

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКА УГЛА ПОВОРОТА РОТОРА

А.Н. Ковшаров
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Предложено вычисление угла поворота ротора и угловой скорости для бездатчиковой системы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Рассмотрены причины появления пульсаций при вычислении угла поворота ротора. Приведен алгоритм работы фильтра Калмана для бездатчиковой системы управления. Представлена бездатчиковая система управления на базе источника тока.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, вычисление угла поворота ротора и угловой скорости, пульсации при вычислении угла поворота ротора и угловой скорости, фильтр Калмана, бездатчиковая система управления на базе источника тока.

Электропривод турбокомпрессорной установки энергетической системы должен обеспечить выход на частоту вращения до 60 000 об/мин при высоком качестве управления. Для решения этой задачи используется синхронный двигатель с постоянными магнитами и система векторного управления. Указанная частота вращения может быть обеспечена только системой управления без использования физического датчика угла поворота ротора. Высокоскоростной двигатель имеет малый момент инерции, а момент инерции турбокомпрессорной установки в несколько раз меньше момента инерции двигателя. В связи с этим при неблагоприятном соотношении между электромагнитной и электромеханической постоянными времени привода наблюдается очень сильное влияние противоЭДС, которое при отсутствии специальных мер приводит к увеличению колебаний в системе управления. В [1] были рассмотрены несколько систем управления синхронным двигателем и была выбрана система управления на базе источника тока. Данная система управления позволяет выйти на частоту вращения 60 000 об/мин при наличии датчика угла поворота ротора.

Разработка системы управления без использования датчика положения ротора является наиболее сложной и трудоёмкой задачей. На рис. 1 представлена структура системы управления на базе источника тока без использования датчика угла положения ротора. Модуль ControlSystem включает в себе логику работы системы управления на базе источника тока, рассмотренную в [1]. Для вычисления угла поворота ротора в бездатчиковых системах управления используют токи и напряжения двигателя, которые фильтруются с помощью аналоговых фильтров и поступают в модуль вычисления угла поворота ротора и угловой скорости (Theta, w_calc). С помощью преобразований значе-

ния токов и напряжений представляются в координатах ротора d и q . Модель, представленная на рис. 1, вычисляет угол поворота ротора через отношение потокоцеплений по осям d и q . В многочисленных публикациях, связанных с бездатчиковыми системами управления двигателем, отмечается появление пульсаций при вычислении угла поворота ротора, которые требуют дополнительных мер для обеспечения работоспособности системы. При этом одной из таких мер является применение фильтра Калмана (Kalman filter) [2].

Вычислитель угла поворота ротора и угловой скорости. Электрический угол поворота ротора $Theta$ вычисляется через токи и напряжения в координатах d и q :

$$\begin{aligned} \Theta &= a \tan 2 \left(\frac{-\Psi_d}{\Psi_q} \right) = \\ &= a \tan 2 \left(\left(- \left(\frac{v_d - i_d R}{p} + F_m \right) \right) / \left(\frac{v_d - i_d R}{p} \right) \right), \quad (1) \end{aligned}$$

где Ψ_d , Ψ_q – результирующие потокоцепления по двум осям; F_m – потокоцепление от постоянных магнитов, v_d , v_q , i_d , i_q – напряжения и токи.

Угловая скорость ω вычисляется из (1) как производная от электрического угла поворота ротора $Theta$:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{d\Theta}{dt} = \frac{d \arctg \frac{-\Psi_d}{\Psi_q}}{dt} = \\ &= \frac{(F_d + F_m)(v_q - i_q R) - F_q(v_d - i_d R)}{(F_d + F_m)^2 + F_q^2}, \end{aligned}$$

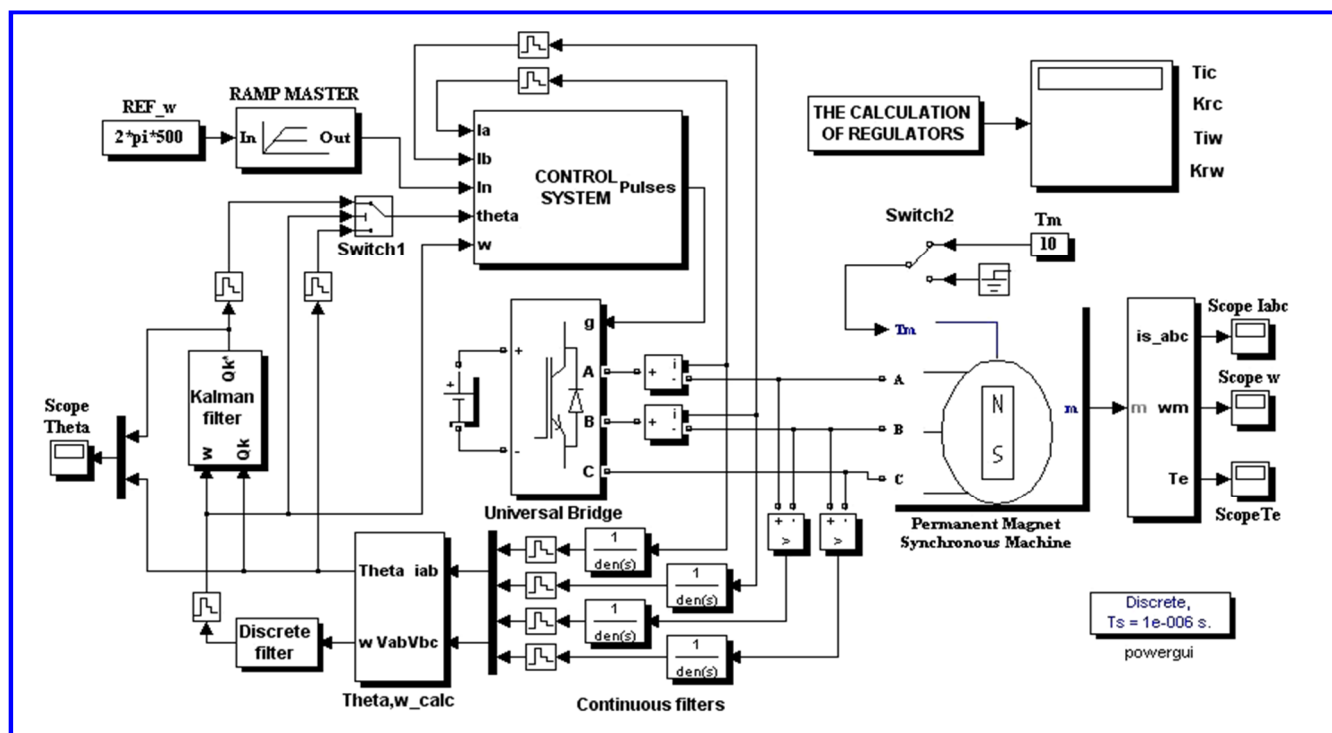


Рис. 1. Система управления двигателем на базе источника тока без использования датчика угла положения ротора

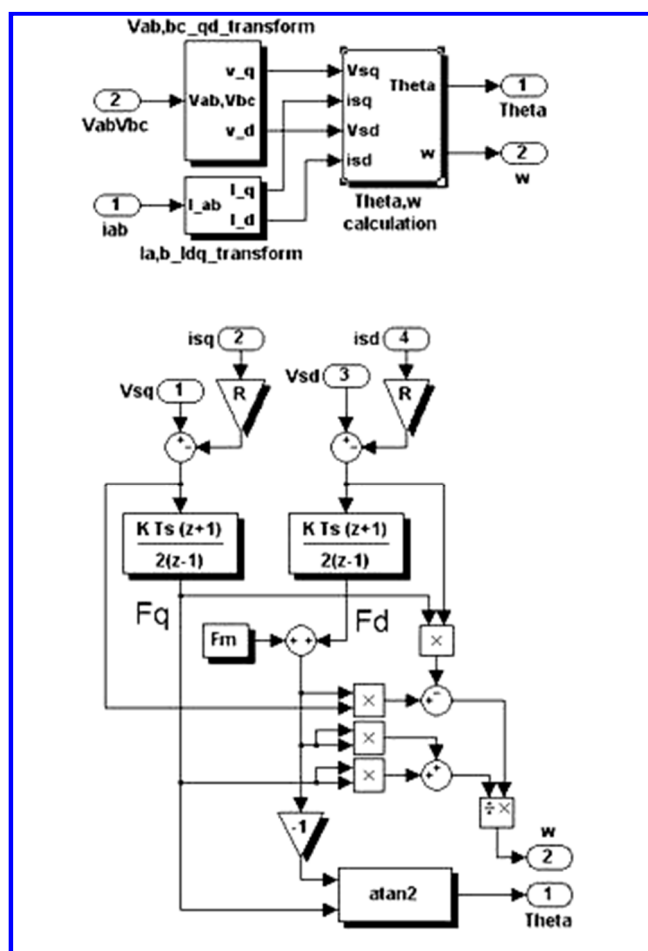


Рис. 2. Вычислитель угла поворота ротора и скорости

где F_d и F_q – потокосцепления, вычисляемые с помощью цифровых интеграторов. Структура вычислений при моделировании представлена на рис. 2.

Цифровые интеграторы реализованы по методу трапеции. Вычисленные значения угла поворота ротора и угловой скорости поступают в каналы обратных связей системы управления.

Причины появления пульсаций при вычислении угла поворота ротора. При практической реализации стремятся иметь одну и ту же частоту коммутации вентиля и вычислительного устройства. На практике частоты коммутаций этих устройств могут несколько отличаться и их разница может составлять малую величину Δf . Рассмотрим особенности аналогового и цифрового интегрирования при этих условиях.

При подаче синусоидального сигнала с единичной амплитудой частоты $\Delta f = 0,1$ Гц на вход аналогового интегратора имеем максимальный сигнал на выходе в момент времени $\frac{T}{2}$, равный 3,1831:

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t dt = -\frac{\cos \omega t}{\omega} \Big|_0^{\frac{T}{2}} = \frac{T}{\pi} = \frac{1}{f\pi}.$$

Цифровой интегратор имеет вид:

$$W(z) = \frac{T_s(z-1)}{2(z-1)}, \quad (2)$$

где T_s – шаг квантования.

Для построения АЧХ используется w преобразование с подстановкой

$$z = \frac{1+\omega}{1-\omega}, \text{ при } w = j\frac{\lambda T}{2}, \text{ где } \lambda = \frac{2}{T_s} \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2} -$$

абсолютная псевдочастота [3].

В результате указанной подстановки в (2) модуль функции цифрового интегрирования представляется выражением

$$|W(j\omega)| = \frac{1}{2f_s \operatorname{tg} \left[\pi \frac{\left(\frac{f_s \pm \Delta f}{n} \right)}{f_s} \right]},$$

где $f_s = \frac{1}{T_s}$ – частота квантования интегратора.

Если частота квантования вентиля близка к частоте квантования интегратора, то при $n = 1$ и малом значении разницы частот $\Delta f = 0,1$ Гц (например, $f_s = 20\,000$ Гц и частоте коммутации вентиля $20\,000,1$ Гц) получим амплитуду на выходе интегратора 3,1831. Аналоговый интегратор имеет такой же сигнал на выходе при частоте 0,1 Гц, но при частоте $20\,000,1$ Гц амплитуда аналогового интегратора мала и равна $7,957 \cdot 10^{-6}$ (рис. 3). В этом случае цифровой интегратор не является эффективным фильтром для низких частот Δf и они появляются на его выходе с возможным увеличением амплитуды. Таким образом, при наличии малой разницы частот квантования интегратора и входного сигнала появляются низкочастотные пульсации при вычислении угла поворота ротора.

Чем меньше шаг квантования цифрового интегратора, тем ближе он по своим характеристикам приближается к характеристикам аналогового интегратора. При шаге квантования $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$ с (частота $200\,000$ Гц) цифровой интегратор фильтрует частоты f_s меньше $200\,000$ Гц и имеет рассмотренные ранее проблемы при частотах $200\,000 \pm \Delta f$. При этом следует учесть, что амплитуда десятой гармоники частоты f_s $20\,000 \pm \Delta f$ значительно меньше амплитуды первой гармоники той же частоты. В связи с этим помехи, связанные с особенностями цифрового интегрирования, при шаге $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$ будут значительно меньше, чем при шаге $T_s = 50 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, при незначительных низ-

кочастотных помехах при таком шаге интегратора можно рассматривать вопрос об отказе от фильтра Калмана.

Математическое описание фильтра Калмана.

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы (например, физический закон движения), известные управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния [2]. Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказания и корректировки. В первой фазе рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени (с учётом неточности их измерения). Во второй фазе новая информация с датчика корректирует предсказанное значение (также с учётом неточности и зашумлённости этой информации).

Предсказание:

$\hat{Q}_K = \hat{Q}_{K-1} + \omega T_s$ – предсказание значения угла поворота ротора в текущий момент времени;
 $P_K^- = P_{K-1}$ – предсказание ошибки ковариации.

Корректировка:

$K_K = \frac{P_K^-}{P_K^- + R}$ – вычисление усиления Калмана (KalmanGain);
 $P_K = (1 - K_K)P_K^-$ – обновление ошибки ковариации;
 $\hat{Q}_K = \hat{Q}_K^- + K_K(Q_K - \hat{Q}_K^-)$ – обновление предсказания значения угла с учётом измерения в текущий момент времени;
 Q_K – вычисленный угол поворота ротора;
 $\hat{Q}_K^-$ – производная от угла поворота ротора (вычисленная угловая скорость).

На вход модуля Калмана подаётся два параметра – вычисленный угол поворота ротора и вычисленная угловая скорость. Данные значения содержат в себе помехи, связанные с работой цифрового интегратора, работающего с частотой, близкой к частоте квантования вентиля. Для более быстрой сходимости необходимо ввести начальное значение угла. Фильтр Калмана не предусматривает возможность формирования необходимого пилового выходного сигнала.

В модели реализована эта возможность. Алгоритм для задачи вычисления угла поворота ротора при моделировании приведён на рис. 4 и может быть использован при программировании в реальной системе. С помощью переключателя (Switch) реализована возможность получить пилообразный сигнал в положении переключателя, указанного на рис. 4.

Выходной сигнал меняется в диапазоне от $-\pi$ до π .

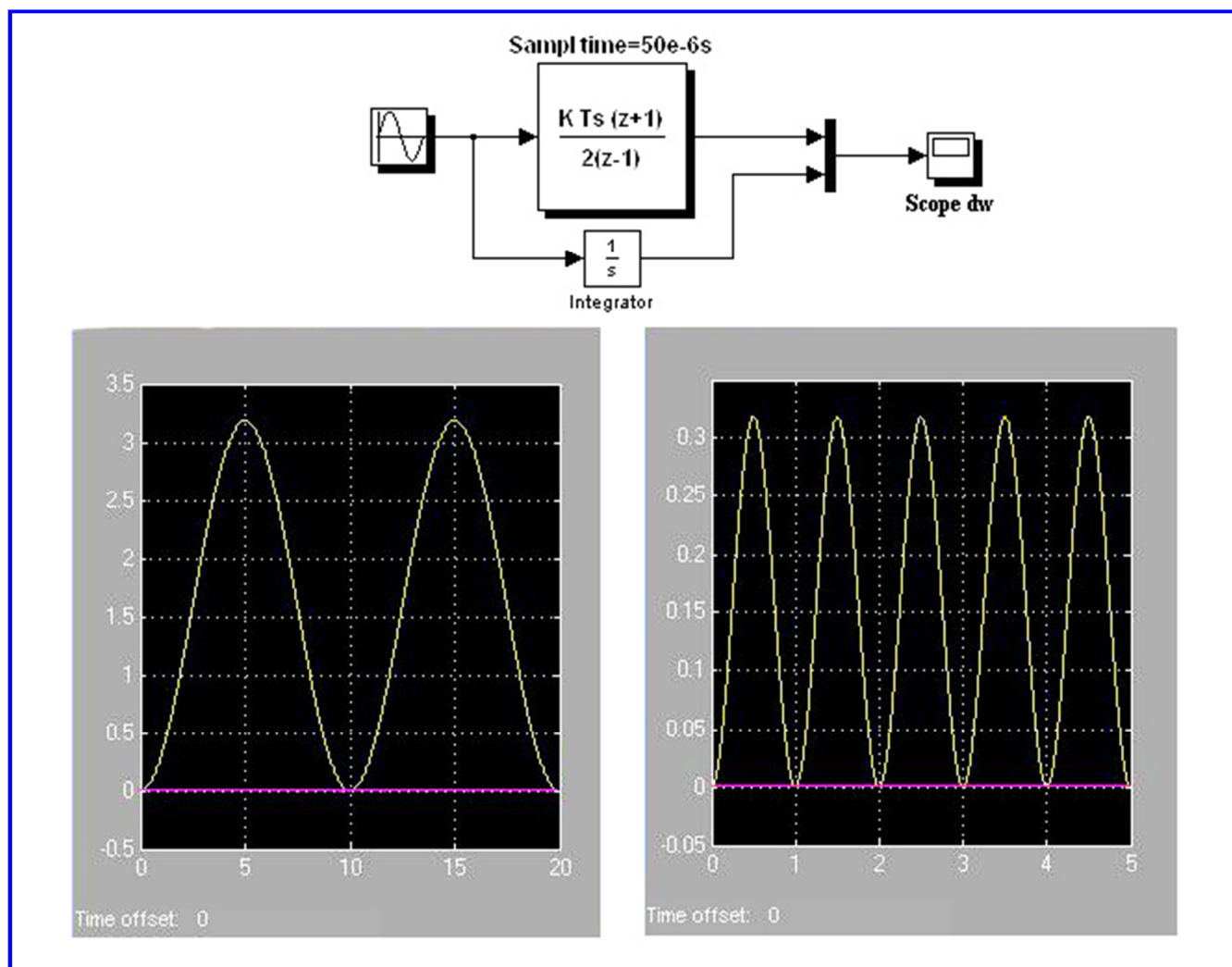


Рис. 3. Амплитуды частот 20 000,1 и 20 001 Гц

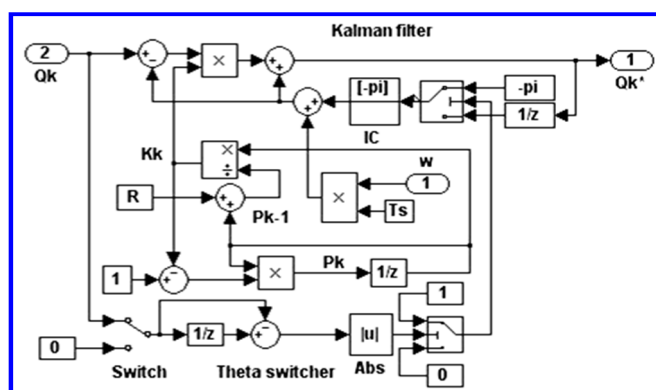


Рис. 4. Алгоритм фильтра Калмана для задачи вычисления угла поворота ротора

Работа фильтра Калмана при наличии во входном сигнале синусоидальной помехи представлена на рис. 5. Как следует из рисунка, фильтр полностью исключает помеху на выходе.

Результаты моделирования бездатчиковой системы управления. На рис. 6 представлены осциллограммы разгона двигателя с постоянными магнитами без использования датчика положения ротора до 60 000 об/мин со ступенчатым приложением нагрузки как с фильтром Калмана при шаге квантования интегратора $1/20\,000 = 50 \cdot 10^{-6}$ с, так и без фильтра при шаге квантования $5 \cdot 10^{-6}$ с. Эти осциллограммы идентичны, двигатель вышел на заданную частоту вращения.

Таким образом, оба способа можно использовать для реализации системы управления высокоскоростным синхронным двигателем с постоянными магнитами. Для вычисления угла поворота ротора с малым шагом квантования интегратора требуется быстродействующий процессор с реализацией двух шагов квантования внутри программы. С малым шагом должна выполняться программа

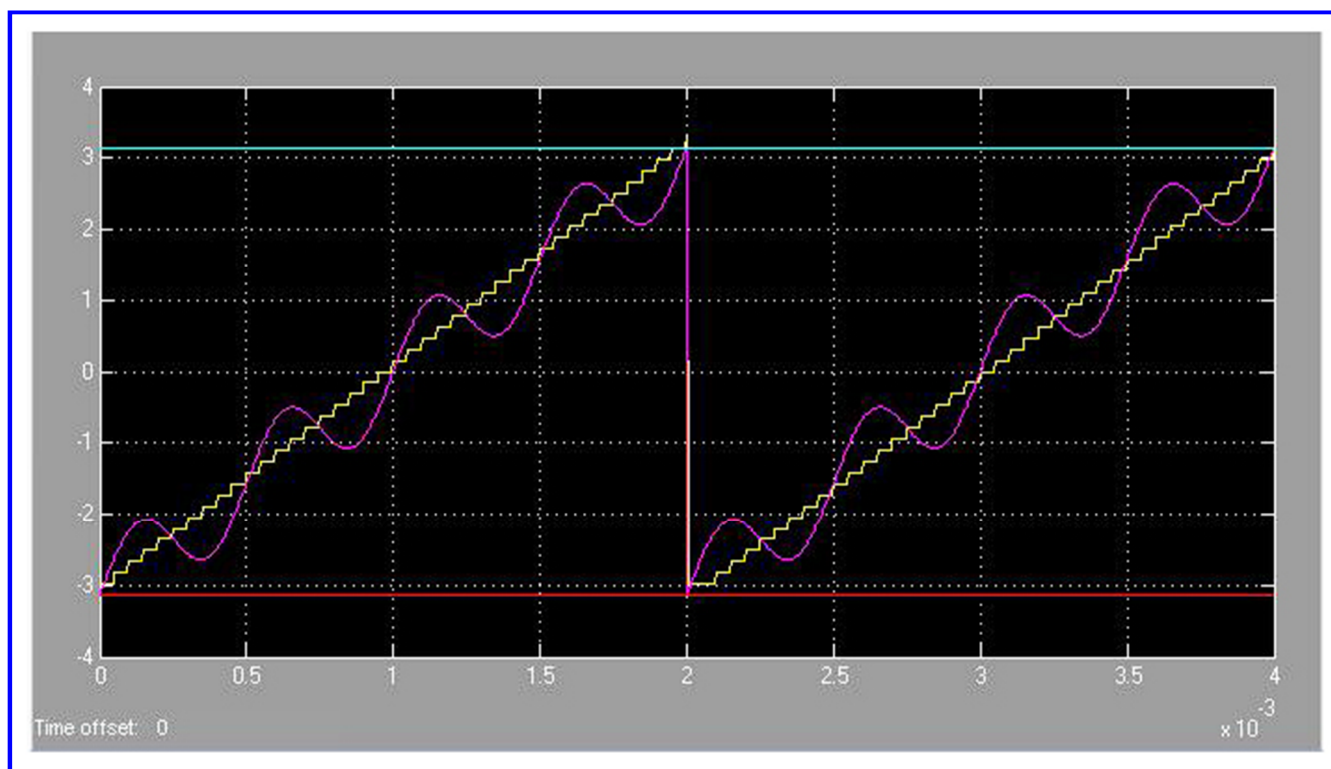


Рис. 5. Осциллограммы работы фильтра Калмана

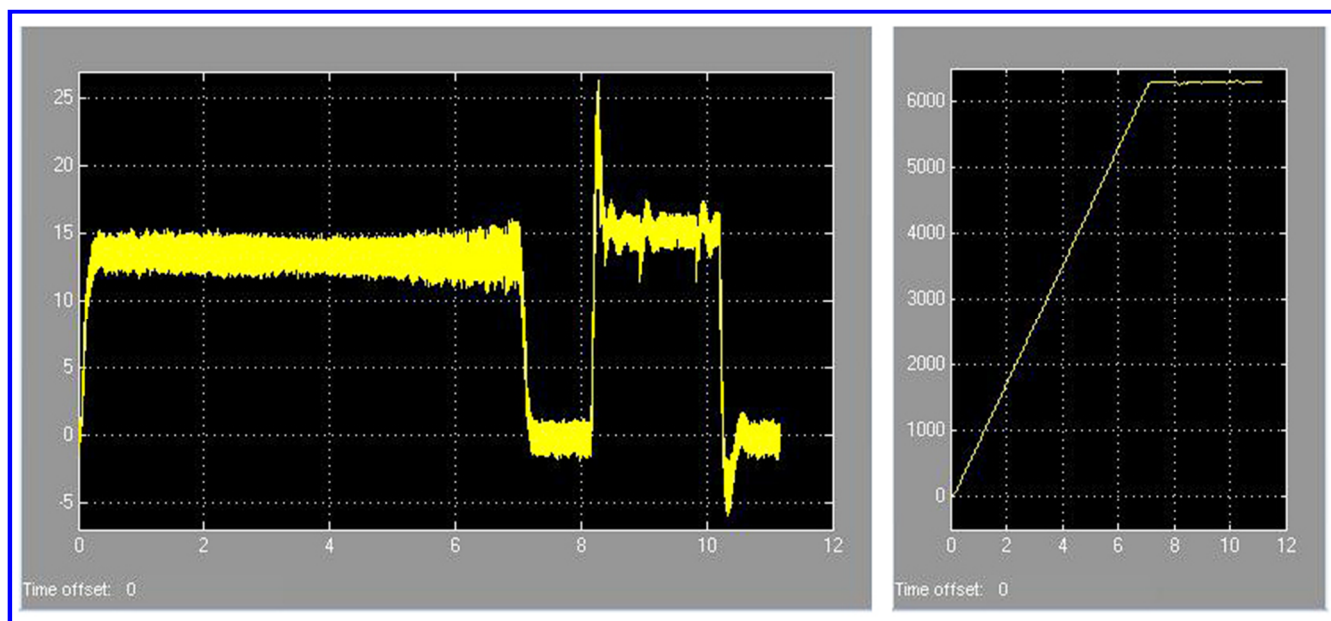


Рис. 6. Осциллограммы момента и угловой скорости при 60 000 об/мин

вычисления угла поворота ротора и угловой скорости. Следует отметить, что выполнение алгоритма фильтра Калмана требует значительных временных ресурсов.

Выводы

Систему управления без использования датчика скорости для высокоскоростного синхронного дви-

гателя возможно реализовать на базе системы с источником тока.

Помехи, появляющиеся при вычислении угла поворота ротора, возможно исключить с помощью рассмотренного алгоритма фильтра Калмана.

Применение цифровых интеграторов с малым шагом квантования при вычислении угла поворота ротора и угловой скорости позволяет отказаться от использования фильтра Калмана.

Литература

1. Ковшаров А. Н. Выбор системы управления для высокоскоростного синхронного двигателя с постоянными

магнитами / А. Н. Ковшаров // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 137. – № 6. – С. 3 – 6.

2. Балакришнан А. В. Теория фильтрации Калмана / А. В. Балакришнан. – М.: Мир, 1988. – 168 с.

3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

Поступила в редакцию 14.04.2014

*Алексей Николаевич Ковшаров, аспирант, инженер-программист,
т. (495) 623-36-21, e-mail: ank2003@mail.ru.*