

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32F4

В. О. Квашнин, А. В. Бабаш, В. В. Квашнин

Донбасская государственная машиностроительная академия

Аннотация. Предложена методика косвенного определения момента двигателя на основе измерения зависимостей его угловой скорости, тока и напряжения обмотки фазы статора во времени с использованием микроконтроллера STM32F4. Косвенное определение момента проведено на примере момента трения двигателя на холостом ходу, как наиболее трудно определяемого. Полученные результаты были сопоставлены с аналогичными результатами другой предложенной графоаналитической методики.

Ключевые слова: угловая скорость, развиваемый момент, холостой ход, захват-сравнение, канал таймера, алгоритм, многоканальный режим, аналогово-цифровой преобразователь.

Введение

При разработке и построении систем управления современных частотных электроприводов с контролем развиваемого момента, необходимо знание динамических параметров асинхронного двигателя, которые позволяли бы косвенно определять его.

Динамические параметры, такие как угловое ускорение, динамический момент, момент инерции асинхронного электродвигателя, которые необходимы для построения математических моделей и проектирования асинхронных электроприводов, могут быть эффективно и достаточно точно определены при наличии точных средств измерений и методик обработки полученной информации, которые в каждом конкретном случае могут быть оригинальными и иметь свои особенности [1,2].

Имеющиеся в микроконтроллере STM32F4 быстродействующие высокопроизводительные средства измерения позволяют синхронизированное измерение сразу трех и более величин, в конкретном случае потребляемого двигателем тока статора $i(t)$, значения питающего напряжения $u_\phi(t)$ и соответствующих им текущих значений развиваемой скорости электродвигателя.

В работах [3,4] были показаны возможности измерения тока и напряжения с помощью L-Card, а также определение угловой скорости электродвигателя по методике [5] с использованием программно аппаратных средств микроконтроллера STM32F4. Для сбора данных использовалось специализированное разработанное программное

© Квашнин В. О., Бабаш А. В., Квашнин В. В.
2018

обеспечение.

Знание зависимости $\omega=f(t)$ позволяет в динамике косвенно определять динамический момент M_j как.

$$M_j = J_{\text{дв.}} \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $J_{\text{дв.}}$ – момент инерции асинхронного электродвигателя, $\Delta\omega$, Δt – соответствующее изменение скорости за определенный интервал времени Δt . И записать момент, развиваемый двигателем как.

$$M_{\text{дв.}} = M_j + M_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент собственных механических потерь на трение.

Но при работе системы электропривода в установившемся режиме под нагрузкой, для косвенного определения момента, развиваемого двигателем знание одной только зависимости $\omega=f(t)$, уже недостаточно. В этом случае для его определения необходимо также знание активной мощности на валу двигателя P_2 или хотя бы полезной активной мощности, потребляемой двигателем из сети P_1 .

Из известных расчетных соотношений [6] величину момента электродвигателя, пренебрегая потерями в стали, можно определить как.

$$M_{\text{дв.}} = \frac{P_2}{\omega_{\text{дв.}}} = \frac{P_1 - \Delta P}{\omega_{\text{дв.}}}, \quad (3)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая двигателем из сети, ΔP – потери мощности в двигателе, $\Delta P = \Delta P_{эл.} + \Delta P_{мех.} = I^2 \cdot (R_1 + \frac{R_2}{s}) + \omega_{об} \cdot M_{мп.}$,

Из литературы [7] известно, что произведение мгновенных значений тока и напряжения представляет собой мгновенную активную мощность, потребляемую из сети P_{li} .

$$P_i = 3 \cdot i_i \cdot u_i, \quad (4)$$

где i_i, u_i – мгновенные фазные значения тока и напряжения.

То есть, активную мощность, потребляемую двигателем из сети можно найти как (5)

$$P_1 = 3 \cdot \sum_{i=1}^N i_{1\phi_i} \cdot u_{1\phi_i} \cdot \frac{1}{N}, \quad (5)$$

где N – число элементов на выбранном интервале времени; $i_{1\phi_i}, u_{1\phi_i}$ – мгновенные фазные значения тока и напряжения статора соответственно.

Таким образом, большой интерес представляет возможность многоканального использования имеющегося микроконтроллера STM32F4 для синхронизированного во времени измерения физически различных параметров, таких как угловая скорость, фазный ток статора и напряжение обмотки статора асинхронного электродвигателя.

Поэтому целью настоящей работы являлось разработка методики косвенного определения момента, развиваемого асинхронным электродвигателем на основе осуществления синхронизированных измерений физически различных параметров асинхронного электродвигателя во времени с дальнейшим сбором и обработкой полученных данных. Для этого необходимо было решить ряд задач: 1) разработать методику настройки и использования встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для многоканального измерения тока и напряжения, синхронизированных с таймерным устройством захвата сигнала инкрементального датчика скорости во времени; 2) разработать методику обработки полученных данных; 3) разработать схему подключений используемого оборудования (датчика тока Allegro ACS712 20A, трансформатора напряжения 2D/H06/8/1-220/12V, скорости ПДФ-5); 4) разработка методики косвенного определения момента двигателя на основе полученных зависимостей $\omega(t)$, $i(t)$, $u(t)$ в результате измерения и обработки полученных

данных; 5) провести сопоставительную оценку полученных результатов.

Материалы исследований

Микроконтроллеры серии STM32 содержат в себе встроенные аналого-цифровые преобразователи. Их входы могут быть использованы для захвата аналогового сигнала, например с датчика тока с его последующей обработкой (преобразованием в цифровую форму) и выводом на экран монитора для отображения его текущего значения и соответственно контроля этого параметра.

Микроконтроллер STM32F4 включает в себя три АЦП. Разрядность всех АЦП составляет 12 бит. Каждый преобразователь способен принимать сигнал с шестнадцати внешних каналов. Диапазон входных напряжений составляет 1.8 ... 3.6 В.

Для передачи кодов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и количества тактов импульсов датчика скорости, соответствующие величине мгновенных значений угловой скорости из микроконтроллера на ПК используется преобразователь USB-UART (Universal asynchronous receiver transmitter).

При подключении к ПК и установке специальной программы (драйвера), преобразователь определяется операционной системой как последовательный коммуникационный порт COM. Таким образом, данные из микроконтроллера могут быть переданы через данный порт на компьютер для дальнейшего их сбора и обработки с помощью соответствующего разработанного программного обеспечения.

Схема подключения преобразователя USB-UART к выводам UART3 отладочной платы STM32F4discovery приведена на рис. 1.

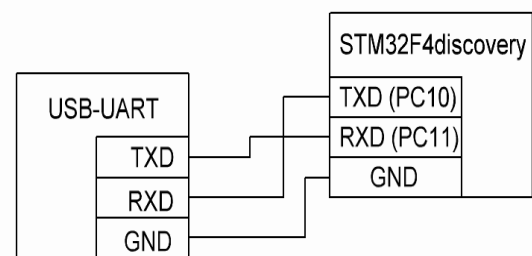


Рис. 1. Схема подключений USB-UART к микроконтроллеру

Для корректной работы встроенного АЦП, и соответственно получения адекватных результатов измерений необходимо проведение определенной последовательности действий и установка для его настройки. Поэтому был разработан

алгоритм необходимых действий, который представлен в виде блок-схемы (рис. 2) [8].

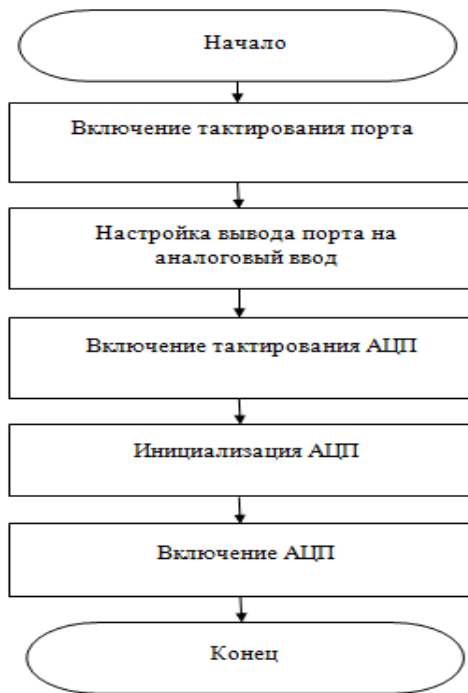


Рис. 2. Алгоритм настройки АЦП для проведения измерений

Для использования встроенного АЦП необходимо настроить выходы соответствующего порта (в данном случае используется порт PB, входы PB0 и PB1) так, чтобы он работал как аналоговый вход АЦП. В конкретном случае был использован АЦП ADC1, при этом были задействованы его каналы 8 и 9 соответственно. Данные каналы привязаны к выводам порта PB0 и PB1 согласно документации к STM32F4 (рис.3) [9].

PB0	TIM3_CH3/ TIM8_CH2N/ OTG_HS_ULPI_D1/ ETH_MII_RXD2/ TIM3_CH2N/ ADC12_IN8	35	-	-
PB1	TIM3_CH4/ TIM8_CH3N/ OTG_HS_ULPI_D2/ ETH_MII_RXD3/ OTG_HS_INTN/ TIM3_CH3/ ADC12_IN9	36	-	-

Рис. 3. Соответствие каналам АЦП выводов микроконтроллера STM32F4

При настройке выводов порта PB на вход необходимо программно выбрать режим аналогового входа. На рис. 4 приведен программный код процедуры настройки и инициализации входа-выхода порта для работы в режиме аналогового входа АЦП ADC1.

```

---
103 void adc_pin_init() {
104
105     GPIO_InitTypeDef gpio;
106
107     RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);
108     GPIO_StructInit(&gpio);
109     gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
110     gpio.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1;
111     GPIO_Init(GPIOB, &gpio);
112 }
---
  
```

Рис. 4. Фрагмент программного кода настройки выводов для использования в качестве входов АЦП

В данной подпрограмме сначала происходит включение порта при помощи команды `RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE)`. Затем устанавливается режим аналогового входа (`gpio.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN`), после чего реализуется применение структуры `gpio`.

После настройки порта выполняется настройка режима АЦП ADC1 для того, чтобы он мог производить измерения и конвертацию сигнала в цифровую форму.

На рис. 5 приведен фрагмент программного кода инициализации ADC1.

```

void adc_init() {
    ADC_InitTypeDef ADC_InitStructure;
    ADC_CommonInitTypeDef adc_init;
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE);
    ADC_DeInit();
    ADC_StructInit(&ADC_InitStructure);
    adc_init.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
    adc_init.ADC_Prescaler = ADC_Prescaler_Div2;
    ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
    ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = DISABLE;
    ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConvEdge_None;
    ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
    ADC_InitStructure.ADC_Resolution = ADC_Resolution_12b;
    ADC_CommonInit(&adc_init);
    ADC_Init(ADC1, &ADC_InitStructure);
}
  
```

Рис. 5. Фрагмент программного кода инициализации АЦП

Сначала на ADC1 подаются тактовые импульсы от шины APB2 (команда `RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE)`).

Команда `ADC_DeInit()` производит сброс всех настроек. Это делается для перестраховки при инициализации.

Далее выбирается независимый режим работы ADC1 (`ADC_Mode_Independent`). То есть работа ADC1 не зависит от других АЦП микроконтроллера.

Существуют инжектированные и регулярные каналы АЦП. Результат преобразований АЦП из регулярных каналов сохраняется в одном регистре.

Инжектированные каналы сохраняют результаты преобразований в отдельные регистры.

Для преобразования аналогового сигнала на входе АЦП разработана специальная функция

для считывания и конвертации аналогового сигнала в цифровую форму. При этом использовались регулярные каналы (рис.6).

```

u16 readADC1(u8 channel) {
    ADC_RegularChannelConfig(ADC1, channel, 1, ADC_SampleTime_3Cycles);
    ADC_SoftwareStartConv(ADC1);
    while (ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    return ADC_GetConversionValue(ADC1);
}

```

Рис. 6. Функция считывания и конвертации аналогового сигнала в цифровую форму

Команда `ADC_RegularChannelConfig(ADC1, channel, 1, ADC_SampleTime_3Cycles)` выполняет конфигурацию регулярных каналов АЦП. При конфигурации `ADC1`, выбирается его канал АЦП, который определяется переменной `channel` и настраивается время выборки.

От параметра `ADC_SampleTime` зависит точность выполняемых преобразований.

Функция `ADC_SoftwareStartConv(ADC1)` разрешает преобразования для `ADC1`.

В цикле `while (ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_EOC) == RESET)` ожидается окончание запущенного процесса конвертации величины аналогового сигнала в цифровую форму.

Строка `return ADC_GetConversionValue(ADC1)` возвращает текущее значение величины оцифрованного сигнала на входе.

Вызываемая из основной программы функция `readADC1()` осуществляет процесс преобразования аналогового сигнала на входе АЦП в цифровую форму.

Фрагмент программного кода, который выполняет конвертацию аналоговых сигналов, полученных из датчиков тока и напряжения в цифровую форму представлен на рис.7.

```

// Читаем данные из АЦП
arradc[inc] = readADC1(ADC_Channel_9);
arradc1[inc] = readADC1(ADC_Channel_8);

if(inc<20000) inc++;

```

Рис. 7. Преобразование аналоговых сигналов из датчиков тока и напряжения в цифровую форму

Данные в цифровом виде принимаются от микроконтроллера из трех каналов (угловая скорость, ток, напряжение) последовательно при помощи разработанного приложения (рис. 8).

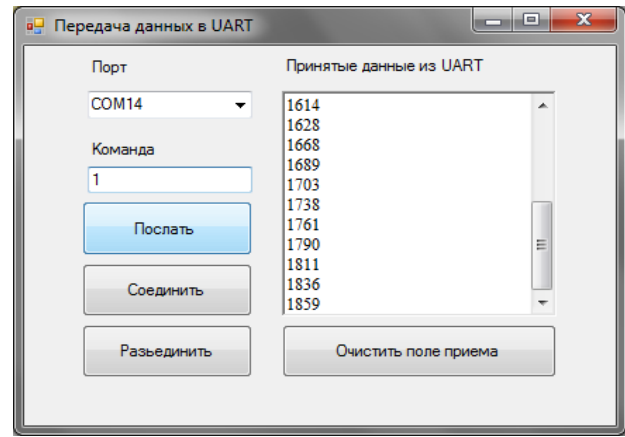


Рис. 8. Принятые данные в цифровом виде из микроконтроллера STM32F4

Дальнейшая обработка полученных массивов данных производится в пакете прикладных программ Microsoft Office Excel.

Для перехода от кодов АЦП, полученных из микроконтроллера к величине напряжения измеряемых аналоговых сигналов используется следующее расчетное соотношение [10].

$$ADC = \frac{U_{вх} \cdot 4095}{U_{max}}, \quad (6)$$

где, $U_{вх}$ – значение измеренного напряжения;

U_{max} – максимальное значение напряжения;

ADC – значение регистра АЦП (кода АЦП).

Для осуществления измерений была разработана схема подключений необходимых датчиков к асинхронному электродвигателю в экспериментальной установке, которая приведена на рис. 9.

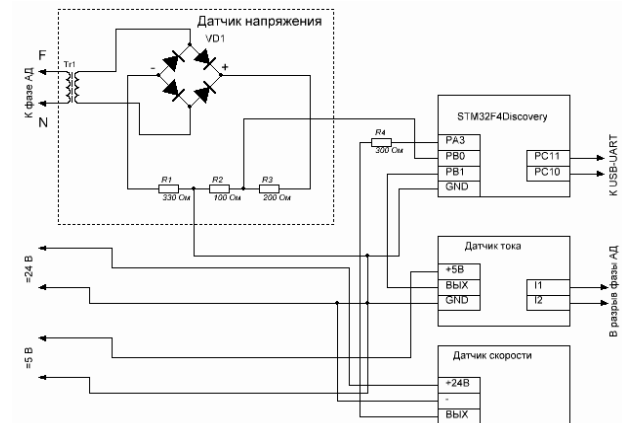


Рис. 9. Схема подключений экспериментальной установки

Экспериментальная установка включает в себя импульсный датчик скорости ПДФ-5 600 имп./об, датчика напряжения, для измерения и получения графика переходного процесса фазного напряжения асинхронного электродвигателя. Он выполнен в виде понижающего трансформатора.

тора малой мощности. Так как микроконтроллер STM32F4 имеет однополярное питание, на входы его портов можно подавать только положительное напряжения. Напряжение же отрицательной полярности может вывести его из строя. Поэтому используется выпрямитель в виде диодного моста VD1 типа КЦ405А. Так как на выходе трансформатора напряжение составляет около 12 В, а максимальное входное напряжение портов микроконтроллера составляет 3,3 В, поэтому для согласования уровня входного напряжения на выходе выпрямителя был установлен делитель напряжения в виде трех сопротивлений R1, R2, R3. Напряжение на сопротивлении R2 составляет 1,7 В и является допустимым для порта микроконтроллера.

В качестве датчика тока используется датчик на эффекте Холла ACS712. Его максимальный измеряемый ток составляет 20 А (градация изменения напряжения выходного сигнала в зависимости от протекающего через него тока составляет 100 мВ/А).

Для осуществления исследований был выбран асинхронный электродвигатель малой мощности АИР56А4У3, паспортные данные которого представлены в таблице 1 [11].

Таблица 1
Паспортные данные асинхронного электродвигателя АИР56А4У3

P_n , кВт	n_n , об/мин	I_n , А	η_n , %	$\cos\varphi_n$
0,12	1350	0,5	57	0,66
I_n/I_n	M_n/M_n	M_{max}/M_n	J, кг·м ²	m, кг
5	2,2	2,2	0,0007	3,6

В результате проведения эксперимента при пуске асинхронного электродвигателя и его работе на холостом ходу были получены исходные массивы данных мгновенных значений фазного тока и напряжения в виде кодов АЦП, угловой скорости в виде количества тактов импульсов. Эти массивы данных были переданы в Microsoft Excel для осуществления их дальнейшей обработки и анализа (рис.10).

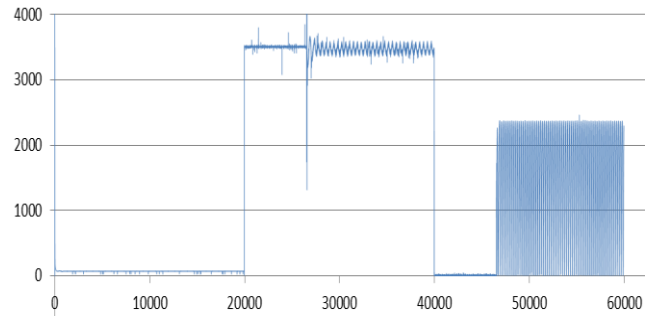


Рис. 10. Исходный массив данных для дальнейшей обработки в виде кодов АЦП (фазное напряжение и ток) и количества импульсов (угловая скорость)

Форма сигнала фазного напряжения имеет вид выпрямленного синусоидального сигнала, что не является допустимым для дальнейшей работы с ним.

Однако, как было сказано ранее, микроконтроллер STM32F4 имеет однополярное питание и потому не допускает подачу сигнала отрицательной полярности на его выводы портов.

Таким образом, необходима дополнительная математическая обработка полученных сигналов для их приведения в нужную форму.

Для перевода кодов АЦП в соответствующие уровни напряжения используется выражение (6).

Мгновенные значения фазного напряжения нужно привести к синусоидальному закону. Для этого был разработан специальный алгоритм инвертирования выпрямленного синусоидального сигнала для построения на его основе реального сигнала синусоиды напряжения. Необходимо инвертировать знак напряжения синусоидального сигнала через полупериод, т.е. получается чередование положительного и отрицательного сигналов. Таким образом на одном полупериоде сигнал положительный – на следующем – отрицательный. В итоге получается практический чистый и идеальный синусоидальный сигнал (рис. 11).

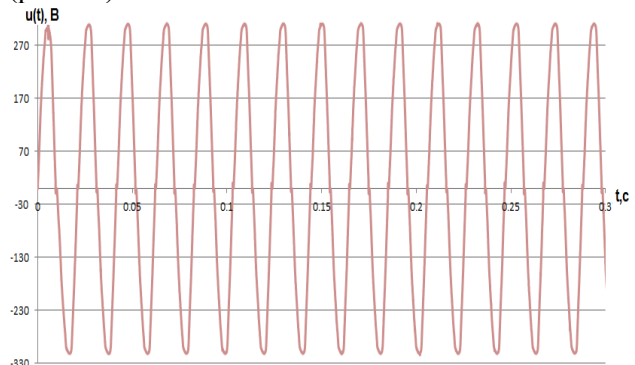


Рис. 11. Зависимость мгновенных значений фазного напряжения во времени после обработки

Алгоритм інвертирування значень випрямленого сигналу фазного напруги представлений на рис. 12.

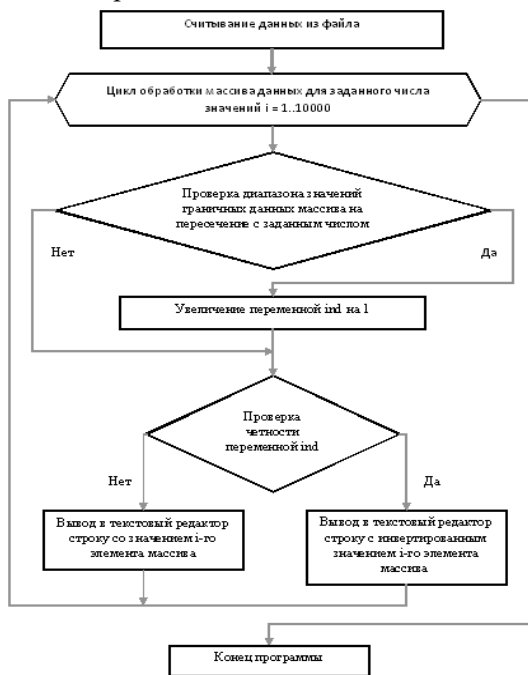


Рис. 12. Інвертирування значень масива даних випрямленого синусоїдального сигналу

Таким образом, проблема однополярного питания микроконтроллера при подключении датчика напряжения, который на выходе имеет также однополярный сигнал, несмотря на то, что самом деле мгновенное значение напряжения изменяется по синусоидальному закону, может быть решена на уровне алгоритма.

Результаты обработки данных в виде графиков переходных процессов угловой скорости $\omega(t)$, тока статора $i(t)$, мгновенной мощности $P(t)$, момента холостого хода $M(t)$, фазного напряжения $u(t)$ во времени приведены на рис. 13.

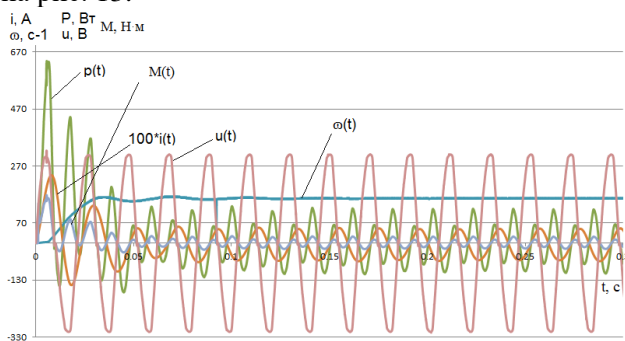


Рис. 13. Переходной процесс угловой скорости, тока, напряжения, мгновенной мощности во времени

Разработка методики косвенного определения момента, развиваемого электродвигателем, производилась на примере определения его момента трения на холостом ходе, как наиболее

трудно определяемого с точки зрения высокоточных измерений получаемых малых значений величин тока холостого хода, активной мощности, а также значения скорости холостого хода очень близкой к синхронной скорости двигателя.

Момент, развиваемый электродвигателем может быть определен путем обработки непосредственных измерений той же угловой скорости, потребляемого тока обмотки статора и подаваемого на статор напряжения питания.

В режиме холостого хода можно допустить, что потери на активном сопротивлении двигателя малы (3). И их можно принять равными нулю $\Delta P_{эл.} \approx 0$. Тогда

$$M_{об} = \frac{P_2}{\omega_{хх}} \approx \frac{P_1}{\omega_{хх}}. \quad (7)$$

Для определения P_1 были получены массивы данных $i_{1\phi}, u_{1\phi} = f(t)$ (рис. 13), из которых было отобрано по 2000 значений токов и соответствующих значений напряжений.

С использованием средств Microsoft Excel на интервале времени $\Delta t = 0,15 - 0,25$ с была рассчитана усредненная мощность холостого хода $P_{хх}$ приблизительно равная P_1 (5), усредненная угловая скорость холостого хода $\omega_{хх}$ и по ним был определен момент холостого хода $M_{хх}$ (7).

Для подтверждения достоверности полученного результата момент реального холостого хода асинхронного электродвигателя был определен предложенным графоаналитическим методом при помощи трассировки данных в пакете прикладных программ MathCad на линейном участке статической механической характеристики.

Рабочий участок статической механической характеристики является линейным. Он всегда может быть получен по двум точкам – идеальному холостому ходу и номинальной (рис. 14).

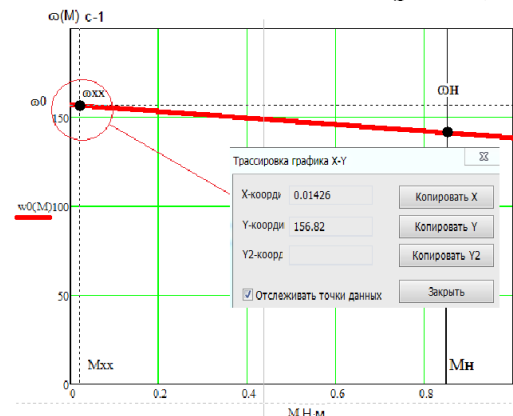


Рис. 14. Линейный участок статической механической характеристики асинхронного электродвигателя на интервале 0..Мн

Значения этих точек всегда могут быть рассчитаны по паспортным данным асинхронного электродвигателя.

Момент холостого хода на линейном участке механической характеристики может быть определен как

$$M_{xx} = \frac{\omega_0 - \omega_{xx}}{\omega_0 - \omega_n} \cdot M_n, \quad (8)$$

где ω_0 , ω_{xx} , ω_n – значения скоростей синхронной, реального холостого хода и номинальной при номинальной нагрузке M_n соответственно.

На основании выше изложенного, при подстановке номинальных значений момент холостого хода может быть определен из выражения (8).

Таким образом, значения момента холостого хода, определенные двумя разными путями практически совпадают, что подтверждает корректность методик косвенного определения момента путем непосредственного измерения и обработки значений тока напряжения и скорости, а также по измеренной скорости с использованием задаваемого по паспортным данным задаваемого рабочего участка статической механической характеристики. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Параметры, рассчитанные по экспериментальным данным и с использованием графоаналитического метода

Δt , с	P_{xx} , Вт	ω_{xx} , с ⁻¹	M_{xx} , Н·м
0,15–0,25	3,08088	156,8153	0,01473
0,15–0,25	–	156,8153	0,01426

Выводы

В результате исследований было выполнено следующее: 1) определено оборудование, на основе элементной базы микроконтроллера STM32F4, которое позволяет с программируемой наперед заданной точностью (на примере угловой скорости вращения, тока обмотки статора и напряжения обмотки статора) определять необходимые параметры исследуемого электропривода; 2) разработан алгоритм настройки аналогового цифрового преобразователя микроконтроллера STM32F4, для осуществления измерений аналоговых величин мгновенных значений тока обмотки статора асинхронного электродвигателя и его фазного напряжения; 3) разработан алгоритм программирования микроконтроллера STM32F4 и его настройки, направленный на ре-

шение задачи сбора и обработки информации, полученной из датчиков угловой скорости, тока и напряжения; 4) получено конкретное техническое решение на основе программируемого контроллера STM32F4; 5) разработана методика определения развиваемого момента асинхронного электродвигателя на основе непосредственных измерений и обработки массивов данных, полученных экспериментально от микроконтроллера STM32F4 по потребляемому току, напряжению питания и измеряемой скорости; 6) предложена методика определения момента по измеренной скорости с использованием уравнения статической механической характеристики на рабочем участке определенного по паспортным данным; 7) выполнен сопоставительный анализ полученных результатов вычисленного момента холостого хода, определенного по двум разными методикам, который показал практическое совпадение полученных результатов (ошибка не более 0,5 %); 8) схождение полученных результатов определения момента, измеренного на скорости холостого хода, близкой к синхронной (разность между ними составляет 0,2 %), показывает возможность выполнения высокой точности измерения скорости.

Таким образом, предложенная методика косвенного определения крутящего момента асинхронного электродвигателя с использованием вычислительных возможностей микроконтроллера STM32F4 позволяет с достаточно высокой точностью определять данный параметр. Она позволяет обойтись без дорогостоящих высокоточных датчиков момента.

Список использованной литературы

1. Chunbo, Gu., Zhongchu, Wang, Lin, Liu Research of direct torque control of asynchronous motor Advanced Materials Research [Text] Vols 986-987, 2014, pp. 1112-1116.
2. Chen, Di, HOU, Ruijuan, LI, Jie, TAO, Jiniu The research of improved Scheme for Asynchronous Motor Direct Torque Control [Text] Advanced Materials Research Vols. 466-467, 2012, pp. 819-823.
3. Квашнин, В. О. Разработка алгоритма и программы для получения динамической скоростной характеристики / В. О. Квашнин, А. В. Бабаш [Текст] Научный вестник ДГМА № 3 (21Е), 2016. – с. 165–175.
4. Квашнин, В. О., Методика определения динамических скоростной и токовой характеристик асинхронного электропривода / В.О. Квашнин, А.В. Бабаш [Текст] Электротехнические и компьютерные системы № 19 (95), 2015, с. 28–32.

5. Квашнин, В. О., Повышение точности измерения угловой скорости асинхронного электродвигателя с использованием программно-аппаратных средств микроконтроллера STM32F4 / В. О. Квашнин, А. В. Бабаш [Текст] Электротехнические и компьютерные системы № 25 (101), 2015, с. 91–98.

6. В. В. Кухарчук Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин (монографія) [Текст] / Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 1998 – 125 с.

7. Ильинский, Н. Ф., Козаченко, В. Ф. Общий курс электропривода [Текст]: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544с.: ил.

8. Квашнін В. О. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32F4Discovery: монографія / В. О. Квашнін, А. В. Бабаш, В. В. Квашнін. [Текст] – Краматорськ: ЦТPI “Друкарський дім”, 2017. – 143 с. ISBN 978-6177415-30-4.

9. DM00031020 Reference manual. [Electronic resource] – Available at: URL: http://www.st.com/st-webui/static/active/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf.

10. В. И. Бугаев, М. П. Мусиенко, Я. М. Крайных / Лабораторный практикум для изучения микроконтроллеров архитектуры ARM Cortex-M4 на базе оценочного модуля STM32F4Discovery [Текст] - Москва -Николаев: МФТИ.-ЧГУ, 2013. -71 с.

11. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская [Текст] – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 380 с.

References

1. Chunbo, Gu., Zhongchu, Wang, Lin, Liu (2014) Research of direct torque control of asynchronous motor *Advanced Materials Research Vols* 986–987, pp. 1112-1116 (in English)

2. Chen, Di, HOU, Ruijuan, LI, Jie, TAO, Jiniu (2012) The research of improved Scheme for Asynchronous Motor Direct Torque Control *Advanced Materials Research Vols.* 466–467, pp. 819–823 (in English)

3. Kvashnin, V. O., Babash, A. V. (2016) The dynamic angular speed characteristic algorithm and program development [Razrabotka algoritma I programi dlya polucheniya dinamicheskoy skorostnoy harakteristiki] *Nauchnyy vestnik DGMA № 3 (21E)*, pp. 165–175 (in Russian)

4. Kvashnin, V. O., Babash, A. V. (2015) Development of determining dynamic rotary speed and current characteristics methods of asynchronous

electrical drive [Metodika opredeleniya dinamicheskikh skorostnoy i tokovoy harakteristik asinhronnogo elektroprivoda] *Elektrotehnicheskie i kompyuternie sistemi № 19 (95)*, pp. 28–32 (In Russian)

5. Kvashnin, V. O., Babash, A. V. (2017) An induction motor angular speed accuracy increasing by using microcontroller stm32f4 software and hardware features [Povyshenie tochnosti izmereniya uglovoy skorosti asinhronnogo elektrodvigatelya s ispolzovaniem programmno-apparatnyih sredstv mikrokontrollera STM32F4] *Elektrotehnicheskie I kompyuternie sistemi № 25 (101)*, pp. 91–98 (In Russian)

6. Kuharchyk, V. V. (1998) Elementi teorii kontrolyu dinamichnih parametriv elektrichnih mashin (monografiya) [Elements of electrical machines dynamic parameters control theory] *Monograph – Vinnitsa: “Universum–Vinnitsa”*. – pp.125.(in Ukrainian)

7. Ilinskiy, N. F., Kozachenko, V.F. (1992) Obshchiy kurs elektroprivoda [Electrical drive general course] *Ucheb. dlya vusov.* – М.: Energoatomizdat.– pp. 544: il. (in Russian)

8. Kvashnin, V. O. (2017) Programming and application STM32F4Discovery microcontrollers [Programuvannya ta zastosuvannya mikrokontroleriv STM32F4Discovery] *monography / V. O. Kvashnin, A. V. Babash, V. V. Kvashnin.* – Краматорськ: TSTRI “Drukarskiy dim”. – pp. 143, ISBN 978-6177415-30-4 (in English)

9. DM00031020 Reference manual (In English) – Available at: URL: http://www.st.com/st-web ui/static/active/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf.

10. V. I. Bugayov, M. P. Musienko, Y. M. Kranih (2013) Laboratory practicum for studying microcontrollers of ARM Cortex-M4 architecture based on evaluation board STM32F4Discovery [Laboratorniy praktikum dlya izucheniya mikrokontrolerov arhitekturi ARM Cortex M4 na baze ochenochnogo modulya STM32F4Discovery] *Moscow-Nikolaev: MFTI.-CGU.*– pp. 71 (In Russian)

11. Kravchik, A. E. (1982) Induction motors series 4A. Directory [Asinhronnie dvigateli serii 4A. Spravochnik] / A. E. Kravchik, M. M. Shlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolevskaya М.: Energoatomizdat. – pp. 277 (in Russian)

THE INDIRECT INDUCTION MOTOR TORQUE METHOD DEVELOPMENT BY USING STM32F4 MICROCONTROLLER**V. O. Kvashnin, A. V. Babash, V. V. Kvashnin***Donbass State Engineering Academy*

Abstract. To measure the dynamic characteristics of an induction motor, such as the angular velocity, the phase current of the stator winding, the phase voltage dependence in time, the STM32F4 microcontroller firmware was used, such as the capture-comparison mode of the built-in timer channels and the analog to digital converter in the multichannel scanning mode. The algorithm for adjusting the microcontroller timer for signals capture and adjusting the built-in analog-to-digital converter for performing analog values such as current and voltage is presented. The developed software for collecting measured data from various channels is described and considered in this article. The scheme of connections of the necessary equipment for carrying out the experiment is presented. The angular velocity, stator current and asynchronous motor voltage data arrays obtained from the STM32F4 microcontroller are presented. The method of asynchronous electrical motor torque determination on the friction torque example as the most difficultly determined from the point of view of high-precision measurements of the obtained small values of idle current values, net power, and also value of idling speed is very close to synchronous motor angular velocity. The obtained friction torque values were compared with the similar results obtained from the results of another proposed graph-analytical technique. The voltage sensor rectified signal converting into a sinusoidal signal algorithm for further use is developed and implemented. The ratios for calculating and analyzing the asynchronous friction torque calculated by different paths are given. The experimental data arrays obtained from the STM32F4 microcontroller are presented in the form of Microsoft Excel charts.

Key words: angular velocity, torque, idling, capture-compare, timer channel, algorithm, multichannel mode, analog to digital converter.

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ НЕПРЯМОГО ВИМІРЮВАННЯ МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ МІКРОКОНТРОЛЛЕРА STM32F4**В. О. Квашнін, А. В. Бабаш, В. В. Квашнін***Донбаська державна машинобудівна академія*

Анотація. Для вимірювання динамічних характеристик асинхронного електродвигуна, таких як залежність кутової швидкості, струму фази обмотки статора, фазного напруги в часі використовувалися програмно-апаратні засоби мікроконтролера STM32F4, такі як режим захоплення-порівняння каналів вбудованого таймера та аналогово-цифровий перетворювач в режимі багатоканального сканування. Представлений алгоритм налаштування таймера мікроконтролера для захоплення сигналу і налаштування вбудованого аналогово-цифрового перетворювача для здійснення аналогових величин таких як струм і напруга. Наведено і описані розроблені програмні засоби для збору даних вимірювань з різних каналів. Представлена схема підключень необхідного обладнання для здійснення експерименту. Отримано масиви даних кутової швидкості, струму статора і напруги асинхронного електродвигуна, отриманих з мікроконтролера STM32F4. Розроблена методика визначення моменту асинхронного електродвигуна на прикладі визначення моменту тертя, як найбільш важко визначеного з точки зору високоточних вимірювань одержуваних малих значень величин струму холостого ходу, корисної потужності, а також значення швидкості холостого ходу дуже близькою до синхронної швидкості двигуна. Отримані значення моменту тертя були зіставлені з аналогічними результатами, отриманими за результатами іншої наведеної графоаналітичної методики. Розроблений та реалізований алгоритм перетворення випрямленого сигналу з датчика напруги у синусоїдальний сигнал для подальшого його використання. Наведені співвідношення для розрахунку та аналізу розрахованого різними шляхами моменту тертя асинхронного двигуна. Отримані від мікроконтролера STM32F4 масиви експериментальних даних наведені у вигляді Microsoft Excel діаграми.

Ключові слова: кутова швидкість, розвинутий момент, холостий хід, захоплення-порівняння, канал таймера, алгоритм, багатоканальний режим, аналогово-цифровий перетворювач.

Получено 28.03.2018



Квашнин Валерий Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханические системы автоматизации» Донбасской государственной машиностроительной академии. ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, , E-mail: v.kvashnin@ukr.net, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01.

Valeriy Kvashnin, Candidate of Technical Sciences, Docent, Lecturer, Department of Electromechanical systems of automation and electric drive, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: v.kvashnin@ukr.net, тел. (0626) 41-68-93, +38 (050) 989-77-01

ORCID ID: 0000-0001-8171-9794



Бабаш Андрей Владиславович, ассистент кафедры «Компьютерные информационные технологии» Донбасской государственной машиностроительной академии. ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: babashandrey@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (095) 538-04-17

Babash Andrey, assistant Department of Computer Informational Technologies, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: babashandrey@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, +38 (095) 538-04-17

ORCID ID: 0000-0002-7883-1459



Квашнин Владислав Валериевич, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Шкадинова, 76, Краматорск, Украина, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, 0666843123

Kvashnin Vladislav, post graduate student Department of Automation Industrial Processes, Donbass State Engineering Academy, Shkadinova st., 76, Kramatorsk, Ukraine, E-mail: kvashnin.vladyslav@gmail.com, тел. (0626) 41-68-93, 0666843123

ORCID ID: 0000-0002-1730-1403