

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА БЕСКОНТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

К.П. Акинин, канд. техн. наук
Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Рассмотрены варианты формирования сигналов частоты вращения на основании периодических сигналов датчика положения ротора бесконтактного двигателя с постоянными магнитами. Приведены примеры расчета. Библ. 2, табл. 3.

Ключевые слова: преобразование сигналов, сигнал частоты вращения, датчик положения ротора.

При построении электромеханических систем (ЭМС) на основе двигателей переменного тока часто используются датчики механических координат электродвигателей, на выходе которых формируются синусоидальные сигналы как функции угла поворота ротора. Особенности и варианты непрерывного преобразования и получения сигналов, соответствующих частоте вращения ротора двигателя, достаточно подробно рассмотрены в работе [1]. Общий подход при непрерывной обработке сигналов связан с тем, что исходные синусоидальные сигналы дифференцируют, после чего тем или иным способом формируют непрерывный искомый сигнал.

В настоящее время доминирующим подходом при разработке ЭМС и других электротехнических устройств стала реализация процесса преобразования сигналов средствами микроконтроллера. При этом выполняется предварительная фильтрация выходных сигналов датчиков посредством фильтров низкой частоты, затем аналого-цифровое преобразование сигналов и, наконец, обработка квантованных по уровню сигналов в цифровом виде. Основным фактором, определяющим искажения выходного сигнала, является ограниченность разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Ограничение разрядности АЦП приводит к тому, что в наибольшей мере искажения проявляются на нелинейных участках синусоидальных сигналов. Поэтому в таком случае для формирования сигнала, соответствующего частоте вращения ротора, следует использовать производные квазилинейных участков синусоидальных сигналов для последующей их линеаризации.

Исследуем особенности формирования сигнала x_{ω} , соответствующего частоте вращения ротора, на основании рассматриваемого подхода к обработке пары исходных квазиортогональных синусоидальных сигналов, полагая при этом, что они нормированы по амплитуде. Такие сигналы могут быть получены на выходе датчиков магнитного поля, используемых в ЭМС на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами. Особенностью исследуемого преобразования сигналов является необходимость формирования сигнала x_{ω} в реальном времени.

Запишем исходные нормированные по амплитуде сигналы

$$x_1 = \sin(\omega t); \quad x_{21} = \cos(\omega t + \varphi),$$

где $\omega = 2\pi/T_1$ – электрическая частота вращения двигателя, причем T_1 – период сигналов; φ – угол, учитывающий отклонение установки датчика магнитного поля от заданного положения и нарушение ортогональности сигналов.

После квантования по уровню исходных аналоговых сигналов с помощью АЦП получаем сигналы

$$x_{1K} = (\text{int}[N x_1 + N] - N + 0,5)/N; \quad x_{21K} = (\text{int}[N x_{21} + N] - N + 0,5)/N,$$

где N – амплитуда цифрового сигнала на выходе АЦП; $\text{int}[x]$ – процедура квантования по уровню методом усечения.

В соответствии с тождеством $\cos \alpha = \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha + \sec \varphi \cos(\alpha + \varphi)$ может быть восстановлен ортогональный сигнал $x_{2K} = x_{1K} \cdot \operatorname{tg} \varphi + x_{21K} \cdot \sec \varphi$.

Сглаживание и дифференцирование сигналов x_{1K} и x_{2K} может быть выполнено с помощью преобразования, которому соответствует передаточная функция $\frac{1}{T_F} \left(1 - \frac{1}{T_F \cdot p + 1} \right) = \frac{p}{(T_F p + 1)}$, где T_F – постоянная времени фильтра.

Запишем соответствующие такому преобразованию разностные уравнения

$$x_{1F1}(i) = a \cdot x_{1K}(i) + (1-a) \cdot x_{1F1}(i-1); \quad x_{1F2}(i) = (x_{1F1}(i) - x_{1K}(i))/T_F;$$

$$x_{2F1}(i) = a \cdot x_{2K}(i) + (1-a) \cdot x_{2F1}(i-1); \quad x_{2F2}(i) = (x_{2F1}(i) - x_{2K}(i))/T_F,$$

где i – номер отсчета; $a = T/T_F$; T – период дискретизации. Разностные уравнения для переменных x_{1F1} и x_{2F1} описывают алгоритм экспоненциального усреднения [2]. Переменные x_{1F2} и x_{2F2} соответствуют производным синусоидальных сигналов.

Наконец, запишем соотношения для определения сигнала x_ω на четырех интервалах периода переменных сигналов, при котором используются производные x_{1F2} и x_{2F2} квазилинейных участков отфильтрованных сигналов x_{1F1} и x_{2F1} :

$$x_\omega = x_{1F2}/x_{2F1} \quad \text{при} \quad x_{2F1} > |x_{1F1}|;$$

$$x_\omega = -x_{2F2}/x_{1F1} \quad \text{при} \quad x_{1F1} > |x_{2F1}|;$$

$$x_\omega = x_{1F2}/x_{2F1} \quad \text{при} \quad x_{2F1} < -|x_{1F1}|;$$

$$x_\omega = -x_{2F2}/x_{1F1} \quad \text{при} \quad x_{1F1} > -|x_{2F1}|.$$

Для проверки качества формирования сигнала x_ω в зависимости от величины постоянной времени фильтра T_F и угла φ выполним пример расчета при $N = 400$, $T_1 = 1$ с и $T = 10^{-5}$ с. При этом используем два показателя:

$$k_1 = 100(\omega - x_{\omega 2})/\omega \quad \text{и} \quad k_2 = 100(x_{\omega \max} - x_{\omega \min})/\omega,$$

где $x_{\omega 2}$ – средняя величина переменной x_ω ; $x_{\omega \max}$ и $x_{\omega \min}$ – максимальное и минимальное значения переменной x_ω .

В табл. 1 приведены результаты расчета показателей качества k_1 и k_2 в случае пяти значений постоянной времени T_F фильтра и четырех значений угла $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и φ_4 , соответственно равных 0, 5, 10 и 15 электрическим градусам.

Таблица 1

T_F, c	$k_1(\varphi_1)$	$k_1(\varphi_2)$	$k_1(\varphi_3)$	$k_1(\varphi_4)$	$k_2(\varphi_1)$	$k_2(\varphi_2)$	$k_2(\varphi_3)$	$k_2(\varphi_4)$
0,001	0,849	0,859	0,860	0,853	55,7	58,7	64,2	73,4
0,002	0,360	0,359	0,358	0,362	27,9	30,3	32,3	36,1
0,004	0,114	0,111	0,110	0,111	14,0	15,1	16,2	17,9
0,008	-0,015	-0,014	-0,015	-0,014	7,1	7,5	8,1	8,9
0,016	-0,080	-0,080	-0,079	-0,079	3,6	3,8	4,1	4,5

В табл. 2 приведены результаты расчета для исследования влияния параметра N на точность формирования сигнала x_ω при $T_F = 0,004$ и $\varphi = 0$.

Таблица 2

N	$k_1(\varphi_1)$	$k_2(\varphi_1)$
100	0,036	55,8
200	0,107	27,9
400	0,112	14,0
800	0,113	7,0
1600	0,116	3,5

Рассмотрим алгоритм получения искомого сигнала путем формирования прямоугольных импульсов в моменты изменения значений сигналов x_{1K} и x_{21K} . При этом осуществляется последовательность действий:

$$t_1 = t_1 + T;$$

при $t_1 > t_0$ выполняется одно из условий:

если $|x_{1K}(i)| \leq |x_{21K}(i)|$ и $x_{1K}(i-1) \neq x_{1K}(i)$, то $T_2(i) = t_1$, $n = 3$ и $t_1 = 0$;

если $|x_{21K}(i)| \leq |x_{1K}(i)|$ и $x_{21K}(i-1) \neq x_{21K}(i)$, то $T_2(i) = t_1$, $n = 4$ и $t_1 = 0$;

если $x_{1K}(i-1) = x_{21K}(i)$ и $|x_{1K}(i)| > |x_{1K}(i-1)|$, то $T_2(i) = t_1$, $n = 1$ и $t_1 = 0$;

если $x_{21K}(i-1) = x_{1K}(i)$ и $|x_{21K}(i)| > |x_{21K}(i-1)|$, то $T_2(i) = t_1$, $n = 2$ и $t_1 = 0$;

затем при $t_1 \leq t_0$ формируется импульсный сигнал $y_1 = A$, иначе $y_1 = 0$;

для компенсации нарушений равномерности следования импульсов в окрестностях интервалов равенства абсолютных значений x_{1K} и x_{21K} выполняется корректирующее действие $y_2 = y_1 \cdot T_2(i)/T_2(i-1)$ при выполнении одного из условий: $n(i-1) = 1$ и $n(i) = 4$; $n(i-1) = 2$ и $n(i) = 3$; $n(i-1) = 3$ и $n(i) = 4$ или $n(i-1) = 3$ и $n(i) = 4$, иначе $y_2 = y_1$;

наконец, имеем искомый сигнал

$$y_{\omega} = y_2 / |x_{2K}| \quad \text{при} \quad x_{2K} > |x_{12K}|;$$

$$y_{\omega} = y_2 / |x_{12K}| \quad \text{при} \quad x_{12K} > |x_{2K}|;$$

$$y_{\omega} = y_2 / |x_{2K}| \quad \text{при} \quad x_{2K} < -|x_{12K}|;$$

$$y_{\omega} = y_2 / |x_{12K}| \quad \text{при} \quad x_{12K} < -|x_{2K}|,$$

где t_0 – параметр задания длительности импульса; n – параметр для индикации выполненного условия формирования импульсов; A – амплитуда импульса; T_2 – период следования импульсов; i – номер отсчета; $x_{12K} = -x_{21K} \cdot \operatorname{tg} \varphi - x_{1K} \cdot \operatorname{sec} \varphi$.

Оценка среднего за период T_1 значения сформированного сигнала может быть сделана с помощью выражения $y_{\omega 1} = A \cdot t_0 / t_{\min}$, где $t_{\min} = (T_1 / \pi) \cdot \arcsin(1/2N)$. При $N = 400$, $T_1 = 1$ с, $T = 10^{-5}$ с, $t_0 = 0,0001$ с и $A = 1$ имеем $y_{\omega 1} = 0,2513$.

Таблица 3

φ , эл. град.	$y_{\omega 2}$	N_2
0	0,2517	2264
5	0,2514	2262
10	0,2511	2256
15	0,2511	2244

В табл. 3 приведены средние значения $y_{\omega 2}$ и количества N_2 импульсов сигнала y_{ω} на периоде T_1 , рассчитанные при заданных значениях угла φ .

Таким образом, в статье были рассмотрены два варианта преобразования квантованных по уровню пары квазиортогональных сигналов датчиков положения и формирования на их основе сигналов x_{ω} и y_{ω} , соответствующих частоте вращения ротора. Приведенные результаты расчетов показывают, что точность формирования сигнала x_{ω} зависит от величин угла φ и параметра $N = 400$. В то же время величина сигнала y_{ω} в меньшей мере определяется параметрами φ и N_2 . Сигналы x_{ω} и y_{ω} имеют импульсный характер, поэтому для их сглаживания требуется дополнительная фильтрация.

1. Акинин К.П. Способы определения частоты вращения двигателя на основании периодических функций угла поворота его вала // Техн. электродинамика. – 2006. – № 6. – С. 47–51.
2. Ричард Лайонс Цифровая обработка сигналов: Второе изд. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 656 с.

УДК 621.313.17

К.П. Акінін, канд. техн. наук

Ін-т електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Перетворення сигналів датчика положення ротора безконтактного двигуна з постійними магнітами

Розглянуто варіанти формування сигналів частоти обертання на основі періодичних сигналів датчика положення ротора безконтактного двигуна з постійними магнітами. Наведено приклади розрахунку. Бібл. 2, табл. 3.

Ключові слова: перетворення сигналів, сигнал частоти обертання, датчик положення ротора.

K.P. Akinin

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, Ukraine

Signal transformation of permanent magnet brushless motor rotor position sensor

Forming variants of rotation frequency signals on the basis of periodical signals of permanent magnet brushless motor rotor position sensor are considered. Examples of computations are given. References 2, tables 3.

Key words: signal transformation, rotation frequency signal, rotor position sensor.

Надійшла 19.10.2011

Received 19.10.2011