

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНДИКАТОРА ПАРАМЕТРОВ РОТОРА АД В СРЕДЕ SIMULINK (MATLAB)

Мирсаитов К.М.

Севастопольский национальный технический университет

mmkot@i.ua

**Введение.** Управляемый асинхронный электропривод с векторным управлением приобретает все большее распространение, а для крупнейших мировых производителей силовой электроники стал техническим стандартом [1]. Система векторного управления замкнута, обратная связь обычно реализуется косвенно, т. е. математическим моделированием. Для построения математической модели должны быть известны параметры управляемого электродвигателя. Созданием установок и экспериментальных стендов для определения этих параметров занимаются многие творческие коллективы и организации. В Украине запатентовано несколько стендов. Однако среди них нет ни одного устройства с возможностью мониторинга параметров АД непосредственно в процессе работы. На этих стендах АД исследуется в лабораторных условиях, т. е. извлечен из производственного процесса. Отсюда следует, что измерение происходит при текущем состоянии двигателя, а изменение параметров АД при остальных условиях работы не отслеживаются. Вопросам непосредственного мониторинга состояния АД в рабочем режиме уделено мало внимания. Примером может служить работа [2], в которой приводятся возможные пути контроля АД по спектральным характеристикам легко измеряемых величин – токов и напряжений статора. Создание систем векторного управления с блоком непосредственного измерения параметров АД даст возможность исключить обратную связь по частоте вращения ротора, без которой подобные системы могут работать нестабильно.

**Задача исследования.** Владение информацией о текущем актуальном состоянии параметров управляемого объекта дает возможность увеличить стабильность работы бездатчиковых систем векторного управления. Наиболее неустойчивым параметром АД является постоянная времени ротора, на которую оказывают влияние такие факторы, как нагрев обмоток, действие эффекта вытеснения тока при различных частотах вращения, механические деформации стержней ротора. Задачей данной работы является создание и экспериментальное исследование математической модели индикатора постоянной времени ротора АД для последующей его физической реализации.

**Решение поставленной задачи.** Примем за основу метод идентификации параметров АД, изложенный в [3]. Работа индикатора основана на следующих теоретических утверждениях:

1. При не синусоидальном напряжении питания АД, в простейшем случае, можно рассматривать как суперпозицию множества АД с одинаковыми электромагнитными параметрами, соединенные муфтами или имеющие один общий вал (рисунок 1). На каждый из них по отдельности действуют гармоники разложения несинусоидального поля. Работу системы двигателей на рисунке 1 описывает система дифференциальных уравнений (1).

Следует отметить, что суперпозиция рассматривается только для электромагнитных величин. Момент инерции ротора остается прежним. Более подробно анализ спектра полей в зазоре электрической машины рассмотрен в [4].

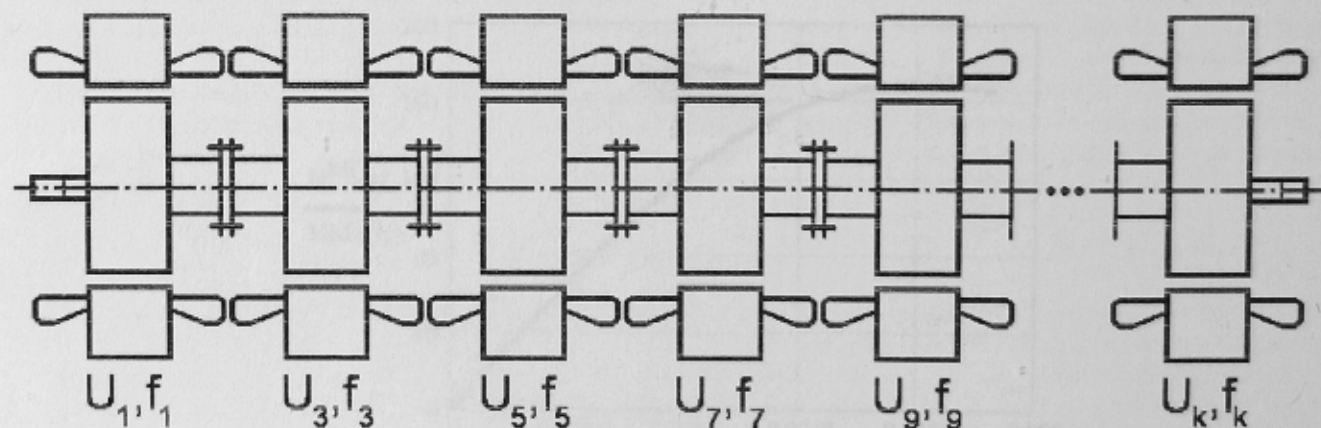


Рисунок 1 – Эквивалентное представление АД при моделировании двух гармоник в воздушном зазоре

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = \sum_{j=1}^k \left( u_{sdj} - \psi_{sqj} \omega_0 \cdot j - r'_s \left( -a \cdot \psi_{sdj} + c \cdot \psi_{rdj} \right) \right) \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} = \sum_{j=1}^k \left( u_{sqj} + \psi_{sdj} \omega_0 \cdot j - r'_s \left( -a \cdot \psi_{sqj} + c \cdot \psi_{rdj} \right) \right); \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} = \sum_{j=1}^k \left( -\psi_{rqj} (\omega_0 \cdot j - p\omega) - r'_r \left( -b \cdot \psi_{rdj} + c \cdot \psi_{sdj} \right) \right); \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = \sum_{j=1}^k \left( \psi_{rdj} (\omega_0 \cdot j - p\omega) - r'_r \left( -b \cdot \psi_{rqj} + c \cdot \psi_{sqj} \right) \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_r} a \sum_{j=1}^k \left( \psi_{sqj} \psi_{rdj} - \psi_{sdj} \psi_{rqj} \right) - M_C \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $a = L'_R / (L_m^2 - L_S L'_R)$ ;  $b = L_S / (L_m^2 - L_S L'_R)$ ;  $c = L_m / (L_m^2 - L_S L'_R)$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $J$  – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя;  $L_S$  – индуктивность фазы статора;  $L'_R$  – индуктивность фазы ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;  $M_C$  – статический момент нагрузки;  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $r'_s(r'_r)$  – активное сопротивление фазы статора (ротора);  $u_{sd}, u_{sq}$  – проекции напряжения статора на оси d, q для соответствующей гармоники  $j$ ;  $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$  – проекции потокосцеплений статора и ротора на оси d, q для соответствующей гармоники  $j$ ;  $\omega_0$  – синхронная скорость;  $k$  – общее число рассматриваемых гармоник.

2. Высшие гармоники создают незначительные электромагнитные моменты. Частота вращения ротора определяется первой (основной) гармоникой. Так как амплитуда каждой гармоники является обратно пропорциональной функцией своего номера, высшие моменты имеют незначительную мощность. Поэтому участием высших гармоник в формировании основного электромагнитного момента можно пренебречь.

3. Номинальная частота работы  $k$ -го АД в  $k$  раз превышает номинальную частоту вращения ротора основной гармоники. Следовательно, начиная с  $k = 3$  и выше, соответствующий АД уже находится в опрокинутом состоянии. Будем условно считать, что для АД с  $k = 9$  ротор, вращающийся с номинальной скоростью  $k = 1$ , условно заторможен, т. е. находится в режиме короткого замыкания.

4. Для АД в режиме короткого замыкания можно измерять параметры опыта короткого замыкания. Для вычисления параметров нужной гармоники напряжения и тока статора подвергаются цифровой фильтрации. Результаты фильтрации – искомые напряжение и ток короткого замыкания двигателя.

5. Формирование напряжения питания АД ШИМ-инвертором обуславливает наличие в цепи питания широкого спектра высших гармоник, подходящих для работы индикатора. В опыте моделируется работа автономного инвертора с ШИМ-модуляцией. Несмотря на наличие сглаживающего фильтра, в напряжении инвертора присутствует множество высших гармоник, появление которых обусловлено мощными импульсами с резкими фронтами.

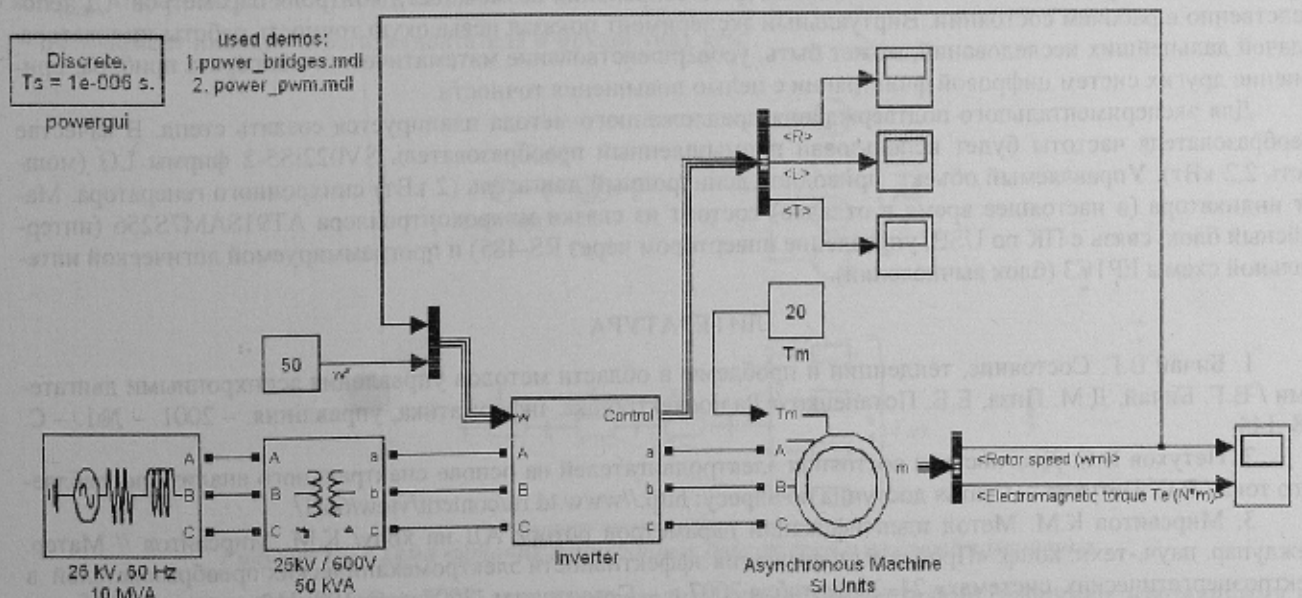


Рисунок 2 – Математическая модель экспериментальной установки

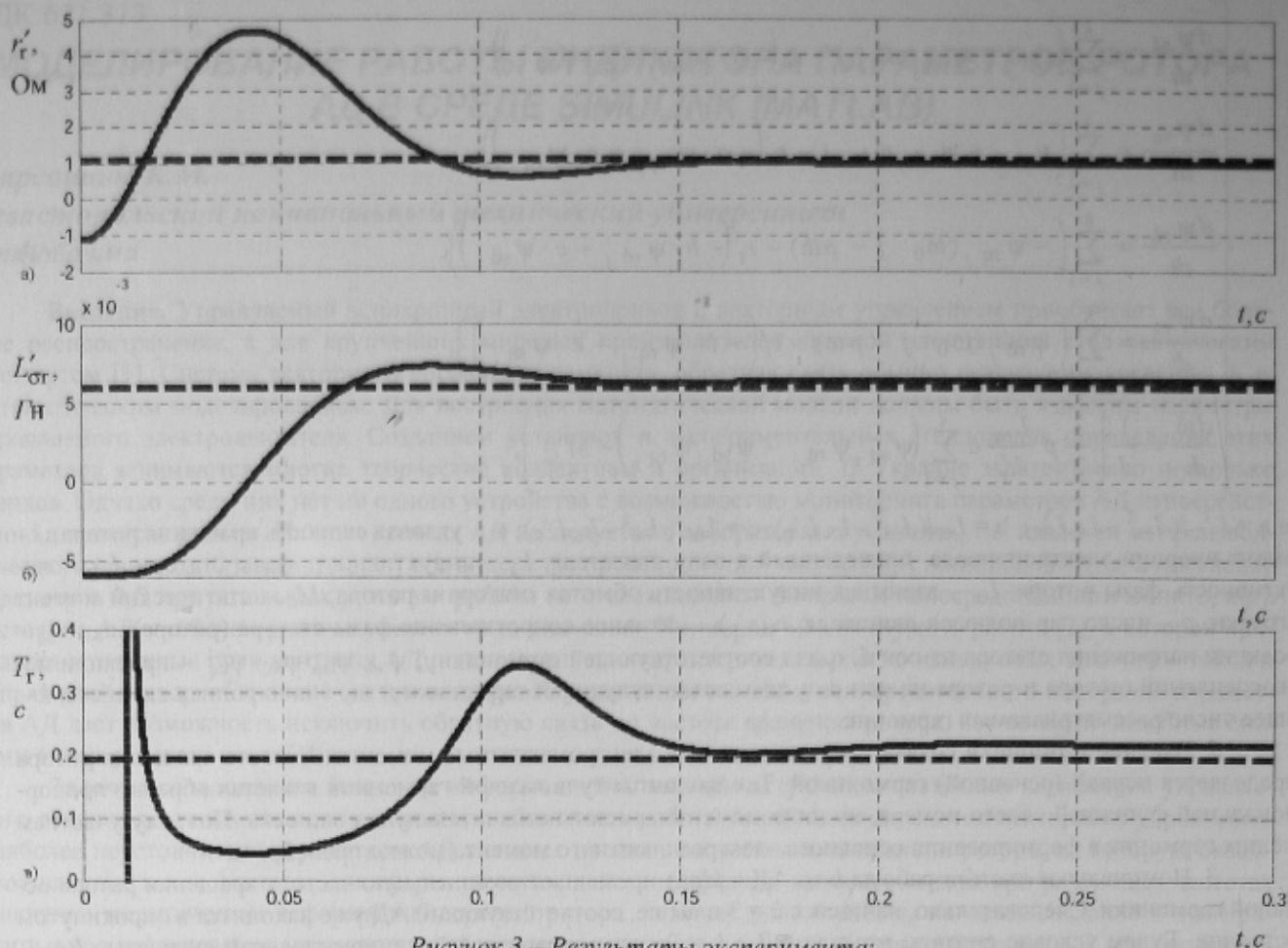


Рисунок 3 – Результаты эксперимента:

- а) индикация активного сопротивления фазы ротора (штриховая линия – истинное значение);  
 б) индикация индуктивности фазы ротора (штриховая линия – истинное значение);  
 в) индикация постоянной времени цепи ротора (штриховая линия – истинное значение).

В среде активного моделирования Simulink (MATLAB) создана модель системы векторного управления АД с ориентацией по полю машины и индикатором параметров ротора (рисунок 2). Индикатор вычисляет три параметра: активное сопротивление фазы ротора, индуктивность фазы ротора и постоянную времени цепи ротора. Номер рабочей гармоники  $k = 9$ . Время установки цифрового фильтра 0,2 с. Погрешность вычисления оценки параметров 10 %.

**Выводы.** Практическая ценность индикатора в сохранении возможности контроля параметров АД непосредственно в рабочем состоянии. Виртуальный эксперимент показал невысокую точность работы индикатора. Задачей дальнейших исследований, может быть, усовершенствование математического аппарата прибора, применение других систем цифровой фильтрации с целью повышения точности.

Для экспериментального подтверждения предложенного метода планируется создать стенд. В качестве преобразователя частоты будет использован промышленный преобразователь SV022iS5-2 фирмы LG (мощность 2,2 кВт). Управляемый объект: приводной асинхронный двигатель (2 кВт) синхронного генератора. Макет индикатора (в настоящее время в отладке) состоит из связки микроконтроллера AT91SAM7S256 (интерфейсный блок: связь с ПК по USB, управление инвертором через RS-485) и программируемой логической интегральной схемы EP1C3 (блок вычислений).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бичай В.Г. Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями / В.Г. Бичай, Д.М. Пиза, Е.Е. Потапенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2001. – №1. – С. 138–144.
2. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов. – Статья доступна по адресу: <http://www.td.ru/content/view/66/1/>.
3. Мирсаитов К.М. Метод идентификации параметров ротора АД на ходу / К.М. Мирсаитов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» 24–28 сентября 2007 г. – Севастополь, 2007. – С. 109–113.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.