузка на валу шагового двигателя, большие ускорения вала, а также проблема в механической части — неисправность редукторной передачи или ременной передачи. Для решения данной проблемы применяют угловые датчики, которые могут зафиксировать пропуск шага. Использование датчиков с их системой управления увеличивает стоимость привода, а также требует дополнительного места для их размещения. Задачей представленного исследования является определение способов пропуска шагов на основе электрических датчиков, которые являются доступными для непосредственного измерения координат шагового двигателя, посредством использования его математической модели. Для решения задачи использованы методы математического моделирования и экспериментального исследования. С помощью математической модели получены уравнения, из которых можно судить о динамике механических координат двигателя. В качестве исследуемых параметров рассматривалась сила тока в обмотках статора и противо-ЭДС, вырабатываемая при вращении ротора, который выступает постоянным магнитом. Результатом исследования является определение параметров, которые позволяют с высокой долей вероятности регистрировать пропуск шагов двигателем.

*Ключевые слова:* шаговый двигатель, математическая модель, пропуск шага.

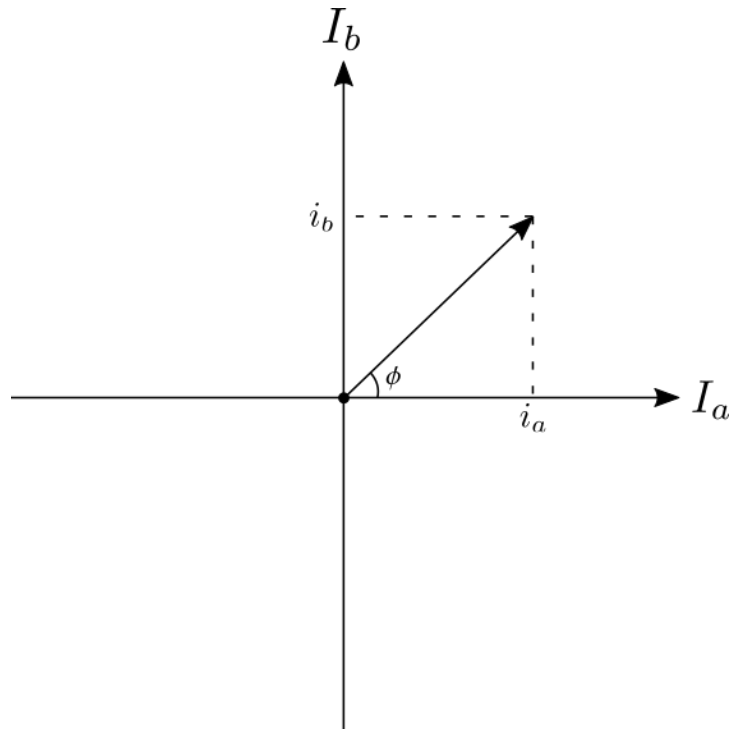


Рис. 1. Вектор тока фаз статора в принятой системе координат

**Ш**аговый двигатель (ШД), в рамках решения научно-технических задач, может применяться в самых разнообразных направлениях. Его популярность обусловлена компактными размерами, небольшой мощностью и возможностью дискретно позиционировать приводимый объект.

Во время эксплуатации ШД возникает некоторый ряд проблем. К наиболее значимой из них относится проблема пропуска шагов. Представленное явление может возникать по причине некорректно подобранного источника питания, по причине наводок на линии сигналов управления, по причине превышения допустимого момента сопротивления и по многим иным причинам [1].

Проблема пропуска шагов устраняется с помощью датчиков углового положения вала ШД, что делает всю систему позиционирования более дорогостоящей и менее ремонтпригодной. Установка углового датчика положения требует дополнительного рабочего пространства, что сводит на нет одно из главных преимуществ шагового двигателя — его компактность [2].

Одним из существующих вариантов решения упомянутой выше проблемы выступает определение механических координат, на основании имеющихся данных об электрических координатах, которые могут быть рассчитаны по координатам, питающих ШД цепей,

на основе его математической модели. Результатом данной работы является определение соответствующих маркеров, по которым можно судить об аварийной работе двигателя.

Математическая модель гибридного шагового двигателя, с учетом взаимной индуктивности фаз обмоток статора, согласно [2] имеет следующий вид (1). Первые два уравнения описывают электрические процессы в ШД, третье и четвертое — увязывают электромагнитные процессы преобразования энергии электромагнитного поля с механическими координатами на валу.

$$\begin{cases}
 \left( L_a - \frac{M_{ab}}{L_b} \right) \cdot \frac{di_a}{dt} = U_a - i_a \cdot R + K_m \cdot \omega \cdot \sin(p \cdot \theta) - \\
 - \frac{M_{ab}}{L_b} \cdot (U_b - i_b \cdot R - K_m \cdot \omega \cdot \cos(p \cdot \theta)); \\
 \left( L_b - \frac{M_{ab}}{L_a} \right) \cdot \frac{di_b}{dt} = U_b - i_b \cdot R - K_m \cdot \omega \cdot \cos(p \cdot \theta) - \\
 - \frac{M_{ab}}{L_a} \cdot (U_a - i_a \cdot R + K_m \cdot \omega \cdot \sin(p \cdot \theta)); \\
 J \cdot \frac{d\omega}{dt} = - \left( \frac{E_{ga} \cdot i_a}{\omega} + \frac{E_{gb} \cdot i_b}{\omega} \right) + i_a \cdot i_b \cdot \frac{dM_{ab}}{d\theta} - B \cdot \omega - M_c; \\
 \frac{d\theta}{dt} = \omega.
 \end{cases} \quad (1)$$

Таблица 1.

Параметр	Значение
Индуктивность фазы обмотки статора	2,4 мГн
Активное сопротивление фазы обмотки статора	0,9 Ом
Постоянная двигателя	0,4 $\frac{Н \cdot м}{А}$
Число пар полюсов ротора	50
Момент инерции ротора	$28 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коэффициент вязкого трения подшипников	$5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$
Угол шага	1,8 град (200 шагов на оборот) .

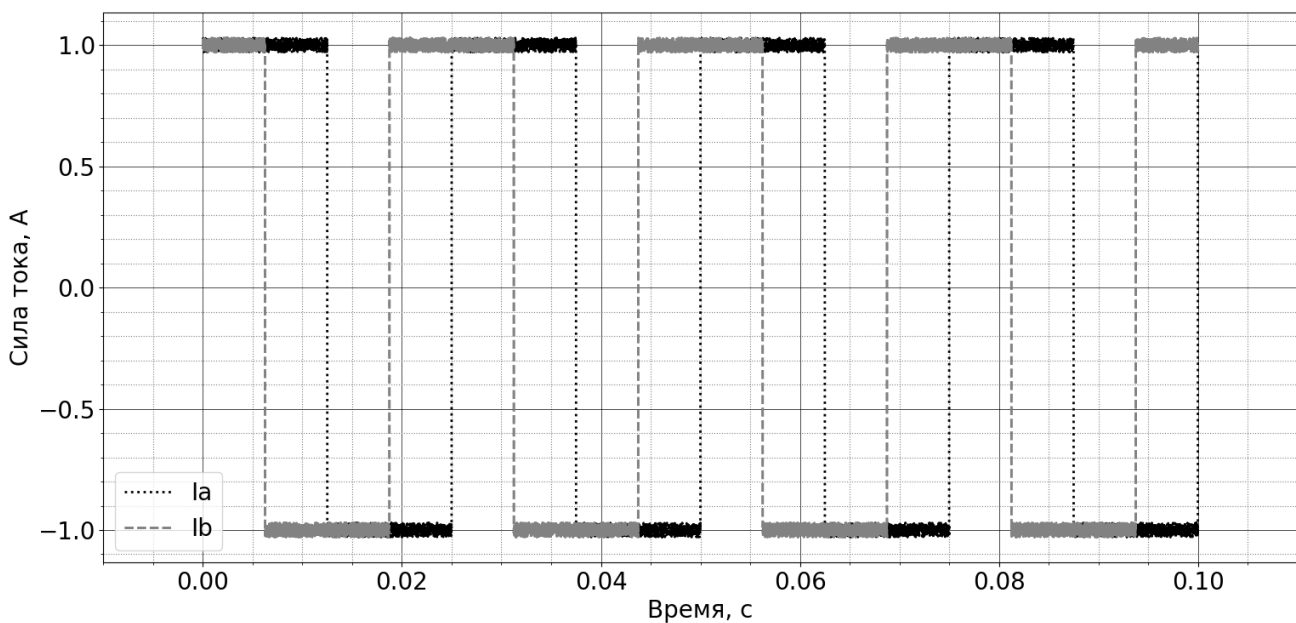


Рис. 2. Сила тока в обмотках шагового двигателя при частоте шага 160 Гц

где  $L$  — индуктивность фазы обмотки статора;  $i_a$  и  $i_b$  — сила тока в обмотке А и В соответственно;  $U_a$  и  $U_b$  — напряжение в обмотке А и В соответственно;  $R$  — активное сопротивление фазы обмотки статора;  $K_m$  — постоянная двигателя;  $\omega$  — угловая скорость вращения вала;  $\theta$  — угловое положение вала;  $p$  — число полюсов ротора;  $J$  — момент инерции ротора;  $B$  — коэффициент вязкого трения подшипников;  $E_{ga}$  и  $E_{gb}$  — противо-ЭДС фаз А и В соответственно;  $M_c$  — момент сопротивления на валу;  $M_{ab}$  — коэффициент взаимной индуктивности фаз статора [3].

На основании четырех координат (сила тока и противо-ЭДС обеих фаз), посредством применения электрических уравнений математической модели, получим соответствующие способы определения углового положения вала.

Примем следующую систему координат: по оси X откладывается сила тока фазы А, по оси Y — сила тока фазы В (рисунок 1).

В качестве переменной вектор тока рассмотрим тот, который определяется посредством следующей формулы:

$$\vec{i} = i_a \cdot \vec{i} + i_b \cdot \vec{j}$$

Величины  $i_a$  и  $i_b$  — скалярные значения силы тока фаз А и В.

На рисунке 2 проиллюстрирована полученная экспериментальным методом, зависимость силы тока в фазах А и В шагового двигателя от времени, при работе в полношаговом режиме.

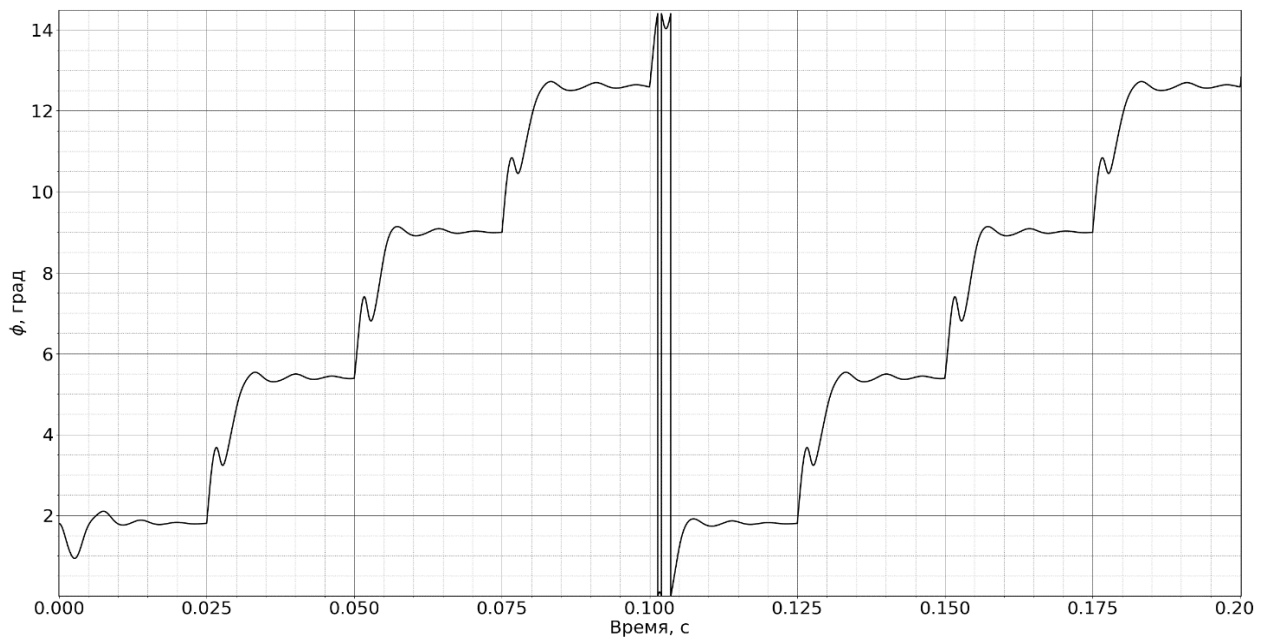


Рис. 3. Временная характеристика угла наклона  $\phi$  вектора тока  $\vec{I}$  ШД при вращении в условно положительном направлении.

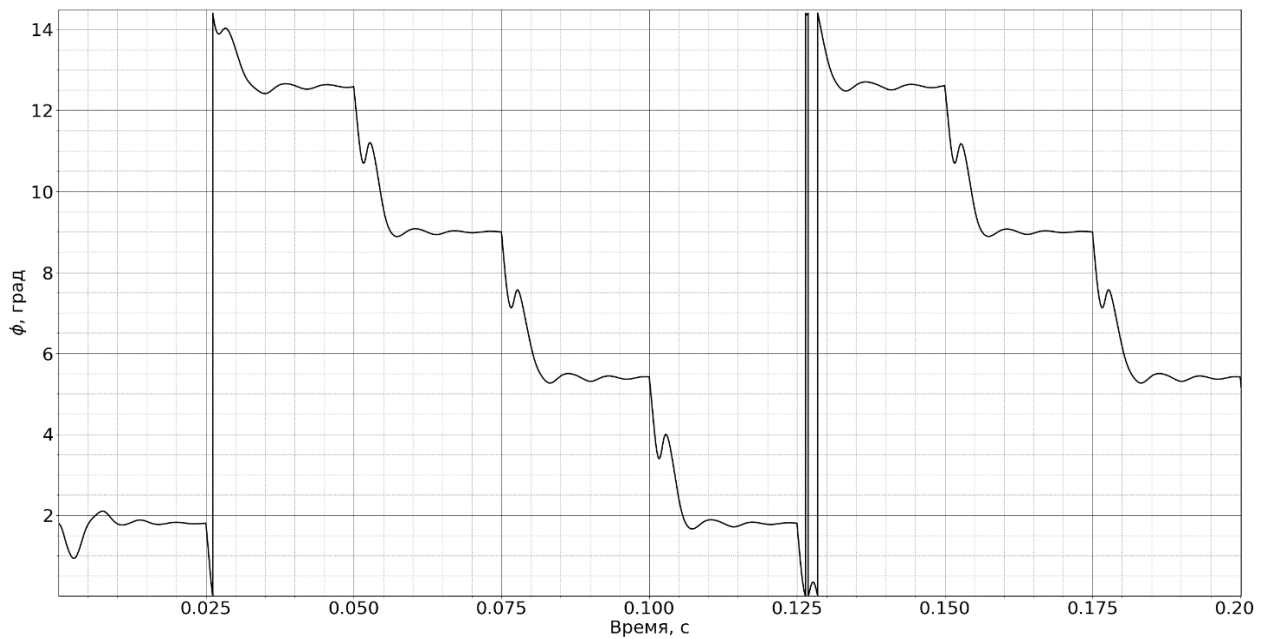


Рис. 4. Временная характеристика угла наклона  $\phi$  вектора тока  $\vec{I}$  ШД при вращении в условно отрицательном направлении.

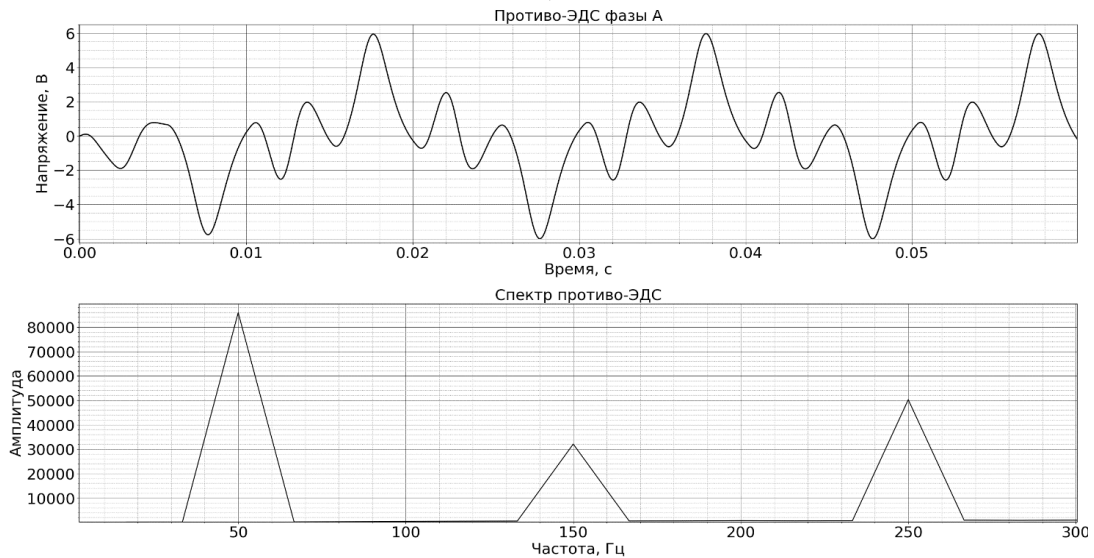


Рис. 5. Сигнал противо-ЭДС фазы А при частоте шагов 200 Гц и его спектр

Объект исследования — гибридный шаговый двигатель 57HS5630B4.

Динамика изменения угла наклона  $\phi$  вектора тока  $\vec{I}$  к осям X и Y позволяет оценить корректность работы двигателя. Длина вектора равняется номинально заданному значению силы тока, если силы тока фаз изменяются в пределах от положительного до отрицательного номинального значения.

Угол наклона  $\phi$  вектора тока к оси X будет изменяться при каждом шаге на 1.8 градуса (соответствует углу шага ШД), начиная, согласно формуле определения данного угла именно с 1.8 градусов:

$$\phi = \frac{1}{p_2} \cdot \arctg\left(\frac{i_b}{i_a}\right)$$

Величина  $p_2 = p / 2$  — число пар полюсов ротора. Данный показатель обуславливается тем, что закон изменения силы тока каждой фазы соответствует прямоугольным импульсам, которые сдвинуты друг относительно друга на 90 градусов.

По угловым значениям вектора тока  $\vec{I}$  можно отслеживать последовательность сделанных шагов и их очередность. Так, при вращении двигателя в положительную сторону, угол наклона  $\phi$  вектора тока будет изменяться от 1.8 до 7.2 градусов. Если угол изменяется от большего к меньшему, то вал двигателя вращается в отрицательном положении.

Результат моделирования работы шагового двигателя согласно математической модели (1) посредством метода решения дифференциальных уравнений Рун-

ге-Кутты 4-го порядка [4] при частоте шагов 40 Гц, представлен на рисунке 3. Моделирование проводилось на языке программирования Python.

Согласно рисунку 3, угол наклона вектора тока при повороте вала двигателя на один шаг изменяется по следующим углам: 1.8, 3.6, 5.4 и 7.2 градусов. При моделировании с теми же условиями, но при вращении вала двигателя в противоположную сторону, угол наклона вектора тока при повороте вала двигателя на один шаг изменяется от большего к меньшему, с шагом 1.8 градуса. Это позволяет оценить работоспособность, как самого двигателя, так и драйвера, который коммутирует обмотки двигателя в нужной последовательности.

Второй электрической величиной, по которой фиксировался пропуск шагов, выступает противо-ЭДС фаз [5]. Значение противо-ЭДС определялось посредством спектра напряжения в обмотках фаз. Сигнал противо-ЭДС, полученный при моделировании работы шагового двигателя, был подвергнут быстрому преобразованию Фурье (БПФ). Стоит отметить, что моделирование работы двигателя было выполнено при частоте шагов 200 Гц (рисунок 5).

Из уточненной математической модели ШД (1), противо-ЭДС фаз выражается следующим образом:

$$E_{ga} = -K_m \cdot \omega \cdot \sin(p \cdot \theta) + k \cdot K_m \cdot \omega \cdot \cos(p \cdot \theta),$$

$$E_{gb} = K_m \cdot \omega \cdot \cos(p \cdot \theta) + k \cdot K_m \cdot \omega \cdot \sin(p \cdot \theta),$$

где  $k = \frac{M_{ab}}{L}$ .

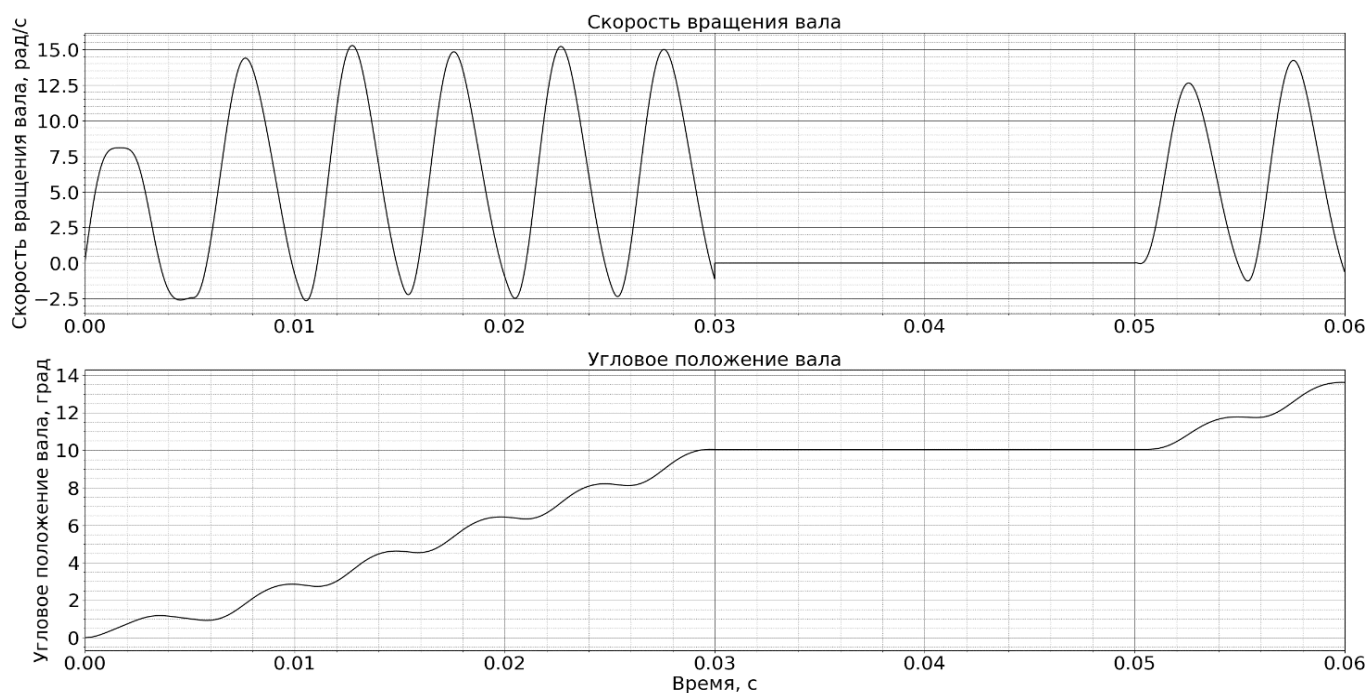


Рис. 6. Временная зависимость скорости и углового положения при работе ШД в режиме стопорения вала в течение 4-х шагов.

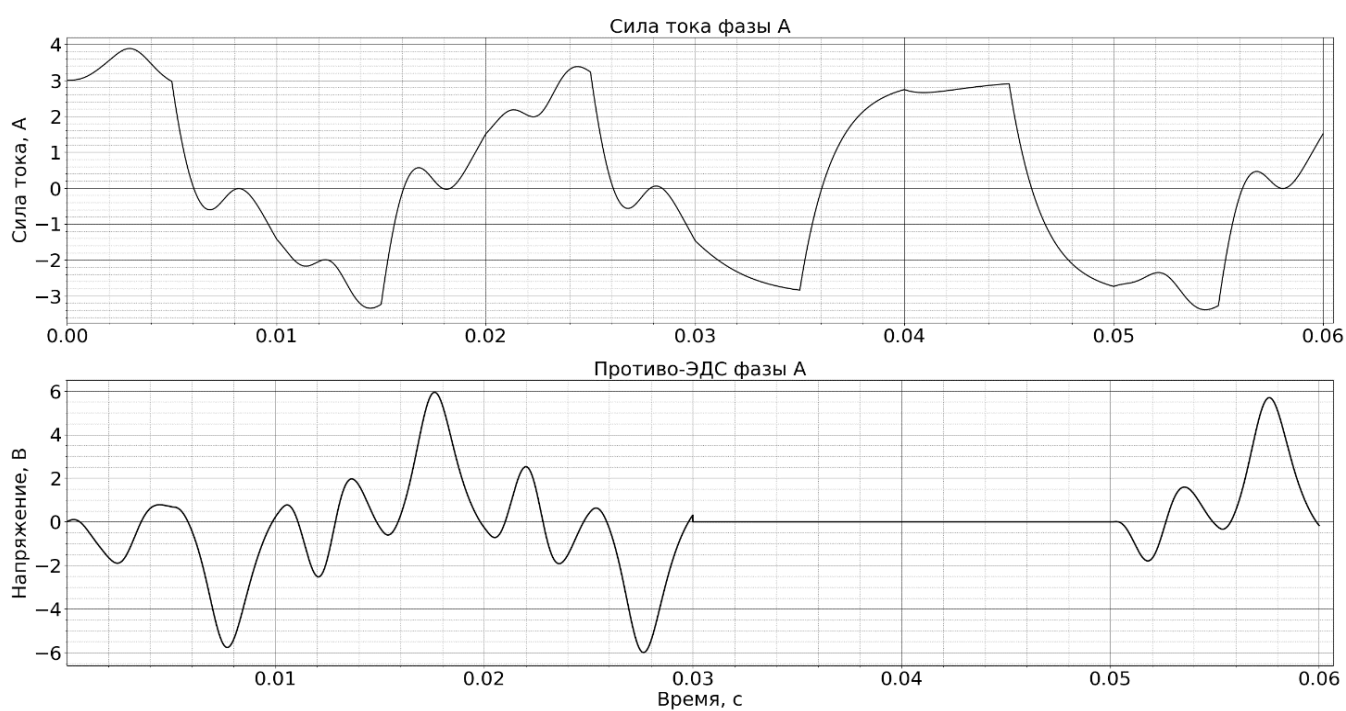


Рис. 7. Сила тока и противо-ЭДС фазы А при пропуске шагов

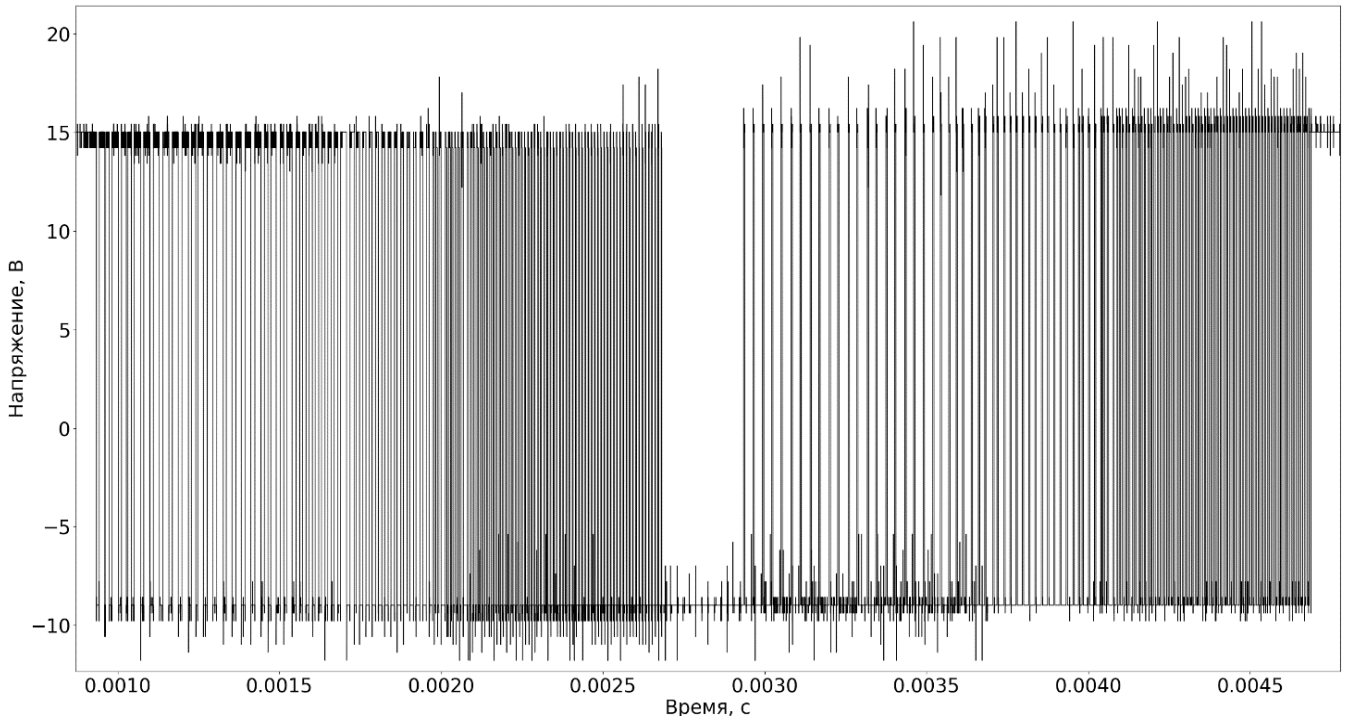


Рис. 8. Временная зависимость напряжения в фазе А ШД при частоте шагов 1000 Гц

При моделировании индуктивности обмоток фаз равными друг другу были приняты  $L = L_a = L_b = 2,4$  мГн. При этом значение взаимной индуктивности было принято равным  $M_{ab} = 0,24$  мГн.

Как видно из рисунка 5, частота основной гармоники противо-ЭДС равна 50 Гц, что в 4 раза меньше частоты управляющих импульсов. Зависимость между частотой противо-ЭДС и частотой управляющих импульсов выражается следующим соотношением [2, 3]:

$$f_{emf} = f_0 \cdot \frac{p}{N},$$

где  $f_{emf}$  — частота противо-ЭДС,  $f_0$  — частота управляющих импульсов и  $N$  — число шагов на полный оборот вала. Следовательно, получаем следующее:

$$f_{emf} = \frac{f_0}{4}. \tag{2}$$

Так же в рассматриваемом спектре присутствуют 3-я и 5-я гармоники. Определив максимальную гармонику в спектре, возможно вычислить угловую скорость вращения вала  $\omega$ . Взаимосвязь между основной (максимальной) гармоникой противо-ЭДС и угловой скоростью вращения вала двигателя выражается следующим соотношением:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{p} \cdot f_{max}$$

где  $f_{max}$  — максимальная частота в спектре противо-ЭДС.

При стопорении вала или пропуске шагов, противо-ЭДС не вырабатывается. Следовательно, низкочастотных составляющих в спектре напряжения в обмотках не будет. Таким образом, из спектра напряжения в обмотках двигателя можно извлечь гармоники, которые соответствуют сигналу противо-ЭДС. Это позволяет отслеживать моменты вращения двигателя, определять угловую скорость (в т.ч. и угловое положение вала двигателя), а также выявлять моменты остановки двигателя или пропуска шагов.

Для оценки предложенных способов определения углового положения вала ШД при пропуске шага было проведено математическое моделирование. В рамках данного моделирования, вал ШД был застопорен кратковременным увеличением момента сопротивления на длительность, равную длительности четырех шагов. На частоте шага, равной 200 Гц, эта длительность составила 5 мс для одного шага или 20 мс для 4 шагов. Временная зависимость скорости и углового положения при работе ШД, в описанном ранее режиме проиллюстрирована на рисунке 6.

Согласно представленному выше рисунку, можно сказать, что наблюдается момент стопорения вала по его скорости и угловому положению. Скорость, в мо-

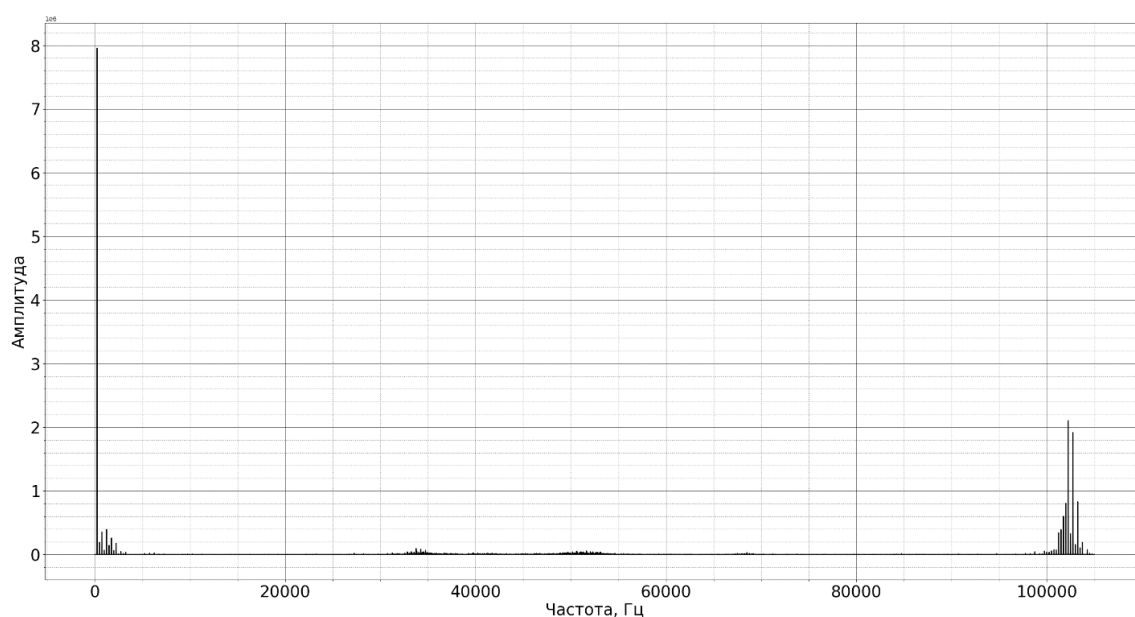


Рис. 9. Спектр напряжения в фазе А при частоте шагов 1000 Гц

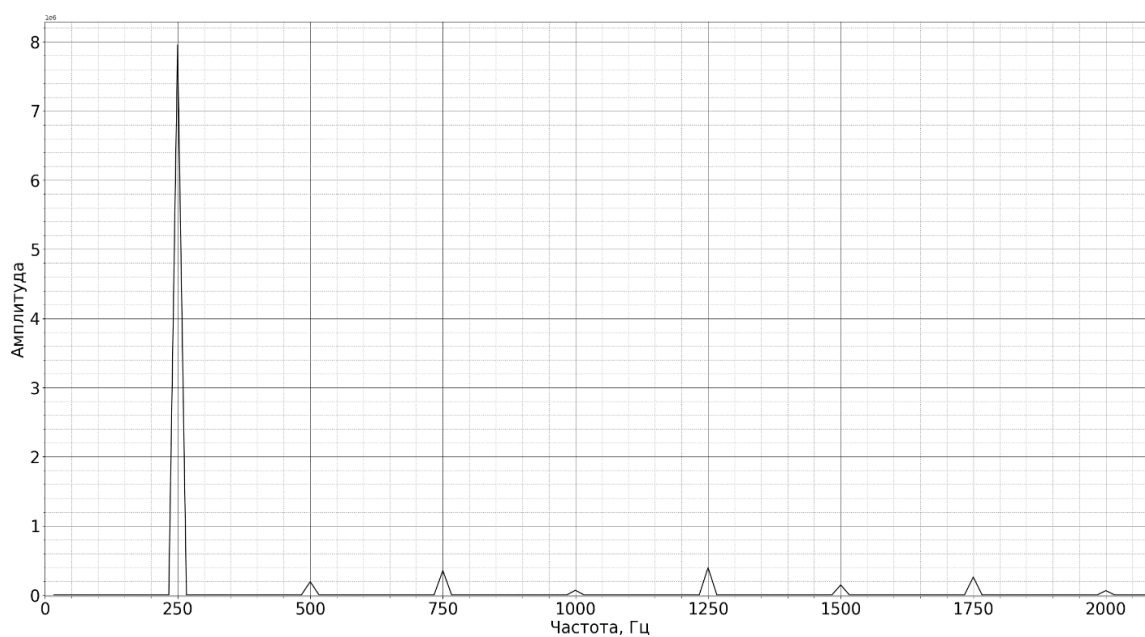


Рис. 10. Спектр напряжения в фазе А при частоте шагов 1000 Гц

мент стопорения равна 0 рад/с, а угловое положение остается неизменным.

В рамках проведения проверки наличия в спектре напряжения сигнала противо-ЭДС при пропуске шагов было проведено моделирование работы шагового двигателя с частотой шагов 200 Гц. На рисунке 7 проиллюстрирована сила тока и противо-ЭДС фазы А.

Согласно выше представленному рисунку видно, что интервал пропуска шагов наступил в диапазоне 0,03–0,05 секунды (стопорение вала). И в указанном интервале времени противо-ЭДС отсутствует. Очевидно, что в этом интервале времени, БПФ сигнала напряжения в обмотке не даст в спектре тех гармоник, которые соответствуют частотам противо-ЭДС. Данный признак представляется возможным использовать с целью уста-



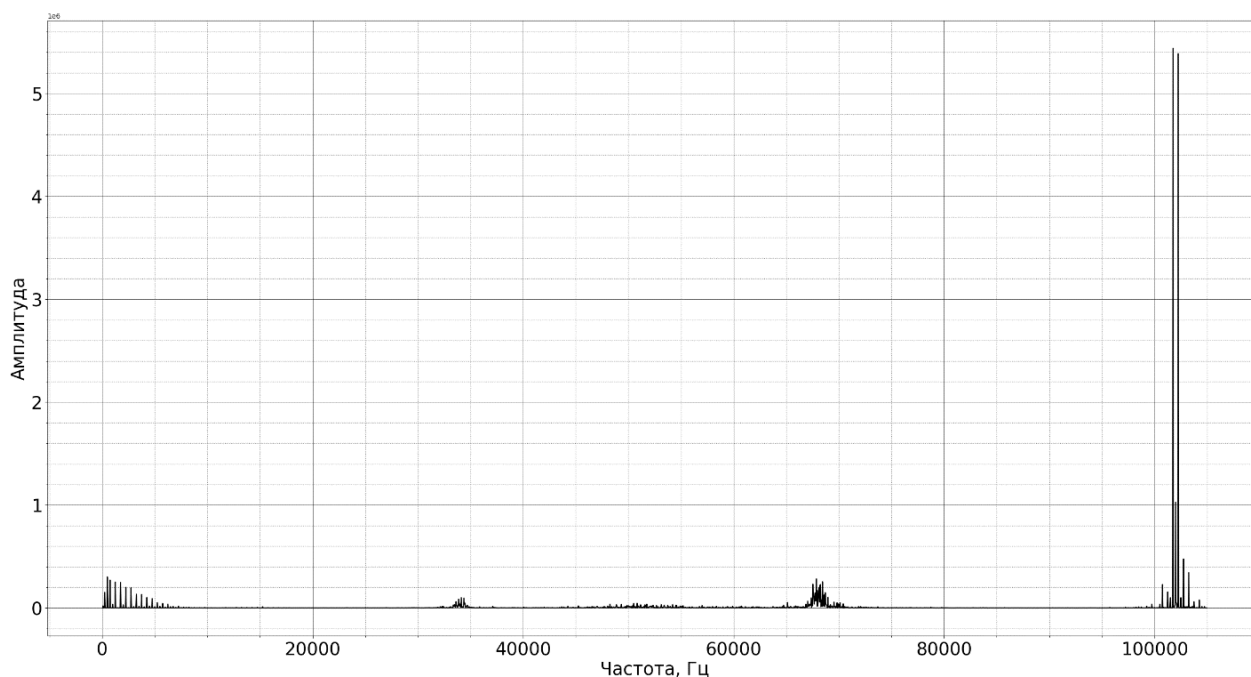


Рис. 11. Спектр напряжения в фазе А при частоте шагов 1000 Гц при пропуске шагов

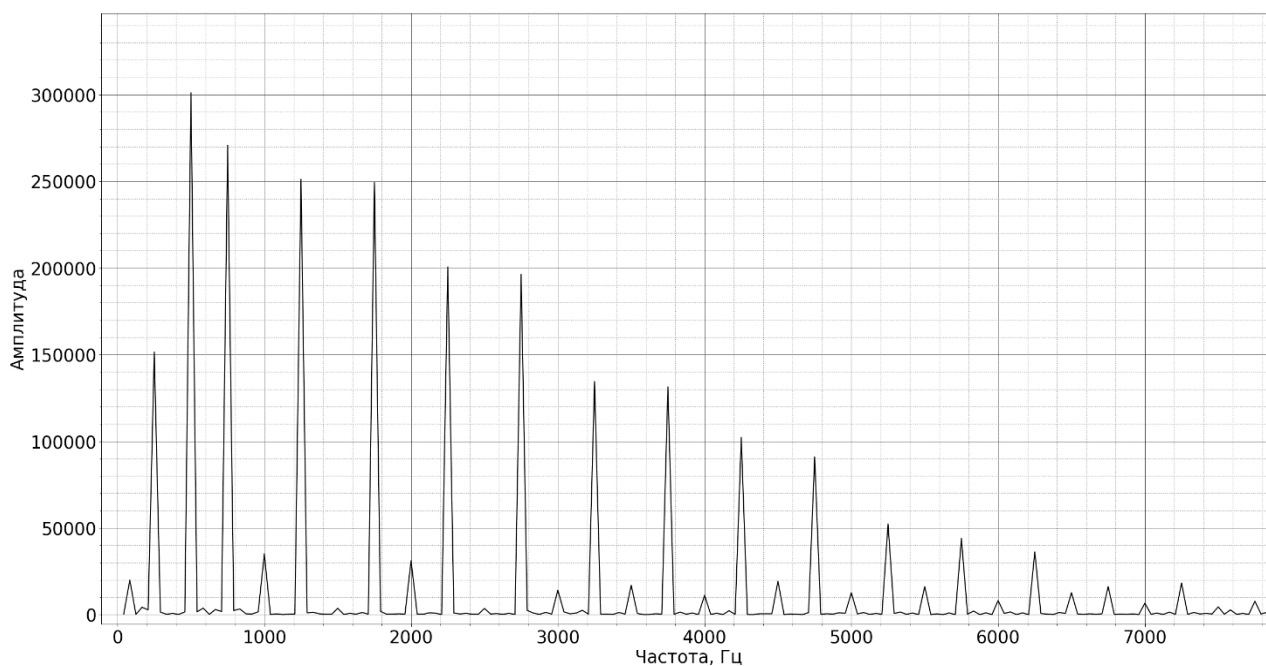


Рис. 12. Спектр напряжения в фазе А при частоте шагов 1000 Гц при пропуске шагов

новления пропуска шагов двигателя. Также согласно рассматриваемому графику, можно отметить, что при пропуске шага, сила тока не подвергается сильному искажению, поскольку противо-ЭДС перестает оказывать соответствующее влияние на форму силы тока.

Стоит отметить, что экспериментально была снята временная зависимость напряжения в обмотке шагового двигателя 57HS5630B4 при следующих режимах работы: нормальное функционирование двигателя, режим пропуска шагов, измерение при остановленном

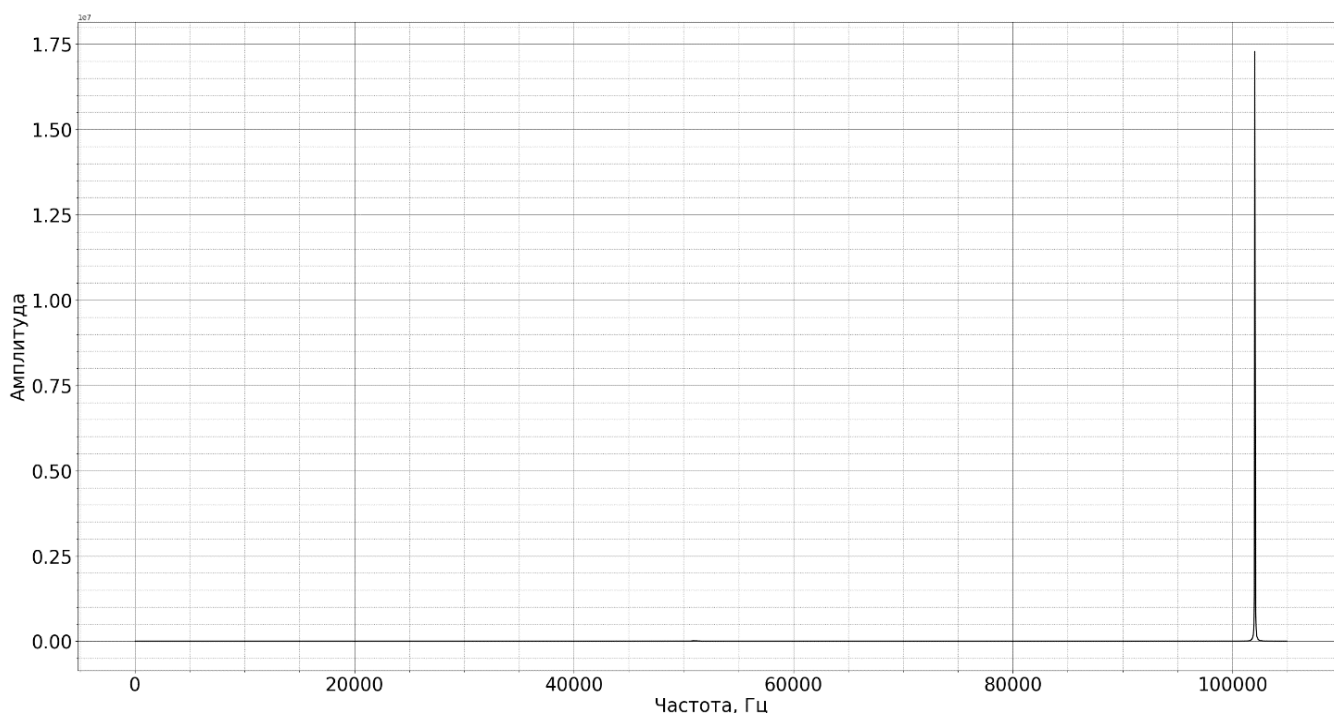


Рис. 13. Спектр напряжения в фазе А при стопорении ротора ШД

двигателе. На рисунке 8 представлен график напряжения в фазе А при частоте шагов 1000 Гц.

Напряжение представляет собой ШИМ-сигнал. Спектр этого напряжения проиллюстрирован на рисунке 9.

Согласно вышеуказанному рисунку, в спектре напряжения присутствуют гармоники несущей частоты ШИМ (102 кГц). Также в низкочастотной области (до 2 кГц) присутствуют гармоники противо-ЭДС.

Отдельно следует рассмотреть низкочастотную область спектра (рисунок 10).

Согласно рисунку 10, максимальную амплитуду имеет гармоника на частоте 250 Гц. Стоит отметить, что ее частота в 4 раза меньше частоты управляющих импульсов, что полностью согласуется с формулой (2).

Спектр напряжения в фазе А шагового двигателя при пропуске шагов представлен на рисунке 11.

В соответствии с вышеуказанным рисунком видно, что при пропуске шагов, гармоники в низкочастотной области спектра присутствуют, но их амплитуды значительно меньше, чем при нормальной работе двигателя. Эти гармоники соответствуют напряжению, которое возникает в обмотках при ШИМ-модуляции. При этом

частота изменения полярности указанного напряжения равна частоте генерируемой противо-ЭДС, но с амплитудой примерно в 250 раз меньше (для частоты шагов 1000 Гц). Отдельно следует рассмотреть низкочастотную область спектра (рисунок 12).

Согласно рисунку 12, следует отметить, что в данном случае, максимальная амплитуда гармоники при пропуске шагов соответствует частоте 500 Гц.

Рассмотрим напряжение в фазе А в режиме стопорения ротора ШД (рисунок 13).

В соответствии с рисунком 13, можно отметить, что при неподвижном роторе в спектре напряжений присутствует гармоника ШИМ-сигнала. Подчеркивается, что в низкочастотной области спектра гармоники отсутствуют.

Спектральный анализ напряжения в обмотках гибридного шагового двигателя позволяет оценить его работоспособность в проводимом эксперименте — нормальная работа двигателя, пропуск шагов и останов.

Следовательно, можно использовать значения вектора тока для уточнения соответствующей информации о величине тока, создаваемого драйвером, частоте импульсов в обмотках фаз, их наличия в обмотках,

наличия разницы в амплитудах импульсов на каждой из фаз. Введенный вектор тока позволяет оценить направление вращения вала. Подчеркивается, что спектр напряжения в обмотках можно использовать для определения угловой скорости вращения вала двигателя, а также его углового положения. Также спектр позволяет оценить работоспособность драйвера шагового двигателя по наличию частот, соответствующих широтно-импульсной модуляции.

## ВЫВОДЫ

1. Электрические параметры ШД позволяют оценить его механические параметры.
2. Сила тока в обмотках шагового двигателя позволяет оценить работоспособность драйвера двигателя.
3. Спектральный анализ напряжения в обмотках двигателя несет информацию о противо-ЭДС и ШИМ-сигнале драйвера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Т. Кенио. — М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
2. Математическая модель гибридного шагового двигателя / А.Е. Уляшев, А.Э. Старцев, П.С. Шичёв // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 3. С. 90–102.
3. Chirila, A. On the model of a Hybrid Stepper Motor / A. Chirila, I. Deaconu, V. Navrapescu, M. Albu. In: Proc IEEE international conference on industrial electronics, 2008. P. 496–501.
4. Бахвалов, Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — 6-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.
5. Уляшев, А.Е. Исследование гармонического состава обратной электродвижущей силы шагового двигателя / А.Е. Уляшев, А.Э. Старцев. — Материалы XXII международной молодежной научной конференции «Севергеоэотех-2021» (17–19 марта 2021 года) — Ухта: УГТУ, 2021, С. 66–70.

© Уляшев Артём Евгеньевич ( artem.ulyashev@gmail.com ), Старцев Андрей Эврикович ( astarcev@ugtu.net ).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Ухтинский государственный технический университет