

# ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГРАММНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Васильев Л.А., Мнускин Ю.В.

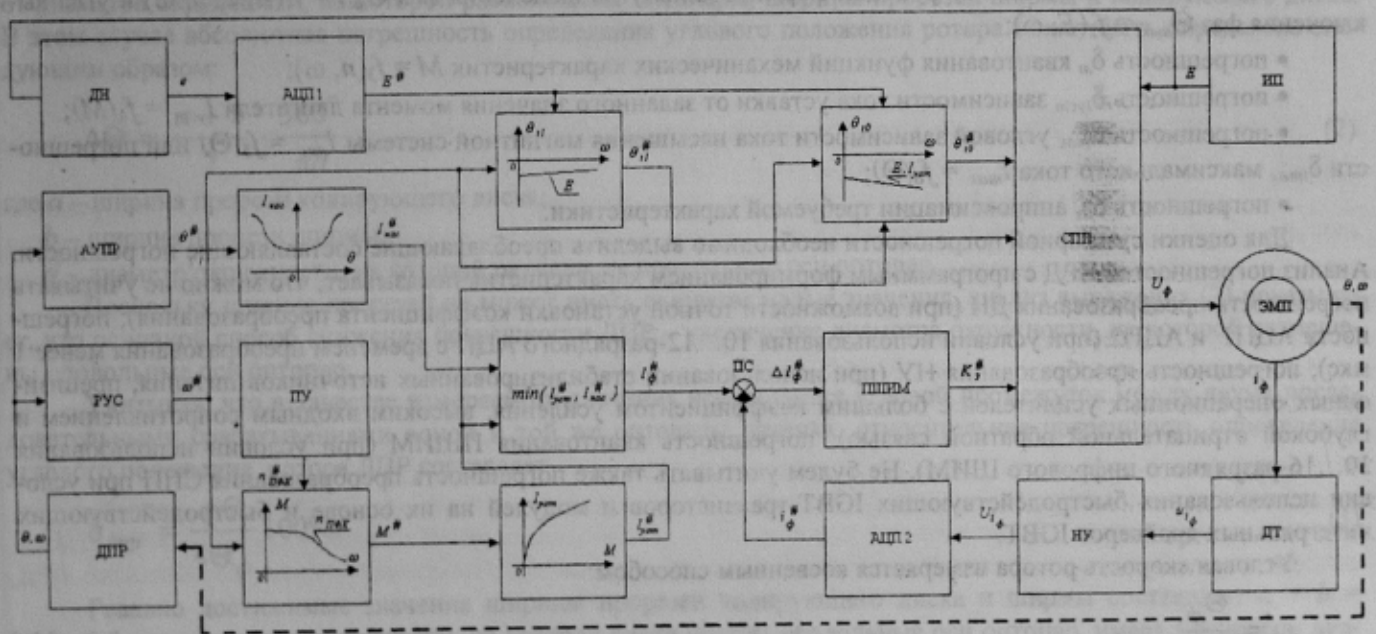
Донецкий национальный технический университет  
OUMR@dgtu.donetsk.ua

*A questions of evaluation precision program shaping of characteristics switched reluctance motor are considered. A sources of inaccurations are established, which are divided to inaccurations as measuring and transforming analog values as digital data processing. It's shown, that if it's used 10...12-bit representation of data in the control device last inaccurations may not take into account.*

**Постановка проблемы.** Повышенная надежность и высокая регулируемость вентильного реактивного двигателя (ВРД) обусловили перспективность его применения в приводах различного назначения, в том числе тягового. Адаптируемость ВРД к разнообразным условиям применения, его основные характеристики и показатели определяются, главным образом, системой управления. При этом повышение эффективности преобразования энергии в ВРД, обеспечение желаемых регулировочных качеств достигается путем программного формирования характеристик. Вопросам построения и функционирования современных систем управления ВРД посвящено очень ограниченное количество публикаций, а принципы программного формирования характеристик двигателя рассматриваются только в статьях с участием авторов данной работы [1,2].

**Задачи исследования, изложение основного материала.** Целью исследования является оценка точности реализации формируемых характеристик ВРД.

Вариант структурной схемы ВРД с программным формированием характеристик показан на рисунке.



ДН – датчик напряжения; АЦП1 – аналогово-цифровой преобразователь 1; АУПР – подпрограмма аппроксимации углового положения ротора; РУС – подпрограмма расчета угловой скорости; ПУ – пульт управления; ДПР – датчик положения ротора;  $\min()$  – вычислитель меньшего значения двух величин; ПС – программный сумматор; ПШИМ – программируемый ШИМ; АЦП2 – аналогово-цифровой преобразователь 2; СПП – силовой полупроводниковый преобразователь; ИП – источник питания; ЭМП – электромеханический преобразователь энергии; НУ – нормирующий усилитель; ДТ – датчик тока.

Рисунок – Структурная схема ВРД с программным формированием характеристик

Поскольку программное формирование характеристик ВРД непосредственно связано с осуществлением прямых и косвенных измерений физических величин, их преобразованием, вычислительными операциями, то каждое из этих действий сопровождается появлением погрешностей, которые оказывают влияние на точность формируемых характеристик двигателя.

При программном формировании характеристик ВРД значительный вклад в суммарную погрешность вносят погрешности, возникающие в электронной системе управления двигателем. Для определения суммарной погрешности программного формирования характеристик необходимо выявить источники погрешности, разделить погрешности на коррелированные и некоррелированные, систематические и случайные, выполнить их

суммирование с использованием известных методик [3]. Результирующая погрешность представляется в виде доверительного интервала погрешности.

В связи с тем, что система управления ВРД представляет собой разветвленную структуру с местными и общими обратными связями, с возможным присутствием корреляционных связей между погрешностями, точное определение суммарной погрешности программного формирования характеристик является весьма сложной задачей, которую рассмотреть в данной работе не представляется возможным. Поэтому имеет смысл оценить суммарную погрешность, полагая, что погрешности, возникающие при программном формировании характеристик, являются случайными и некоррелированными.

Для предложенной структуры ВРД с программным формированием характеристик можно выявить следующие составляющие погрешности:

- погрешность  $\delta_{эм}$  электромагнитного преобразования в ВРД;
- погрешность преобразования датчика напряжения ДН;
- статическая и динамическая погрешность квантования АЦП1;
- погрешность  $\delta_{от}$  преобразования датчика тока ДТ;
- погрешность преобразования нормирующего усилителя НУ;
- статическая и динамическая погрешность квантования АЦП2;
- статическая и динамическая погрешность квантования программируемого ШИМ;
- погрешность преобразования силового полупроводникового преобразователя СПП;
- погрешность  $\delta_{опр}$  определения углового положения ротора датчика ДПР;
- статическая и динамическая погрешность квантования при расчете угловой скорости (подпрограмма РУС);
- статическая и динамическая погрешность квантования при аппроксимации углового положения ротора (подпрограмма АУПР);
- погрешность квантования функций формирования угла включения фаз  $\Theta_{вкл} = f_1(E, I_{уст}, \omega)$  и угла выключения фаз  $\Theta_{вык} = f_2(E, \omega)$ ;
- погрешность  $\delta_{\Delta}$  квантования функций механических характеристик  $M = f_3(n, \omega)$ ;
- погрешность  $\delta_{I_{уст}}$  зависимости тока уставки от заданного значения момента двигателя  $I_{уст} = f_4(M)$ ;
- погрешность  $\delta_{I_{нас}}$  угловой зависимости тока насыщения магнитной системы  $I_{нас} = f_5(\Theta)$  или погрешности  $\delta_{I_{max}}$  максимального тока  $I_{max} = f_6(\Theta)$ ;
- погрешность  $\delta_{ax}$  аппроксимации требуемой характеристики.

Для оценки суммарной погрешности необходимо выделить преобладающие составляющие погрешности. Анализ погрешностей ВРД с программным формированием характеристик показывает, что можно не учитывать погрешность преобразования ДН (при возможности точной установки коэффициента преобразования); погрешности АЦП1 и АЦП2 (при условии использования 10...12-разрядного АЦП с временем преобразования менее 1 мкс); погрешность преобразования НУ (при использовании стабилизированных источников питания, прецизионных операционных усилителей с большим коэффициентом усиления, высоким входным сопротивлением и глубокой отрицательной обратной связью); погрешность квантования ПШИМ (при условии использования 10...16-разрядного цифрового ШИМ). Не будем учитывать также погрешность преобразования СПП при условии использования быстродействующих IGBT-транзисторов и модулей на их основе и быстродействующих интегральных драйверов IGBT.

Угловая скорость ротора измеряется косвенным способом:

$$\omega = \frac{\Theta_{\phi}}{\Delta t}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – время, измеряемое 16-ти разрядным таймером-счетчиком, которое соответствует изменению углового положения ротора  $\Theta_{\phi}$ .

Поскольку интервал времени измеряется с достаточно высокой точностью, то погрешностью квантования при расчете угловой скорости в установившемся режиме можно пренебречь.

Погрешность квантования при аппроксимации углового положения ротора возникает в результате цифровой обработки информации для получения временных отсчетов, соответствующих углам включения и выключения фазы. Эти отсчеты рассчитываются по функциям угла включения фаз  $\Theta_{вкл} = f_1(E, I_{уст}, \omega)$ , угла выключения фаз  $\Theta_{вык} = f_2(E, \omega)$ , текущему значению угловой скорости. Они определяются программой по данным 16-тиразрядного таймера-счетчика, используемого в подпрограмме расчета угловой скорости РУС. Следовательно, погрешностью квантования при аппроксимации углового положения ротора в установившемся режиме можно пренебречь.

Погрешность квантования функций формирования углов включения и выключения при аналитическом расчете обусловлена погрешностями величин  $E, I_{уст}, \omega$ . Учитывая высокую точность измерения  $E, \omega$  и задания  $I_{уст}$ , можно не учитывать погрешности квантования этих функций.

Таким образом, оценка суммарной погрешности программного формирования характеристик будет включать в себя следующие составляющие:  $\delta_{эл}, \delta_{дт}, \delta_{дпр}, \delta_{лз}, \delta_{уст}, \delta_{нас}, \delta_{тmax}, \delta_{ax}$ .

Оценим выделенные составляющие суммарной погрешности. Очевидно, что значительное влияние на суммарную погрешность оказывает погрешность электромагнитного преобразования в ВРД, которая обусловлена влиянием многих факторов на этот процесс. Аналитические выражения, описывающие процесс электромагнитного преобразования в ВРД, являются приближительными зависимостями, поэтому их использование может привести к недопустимо высокому значению суммарной погрешности программного формирования характеристик. Чтобы получить приемлемое значение погрешности электромагнитного преобразования в ВРД, целесообразно использовать экспериментально полученные зависимости электромагнитного момента от тока уставки двигателя и механических характеристик. Тогда в первом приближении можно считать, что погрешность электромагнитного преобразования определяется точностью получения этих зависимостей. Анализ показывает, что погрешность их экспериментального определения находится в пределах  $\delta_{эл} = 1...5\%$ .

Погрешность измерения фазного тока при заданных требованиях к НУ и АЦП2 определяется, главным образом, погрешностью ДТ. Погрешность преобразования ДТ на основе шунтов из материала с низким температурным коэффициентом сопротивления нормируется классом точности и обычно не превышает  $\delta_{дт} = 0,15...0,5\%$ .

Оптический ДПР должен обеспечивать точечное срабатывание при полностью рассогласованном положении полюсов статора и ротора для каждой фазы (что соответствует началу участка магнитного взаимодействия при  $\Theta = -22,5^\circ$ ). При определении наибольшей допустимой погрешности ДПР будем считать, что погрешность возникает в результате срабатывания оптопар датчика при угловом положении ротора, меньшем установленного значения. Это угловое положение соответствует началу перекрытия прорезей ширмы и кодирующего диска. Высокая чувствительность фотоприемников оптопары и усилительных устройств позволяет считать, что в этот момент происходит срабатывание датчика. При изготовлении ДПР с использованием современного оборудования, тщательной настройке расположения оптопар можно считать, что статическая погрешность зависит от диаметра окружности, на которой расположены оптопары, ширины прорезей ширмы и кодирующего диска. В этом случае абсолютная погрешность определения углового положения ротора может быть определена следующим образом:

$$\Delta\Theta = \frac{a + b}{2} \cdot \frac{360^\circ}{\pi d}, \quad (2)$$

где  $a$  – ширина прорези кодирующего диска;

$b$  – ширина прорези ширмы;

$d$  – диаметр окружности, на которой размещены продольные оси оптопар.

Поскольку ширина прорезей не может иметь слишком малые значения, анализ выражения (2) показывает, что основной способ снижения погрешности ДПР – увеличение диаметра окружности, на которой размещены продольные оси оптопар.

Учитывая, что в качестве измеряемого значения используется угловой промежуток между двумя последовательными срабатываниями одной и той же оптопары датчика, относительная погрешность определения углового положения ротора ДПР составляет

$$\delta_{дпр} = \frac{\Delta\Theta}{4\Theta_\phi} 100\%. \quad (3)$$

Реально достижимые значения ширины прорезей кодирующего диска и ширмы составляют  $a = b = 0,25...0,5$  мм, а диаметр окружности, на которой расположены продольные оси оптопар, имеет значения в диапазоне  $d = 30...150$  мм. При таких значениях параметров ДПР относительная погрешность определения углового положения ротора в соответствии с (3) составит  $\delta_{дпр} = 0,32...3,2\%$ , причем меньшее значение погрешности характерно для ДПР ВРД средней и большой мощности, где диаметр корпуса датчика больше.

Динамическая погрешность определения углового положения ротора обусловлена инерционностью фотоприемников оптопары и преобразовательных устройств ДПР и проявляется при увеличении угловой скорости как запаздывание сигнала срабатывания на выходе датчика. Применение современной элементной базы позволяет пренебречь этой составляющей погрешности определения углового положения ротора.

Погрешность квантования функций механических характеристик  $M = f_3(n, \omega)$ , тока уставки от момента двигателя  $I_{уст} = f_4(M)$ , угловой зависимости тока насыщения магнитной системы  $I_{нас} = f_5(\Theta)$  или максимального тока  $I_{max} = f_6(\Theta)$  зависит от требований к точности программного формирования характеристик, быстродействия и объема памяти микропроцессорного устройства управления. При учете последних двух факторов удобно принимать количество уровней квантования  $N = 2^b$ , где  $b$  – разрядность процессора. Тогда погрешность квантования этих функций:

$$\gamma = \frac{1}{2^{b+1}} 100\%. \quad (4)$$

Если  $b = 8$ , то  $\gamma_M = \gamma_{I_{уст}} = \gamma_{I_{нас}} = \gamma_{I_{max}} = 0,2\%$ , при большей разрядности процессора погрешностью квантования этих функций можно пренебречь.

Относительная погрешность при квантовании механической характеристики  $M = f_3(n, \omega)$  по величине момента в номинальном режиме:

$$\delta_M = \frac{\gamma_M M_n}{M_n} \quad (5)$$

где  $M_n$  - пусковой момент,  $M_n$  - номинальный момент.

Кратность пускового момента обычно принимает значения в диапазоне  $M_n / M_n = 1,25 \dots 2,5$ , поэтому величина относительной погрешности по (5) составляет  $\delta_M = 0,25 \dots 0,5\%$ .

Относительная погрешность при квантовании функции тока уставки от момента двигателя  $I_{уст} = f_4(M)$

$$\delta_i = \frac{\gamma_i I_{устн}}{I_{устн}} \quad (6)$$

где  $I_{устн}$  - пусковой ток,  $I_{устн}$  - номинальный ток уставки фазы.

При указанном выше диапазоне изменения кратности пускового момента кратность пускового тока фазы может принимать значения  $I_{устн} / I_{устн} = 1,12 \dots 1,6$ , поэтому величина относительной погрешности по (6) составляет  $\delta_i = 0,22 \dots 0,32\%$ .

Погрешность аппроксимации требуемой характеристики программно формируемой характеристикой  $\delta_{ax}$  определяется числом ветвей семейства механических характеристик (реально 128...256), сохраняемых в памяти микропроцессорного устройства управления, и режимом работы двигателя. В номинальном режиме ВРД работает на естественной ветви характеристики, которая является предельной, поэтому относительная погрешность равна приведенной погрешности:

$$\delta_{ax} = \gamma_{ax} = \frac{1}{2^{b+1}} 100\% \quad (7)$$

где  $b = 7 \dots 8$ .

При этом относительная погрешность аппроксимации требуемой характеристики программно формируемой характеристикой будет составлять  $\delta_{ax} = 0,2 \dots 0,4\%$ .

Для наглядности условно разделим преобладающие погрешности ВРД с программным формированием характеристик на погрешности преобразования и измерения аналоговых величин  $\delta_{эм}$ ,  $\delta_{дм}$ ,  $\delta_{дпр}$  и погрешности цифровой обработки информации  $\delta_M$ ,  $\delta_{I_{уст}}$ ,  $\delta_{I_{нас}}$ ,  $\delta_{I_{max}}$ ,  $\delta_{ax}$ . Оценка этих составляющих суммарной погрешности показала, что погрешности  $\delta_{эм}$ ,  $\delta_{дм}$ ,  $\delta_{дпр}$  носят преобладающий характер и в 3 и более раз могут превышать погрешности цифровой обработки информации, которые могут быть уменьшены до ничтожно малых значений при увеличении разрядности данных. Следовательно, можно отказаться от учета погрешностей цифровой обработки информации и сделать вывод, что суммарная погрешность программного формирования характеристик ВРД в наибольшей степени определяется погрешностями преобразования и измерения аналоговых величин.

**Выводы.** Погрешность реализации программно формируемых характеристик ВРД определяется, главным образом, погрешностями измерений и преобразований аналоговых величин. Для снижения суммарной погрешности программного формирования характеристик необходимо совершенствовать средства и методы измерения и преобразования электромагнитных и электромеханических экспериментальных зависимостей ВРД, фазного тока двигателя, углового положения и угловой скорости ротора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Захарченко П.И., Дудник М.З., Карась С.В., Васильев Л.А., Мнускин Ю.В. Привод с вентильными реактивными двигателями: проблемы управления // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний збірник наукових праць "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". Харків: НТУ "ХПІ", 2002, №12, Т.1, - с. 158-160.
2. Мнускин Ю.В. Программное формирование характеристик вентильного реактивного двигателя // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 41: Донецьк: ДонДТУ, 2002. - с. 53-56.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение. - 1985. - 248 с.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Дудніком М.З.