

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314.5

DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-12-18

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ПРИНЦИПУ ВЫЯВЛЕНИЯ ПАЗОВЫХ ГАРМОНИК ТОКА

*А. В. Морозов*, старший преподаватель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. К. Барсуков*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Определение скорости вращения асинхронного двигателя путем косвенных измерений возможно за счет использования специальных алгоритмов-наблюдателей. Входными величинами наблюдателей являются, как правило, мгновенные значения токов и напряжений статора. При этом становится возможным исключение из состава электропривода датчика частоты вращения, что уменьшает его стоимость и увеличивает надежность.*

*Для реализации рассмотренных в статье методов косвенного определения скорости должны быть известны только основные конструктивные параметры машины – число пазов статора и ротора, число пар полюсов. Исследованы наблюдатели частоты вращения, использующие для работы эффект появления пазовых гармоник тока – высших гармоник, вызванных различием значений магнитной индукции в воздушном зазоре напротив пазов и зубцов ротора. Эта периодическая модуляция магнитного потока создает высшие гармоники ЭДС и тока статора, частота которых зависит от скорости вращения. Недостатком данного метода является то, что амплитуды пазовых гармоник уменьшаются при уменьшении скорости вращения. Вторым методом основан на выявлении пазовых гармоник тока статора при одновременном добавлении высокочастотного сигнала питающего напряжения. За счет этого образуются симметричные боковые пазовые гармоники слева и справа от ВЧ составляющей спектра.*

*Исследован амплитудно-частотный спектр тока статора при наличии высокочастотной составляющей питающего напряжения. Разработаны программы для наблюдения частоты вращения с помощью быстрого преобразования Фурье тока статора, использующие оба описанных метода. Приведены такие характеристики работы наблюдателей скорости вращения, как точность в статическом и динамическом режимах, полоса пропускания, помехоустойчивость.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, пазовые гармоники, преобразователь частоты, наблюдатели состояния, преобразование Фурье.

#### Введение

Системы автоматизированного электропривода с использованием асинхронных двигателей обычно содержат датчики частоты вращения. Это необходимо для замыкания обратной связи и обеспечения работы векторного управления. Наличие внешнего или встроенного энкодера приводит к удорожанию и снижению надежности. Определение скорости без датчика возможно путем реализации различных алгоритмов-наблюдателей, вычисляющих неизвестные величины по измеренным токам, напряжениям. Измеряющие наблюдатели составляют отдельный класс устройств, работа которых основана на использовании конструктивных особенностей двигателей [1, 2]. К примеру, при пересечении проводниками ротора силовых линий магнитного поля в асинхронном двигателе возникают высокочастотные составляющие тока – пазовые гармоники, частота которых зависит от скорости вращения вала. Существуют различные методики, позволяющие определять частоту вращения посредством спектрального анализа тока статора [3–7]. При

этом к питающему напряжению может добавляться высокочастотная составляющая небольшой амплитуды [8, 9]. Работа всех наблюдателей скорости вращения, использующих эффект пазовых гармоник, предполагает, что известны такие конструктивные параметры, как количество пазов статора  $S$ , ротора  $R$ , число пар полюсов обмотки статора  $p$ . С целью устранить из состава тягового асинхронного электропривода технологического электротроллера датчик положения ротора проведено исследование методов бессенсорного определения скорости вращения.

#### Основной раздел

Наличие на поверхности ротора пазов и зубцов приводит к модуляции магнитной индукции вдоль окружности воздушного зазора с частотой  $R$  периодов на  $2\pi$  рад [10]:

$$B(\theta, t) = B_0 \cos(\omega t - \theta) \left[ 1 + k \cos \frac{R}{p} (\omega_r t - \theta) \right],$$

где  $B_0$  – амплитуда первой гармоники;  $\omega_r$  – угловая скорость вала;  $\omega$  – частота питающего на-

пряжения;  $\theta$  – угол в неподвижной системе отсчета;  $k$  – отношение амплитуды паразитной составляющей, обусловленной наличием пазов ротора к амплитуде первой гармоники, зависит от конструкции машины.

Для того чтобы вычислить ЭДС, наводимую в обмотке каждой фазы статора, можно воспользоваться методикой нахождения амплитуд ЭДС от основной и высших гармоник магнитного потока [11] либо просуммировать ЭДС отдельных проводников [12]:

$$e_s = E_m \cos\left(\omega t - \varphi_0 + s \frac{\pi}{3}\right) + k \left(\frac{R}{p} \omega_r + \omega\right) \cos\left[\left(\frac{R}{p} \omega_r + \omega\right)t - \left(\frac{R}{p} + 1\right)\left(\psi + s \frac{\pi}{3}\right)\right] + k \left(\frac{R}{p} \omega_r - \omega\right) \cos\left[\left(\frac{R}{p} \omega_r - \omega\right)t - \left(\frac{R}{p} - 1\right)\left(\psi + s \frac{2\pi}{3}\right)\right], \quad (1)$$

где  $s = 0, 1, 2$ ;  $\varphi_0$  – сдвиг фаз между первыми гармониками магнитной индукции и ЭДС статора;  $E_m$  – амплитуда основной гармоники. Также есть пазовые гармоники прямой и обратной последовательности, амплитуды которых определяются коэффициентом  $k$  и линейно возрастают с увеличением частоты вращения ротора  $\omega_r$ . Начальные фазы гармоник зависят от угла  $\psi$ . Частоты составляющих прямой и обратной последовательности равны, соответственно, сумме разности частот пазовой гармоники  $R\omega_r/p$  и питающего напряжения  $\omega$ . Гармоники с этими же частотами присутствуют также в составе токов статора согласно уравнению [14]:

$$U^s = I^s r^s + \frac{d\Psi^s}{dt} \Rightarrow I^s = \frac{1}{r_1} \left( U^s - \frac{d\Psi^s}{dt} \right),$$

где  $U^s, I^s$  – векторы напряжения и тока статора,  $E(t) = \frac{d\Psi^s}{dt}$  вектор ЭДС статора. Определять скорость возможно при помощи выделения частотного спектра линейного тока, напряжения или тока нулевой последовательности статора.

При наличии высокочастотной инжекции физическое обоснование эффекта пазовых гармоник исходит из чисто геометрического анализа конструкции машины. Наличие чередующихся пазов и зубцов на статоре и роторе приводит к периодическому изменению магнитной проницаемости вдоль окружности воздушного зазора. Число периодов изменения магнитной проводимости равняется количеству зубцов статора  $S$  или ротора  $R$  соответственно. При протекании магнитного потока через зубцовые зоны возникает взаимное наложение неравномерно-

$$e_s = \sum_{n=1}^q l w q \frac{dB\left(2\pi\left(\frac{n}{S} + \frac{s}{6p}\right), t\right)}{dt},$$

где  $s = 0, 1, 2$  для трех фаз соответственно;  $n$  – номер паза статора;  $q$  – число секций в катушке каждого полюса;  $w$  – число витков в секции обмотки;  $l$  – длина активной части проводника статора.

Окончательное выражение для фазных ЭДС статора при питании его от идеального источника трехфазного напряжения [13]:

стей распределения магнитной проводимости статора и ротора друг на друга. Этот эффект проявляется в модуляции магнитной проводимости с частотой  $|R - S|$  периодов на  $2\pi$  рад. При этом в течение поворота вала на угол, точно равный угловому шагу зубцов ротора  $2\pi/R$ , пространственные неоднородности магнитной системы машины повернутся ровно на  $2\pi/|R - S|$ , то есть на один период. Вследствие этого возможно вывести соотношение между скоростью вращения магнитных неоднородностей  $\omega_a$  и скоростью вращения вала машины  $\omega_r$ :

$$\omega_a = \frac{R}{|R - S|} \omega_r.$$

Соотношение между числом пазов статора и ротора влияет на знак скорости вращения магнитных неоднородностей: при  $R > S$  они вращаются в ту же сторону, что и ротор, а при  $R < S$  – в противоположную.

Существующая модель асинхронного двигателя при питании от источника напряжения высокой частоты [15], значительно превышающей номинальную, связывает составляющие тока и напряжения высокой частоты через индуктивность рассеяния статора  $L_\sigma$ :

$$U^s = j\omega L_\sigma i^s.$$

Индуктивность рассеяния является функцией углового положения ротора:

$$L_\sigma = L + 2\Delta L_\sigma \cos(h\omega_r t),$$

где  $L$  – среднее значение индуктивности;  $2\Delta L_\sigma$  – амплитуда переменной составляющей, обусловленной периодической неравномерностью маг-

нитной проницаемости;  $\omega_r t = \theta_r$  – угловое положение ротора.

Коэффициент, связывающий частоту пазовой гармоники с угловой скоростью вала при его вращении:

$$h = \frac{2R}{R - S}. \quad (2)$$

С целью определения скорости осуществляется возбуждение двигателя трехфазным высокочастотным напряжением, которое накладывается на напряжение основной частоты:

$$U^s = U_m e^{j\omega_h t},$$

где  $\omega_h$  – угловая частота напряжения;  $U_m$  – амплитуда.

При этом появляется высокочастотная составляющая функции тока статора:

$$I^s = I_1 e^{j\omega_h t + \psi_1} + I_2 e^{j(-\omega_h t + h\theta_r)}, \quad (3)$$

где  $I_1, I_2$  – амплитуды компонент прямой и обратной последовательности. Частота компоненты обратной последовательности зависит от скорости вращения вала.

#### Анализ результатов

С использованием LabView и макета системы управления тяговым асинхронным двигателем унифицированной машины технологического электротранспорта, разработанной для акционерного общества «Сарапульский электрогенераторный завод», реализованы наблюдатели частоты вращения двигателя АДТ-6. Двигатель рассчитан на номинальное напряжение 48 В частотой 100 Гц и имеет  $p = 2$  пары полюсов,  $R = 34$  паза на роторе и  $S = 36$  на статоре. Линейные токи статора измеряются датчиком LF-510s и оцифровываются устройством NI 6009.

Для исследования возможностей метода с использованием высокочастотной инъекции к питающему напряжению добавлено трехфазное напряжение частотой  $f_h = 300$  Гц. Двигатель запускался в режиме фиксированной пониженной частоты питания с частотой широтно-импульсной модуляции  $f_0 = 3$  кГц. Годограф пространственного вектора основной гармоники тока статора при этом представляет собой окружность. При наличии искажений, вызванных содержанием третьей гармоники из-за влияния мертвой паузы при коммутации ключей, годограф имеет форму шестиугольника. Годограф высокочастотной составляющей также является окружностью меньшего диаметра. Поэтому после инъекции высокочастотной составляющей конец вектора тока

перемещается по спиралевидной траектории (рис. 1).

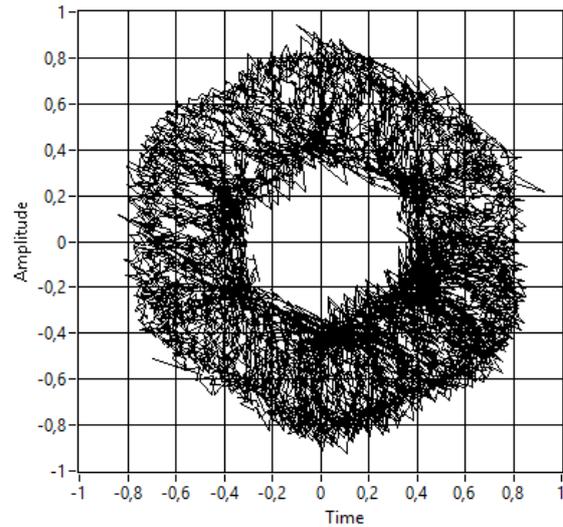


Рис. 1. Годограф тока статора

Амплитудно-частотный спектр тока содержит полезные гармоники, которые позволяют определить частоту вращения вала (рис. 2). К ним можно отнести основную гармонику 1 с первой и второй пазовыми гармониками 2, 3 высокочастотную составляющую 5 и боковые пазовые гармоники 4, 6. Пазовые гармоники 2, 3 и 4, 6 образуются в результате амплитудной модуляции синусоидальных составляющих основной частоты и высокочастотного сигнала соответственно. В опытах осуществлялось питание двигателя напряжением пониженной частоты менее 10 Гц. Частоты пазовых гармоник равны

$$f^* = f_1 + nhf_r = f_1 + 34nf_r, \quad (4)$$

$$f^*_h = f_h \pm hf_r = f_h \pm 34f_r, \quad (5)$$

где  $h = 34$ ;  $f_1$  – частота первой гармоники тока;  $f_r$  – частота вращения вала;  $n = 1, 2$  – номер пазовой гармоники основной частоты,  $f_h = 300$  Гц.

При изменении скорости вращения вала пазовые гармоники перемещаются вдоль оси частот. Замеры показали, что наибольшую амплитуду имеет вторая пазовая гармоника основной частоты тока. Высокочастотная составляющая тока имеет боковые пазовые гармоники, расположенные симметрично слева и справа относительно отметки  $f_h = 300$  Гц. Помимо полезных гармоник амплитудно-частотный спектр содержит также большое количество неинформативных составляющих значительной амплитуды, расположенных в окрестностях основной гармоники и высокочастотной составляющей тока. При увеличении скольжения происходит умень-

шение амплитуды второй пазовой гармоники основной частоты.

В LabView [16] реализована программа, которая содержит два алгоритма наблюдателей частоты

вращения вала двигателя, реализующих поиск ПГ низкой частоты и высокочастотной составляющей амплитудно-частотного спектра тока (рис. 3).

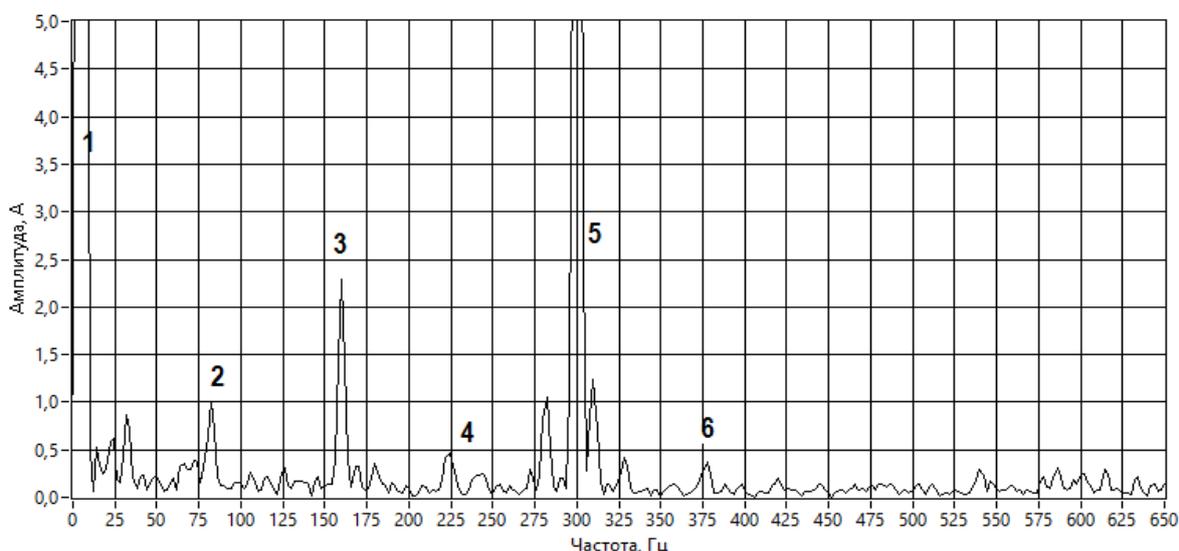


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр тока статора

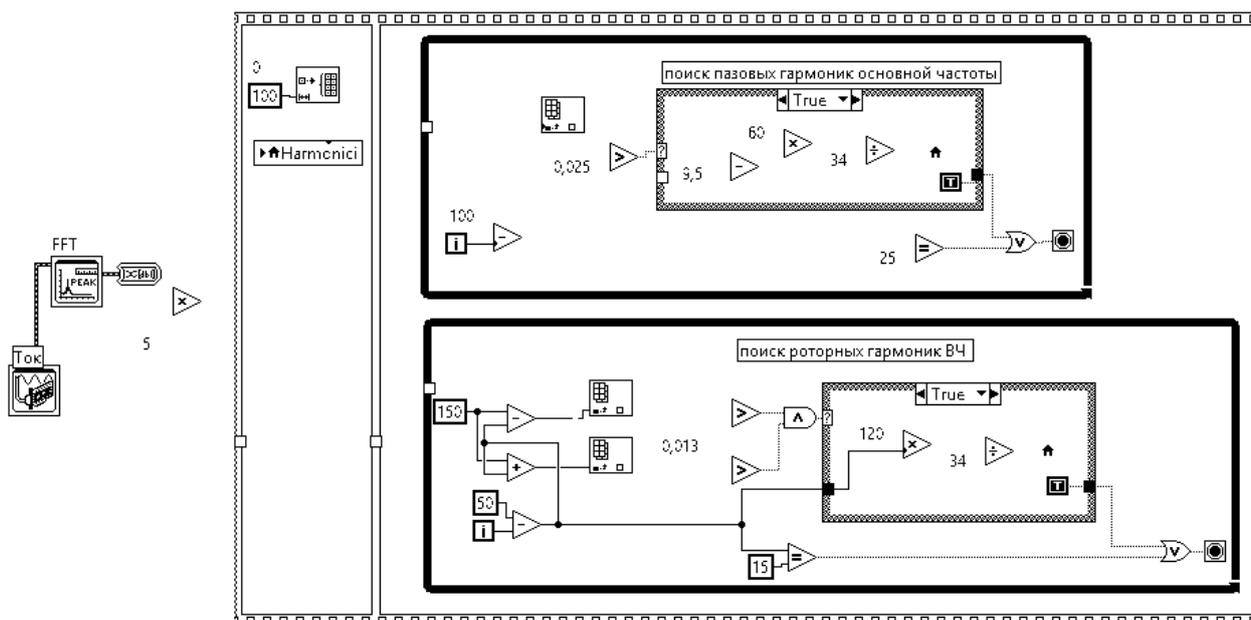


Рис. 3. Программа для вычисления скорости скольжения

Массив оцифрованных значений тока поступает на блок быстрого преобразования Фурье, результат которого представляет собой массив значений амплитуды, следующих друг за другом с шагом 2 Гц. Первый разработанный алгоритм реализует нахождение частоты  $f^*$  за счет поиска пазовой гармоники низкой частоты. Для этого массив поступает в верхний цикл, где происходит нахождение индекса элемента, значение которого превышает установленный порог 0,025. Предполагается, что искомым элемент

имеет индекс не более 100. Снизу диапазон поиска пазовой гармоники ограничен низкочастотной областью вблизи  $f_1$ , в которой находятся неинформативные составляющие спектра. Далее, по известной частоте питающего напряжения  $f_1$  и найденному индексу элемента вычисляется  $f^*$  и скорость  $f_r$ . Наблюдаемая величина  $f_r$  сверяется с фактической частотой вращения вала, определяемой при помощи абсолютного энкодера с разрешением 720 импульсов на оборот и вычисляется ошибка измерения в процентах.

Пример работы данного наблюдателя, показывает его работоспособность при питании двигателя напряжением фиксированной частоты  $f = 4,7$  Гц и изменении скольжения путем регулирования тормозящего момента на валу двигателя (рис. 4). Систематическая ошибка измерения вызвана неточностью задания основной частоты тока в наблюдателе.

Второй алгоритм наблюдения скорости реализует поиск боковых пазовых гармоник высокочастотной составляющей тока по принципу выделения амплитуд массива выше установленного порога, расположенных симметрично сле-

ва и справа относительно частоты  $f_h = 300$  Гц. Нижний цикл обрабатывает массив значений амплитуды (рис. 3). Осуществляется поиск элементов, с индексами  $150 + \Delta$  путем инкремента значения  $\Delta$  в заданном диапазоне. Частота пазовой гармоники равняется  $f = 2\Delta$ . Скорость вращения вычисляется и записывается в переменную  $R$ . Опытные данные также показывают функционирование алгоритма при питании двигателя напряжением частотой  $f = 4$  Гц и изменении скольжения нагрузочным устройством (рис. 5).

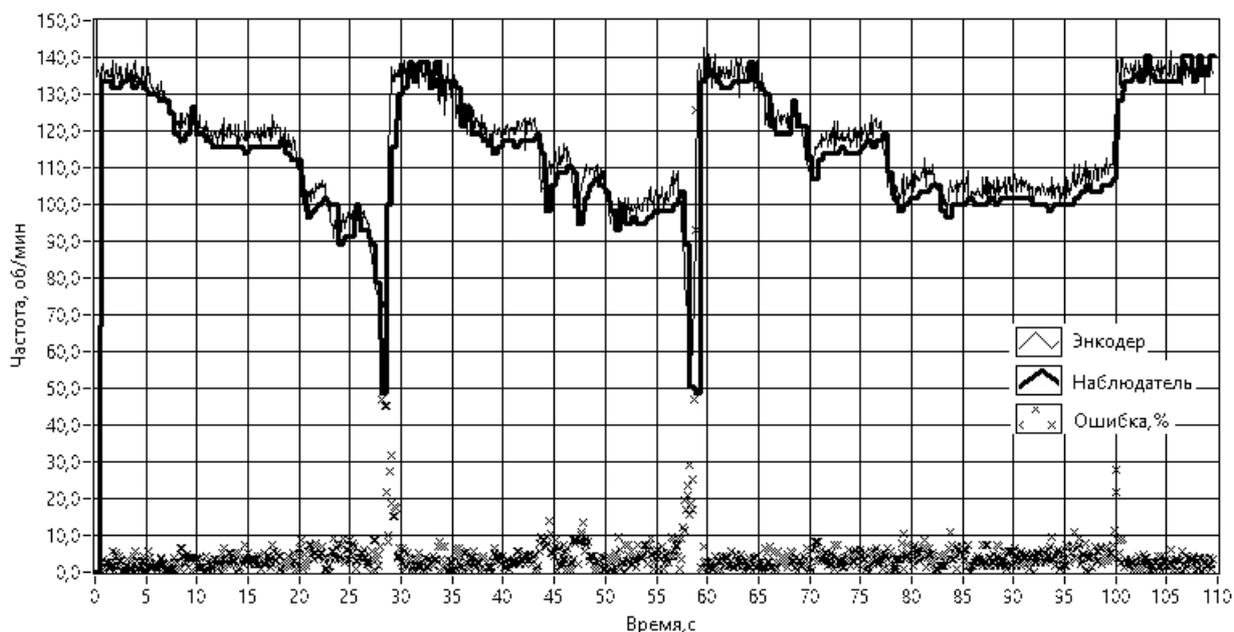


Рис. 4. Работа наблюдателя скорости вращения

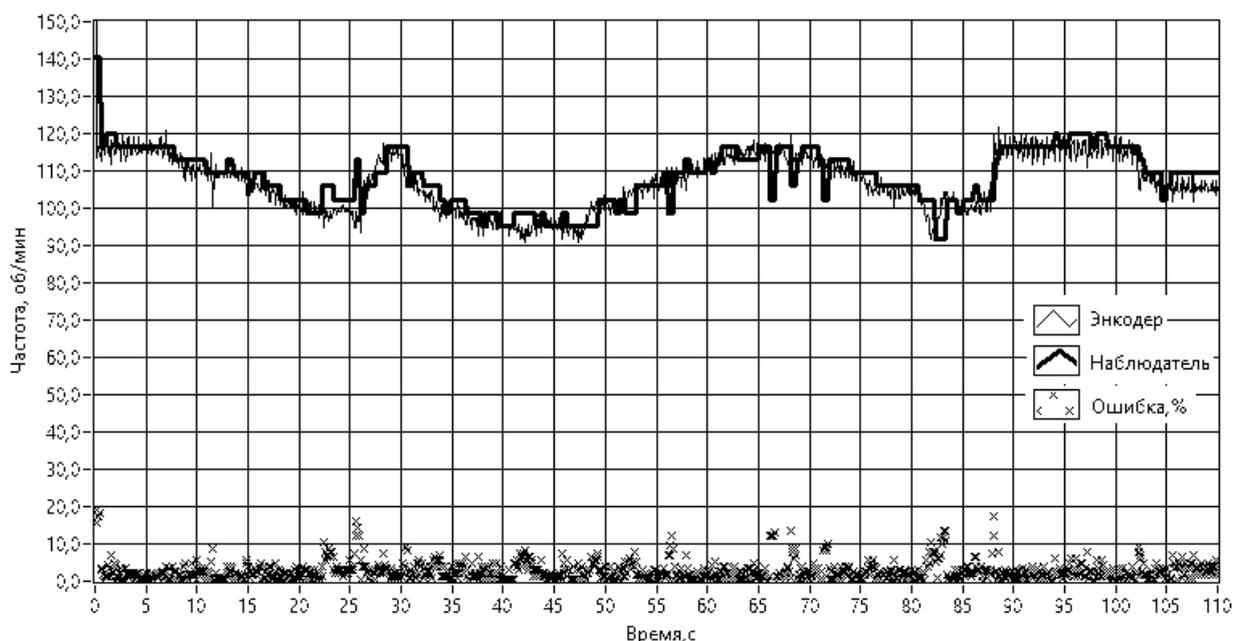


Рис. 5. Работа наблюдателя скорости вращения с применением высокочастотной инжекции

## Выводы

Разработаны две простые программы для косвенного измерения скорости асинхронного двигателя путем частотного анализа тока статора. Данный подход может применяться в широком диапазоне частот питающего напряжения, в том числе при около нулевых скоростях, что затруднительно для других алгоритмов наблюдателей. Программы определяют скорость на холостом ходу и под нагрузкой. Значения скорости на выходе наблюдателя в динамических режимах отстают от фактических в связи с запаздыванием, возникающим при оцифровке и нахождении спектра токов. Статическая ошибка не превышает 5...10 %, динамическая значительно выше. Полоса пропускания разработанных наблюдателей скорости составляет 2 Гц. Точность определения скорости напрямую зависит от разрешения спектра по частоте. Улучшение разрешения за счет увеличения числа отсчетов сигнала приводит к потере быстродействия и росту динамической ошибки. Таким образом, требуется оптимизация параметров преобразования Фурье для конкретных условий работы привода. Определение скоростей при больших скольжениях затруднено в связи с наложением пазовых гармоник на паразитные составляющие спектра.

## Библиографические ссылки

1. Калачев Ю. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М. : Записки исследователя, 2015. 80 с.
2. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств : дис. ... канд. техн. наук (05.09.03) / Анучин Алексей Сергеевич; НИУ «МЭИ». М., 2018. 445 с.
3. Чижма С. Н., Скляр А. В., Елизаров Д. А. Алгоритм выделения пазовых гармоник по спектру сигнала тока статора асинхронного двигателя // Омский научный вестник. 2016. № 4. С. 70–75.
4. Raute R. A Review of Sensorless Control in Induction Machines using HF Injection, Test Vectors and PWM harmonics / R. Raute, C. Caruana, C. Spiteri Staines // IEEE 2011 Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives.
5. Degner M. Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection / M. Degner, R. Lorenz // IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, p. 736-742.
6. Muneaki I. A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics [Текст] / I. Muneaki, K. Iwata // IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, p. 575-582.

7. Briz F. Rotor and flux position estimation in delta-connected AC machines using the zero-sequence carrier signal current / F. Briz, Degner, M // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, March/April 2006.

8. Raute R. A Review of Sensorless Control in Induction Machines using HF Injection, Test Vectors and PWM harmonics / R. Raute, C. Caruana, C. Spiteri Staines // IEEE 2011 Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives.

9. Degner M. Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection / M. Degner, R. Lorenz // IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, p. 736-742.

10. Muneaki I. A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics [Текст] / I. Muneaki, K. Iwata // IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, p. 575-582.

11. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов. СПб. : Питер, 2010. 350 с. : ил.

12. Muneaki I. A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics [Текст] / I. Muneaki, K. Iwata // IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, p. 575-582.

13. Ibid.

14. Калачев Ю. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М. : Записки исследователя, 2015. 80 с.

15. Degner M. Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection / M. Degner, R. Lorenz // IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, p. 736-742.

16. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования / пер. с англ. под ред П. Михеева. М. : ДМК Пресс, 2008. 400 с. : ил.

## References

1. Kalachev Y.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [Observers in a vector control]. Moscow, Research's notes, 2015, 80 p. (in Russ.).
2. Anuchin A. S. *Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv* [Development of digital systems for efficient control of sets of hybrid electric vehicles ]. PhD thesis. Moscow, 2018, 445p. (in Russ.).
3. Chizhma S.N. Sklyar A.V. [Algorithm for extracting slot harmonics by the signal spectrum of the stator current of an induction motor]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2016, no. 4, pp. 70-75 (in Russ.).
4. Raute R., Caruana C., Spiteri C. [A Review of Sensorless Control in Induction Machines using HF Injection, Test Vectors and PWM harmonics]. IEEE 2011 Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives.

5. Degner M., Lorenz R.. [Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection]. IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, pp. 736-742.
6. Muneaki I., Iwata K. [A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics]. IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, pp. 575-582.
7. Briz F., Degner M. [ Rotor and flux position estimation in delta-connected AC machines using the zero-sequence carrier signal current ]. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, March/April 2006.
8. Raute R., Caruana C., Spiteri C. [A Review of Sensorless Control in Induction Machines using HF Injection, Test Vectors and PWM harmonics]. IEEE 2011 Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives.
9. Degner M., Lorenz R.. [Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection]. IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, pp. 736-742.
10. Muneaki I., Iwata K. [A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics]. IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, pp. 575-582.
11. Voldek A. I. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka: Uchebnik dlya vuzov* [Electric machines. AC Machines: A textbook for high schools ]. SPb, Piter, 2010. 350 p. (in Russ.).
12. Muneaki I., Iwata K. [A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics]. IEEE transactions on industry applications, vol. ia-20, no. 3, may/june 1984, pp. 575-582.
13. Ibid.
14. Kalachev Y.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [Observers in a vector control]. Moscow, Research's notes, 2015, 80 p. (in Russ.).
15. Degner M., Lorenz R.. [Position Estimation in Induction Machines Utilizing Rotor Bar Slot Harmonics and Carrier-Frequency Signal Injection]. IEEE transactions on industry applications, vol. 36, no. 3, may/june 2000, pp. 736-742.
16. Blum, P. *LabVIEW: stil' programmirovaniya* [LabVIEW : programming style]. Moscow, DMK Press, 2008. 400 p. (in Russ.).

\* \* \*

#### **Observers of Rotation Frequency of an Asynchronous Motor on the Principle of Detecting Slot Current Harmonics**

*A. V. Morozov*, Senior Lecturer, Kalashnikov ISTU

*V. K. Barsukov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

*Definition of the asynchronous motor rotational speed by indirect measurements is possible by application of special observer algorithms. The input values of observers are, as a rule, the instant values of currents and stresses of the stator. It becomes possible here to exclude the speed encoder from the structure of the electric drive, thus reducing its cost and increasing its reliability.*

*In order to implement the methods of indirect speed definition considered in this paper, only main structural parameters of a machine should be known – the number of stator and rotor slots and the number of pairs of poles. Observers of rotational speed are investigated, that imply the effect of appearance of slot current harmonics in their operation – higher harmonics caused by the difference of values of the magnetic induction in the air gap in front of slots and rotor teeth. This periodic modulation of magnetic flux develops higher harmonics of electromotive force and stator current with their frequency depending on the rotational frequency. The drawback of this method is that amplitudes of slot harmonics are decreased at decreasing the rotational frequency. The second method is based on detecting the slot harmonics of the stator current at simultaneous addition of a high-frequency signal of the supply voltage. At this expense, symmetrical secondary slot harmonics are formed to the left and right of the high frequency spectrum component.*

*The amplitude frequency spectrum of the stator current is investigated at the presence of a high-frequency component of the supply voltage. Software is developed for observing the rotational frequency by fast Fourier transform of the stator current, the software applying two described methods. The paper presents such characteristics of operation of rotation frequency observers as the accuracy at static and dynamic modes, bandwidth and noise resistance.*

**Keywords:** asynchronous motor, slot harmonics, frequency converter, state observers, FFT.

Получено: 15.02.19