

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНО-ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗДАТЧИКОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассмотрены вопросы применения адаптивно-векторной системы управления бездатчиковым асинхронным электроприводом. Приведены математическая модель системы и результаты машинного эксперимента.

ключевые слова: электропривод, бездатчиковый асинхронный электропривод, система управления, адаптивно-векторная система управления

Задача построения высококачественного асинхронного электропривода с векторным управлением без использования каких-либо датчиков, пристроенных к валу или встроенных в двигатель, постоянно привлекает внимание разработчиков с момента появления самого термина «векторное управление» применительно к асинхронному двигателю в начале 1970-х годов. Область применения таких электроприводов определяется следующими условиями:

- 1) механизм предъявляет повышенные требования к быстродействию привода;
- 2) в приводе требуется регулирование электромагнитного момента на валу двигателя;
- 3) не требуется высокая статическая точность и широкий диапазон регулирования скорости (диапазон не более 100);
- 4) установка датчика скорости на вал двигателя невозможна по условиям эксплуатации, технологическим, стоимостным или прочим ограничениям.

Типичными объектами являются электроприводы (ЭП) подъемно-транспортных средств, механизмов намотки, экструдеров работающих в пожароопасных, взрывоопасных, химически и радиоактивных средах, в условиях повышенных вибраций и ударных механических нагрузок.

1. Общие сведения о бездатчиковых асинхронных приводах и основные проблемы, связанные с построением бездатчикового векторного электропривода

В настоящее время бездатчиковые асинхронные приводы с векторным управлением представлены практически всеми ведущими фирмами-производителями преобразователей частоты. При этом характеристики большинства этих приводов оказываются весьма скромными. В частности, полоса пропускания контура скорости, как правило, не превышает (5–7) Гц, а общий диапазон регулирования скорости (вверх и вниз от номинальной) не более (20–100), что вполне достижимо и в системе частотного управления с векторной ориентацией переменных в установившихся режимах работы. Большинство же производителей преобразователей частоты вообще не заявляют в технической документации полосу пропускания и диапазон регулирования скорости. В этом случае получить подобную информацию удастся только в результате проведения стендовых испытаний.

Таким образом, если рассматривать указанные характеристики регулирования скорости, то практически «стирается грань» между бездатчиковыми электроприводами с частотным и векторным управлением. Характеристики асинхронных векторных электроприводов без датчика скорости могут существенно превышать аналогичные характеристики систем частотного управления. В частности, полоса пропускания контура скорости может составлять более 30 Гц, а в диапазоне регулирования скорости не менее 100 обеспечиваются значительно меньшие статические и динамические ошибки. Однако для достижения таких результатов приходится решить ряд проблем.

Основные проблемы, связанные с построением бездатчикового векторного электропривода, заключаются в следующем:

- 1) наблюдатель состояния асинхронного двигателя (АД), построенный на основе решения полной системы уравнений электрического равновесия для статора и ротора по доступной информации о напряжениях и токах статора, способен обеспечить приемлемую точность вычисления потокосцепления и скорости только в ограниченном диапазоне частот. Это связано с известной проблемой введения начальных условий при частотах, близких к нулевой;
- 2) следующей проблемой является чувствительность электропривода к изменению его параметров в процессе работы. Прежде всего это относится к температурным изменениям активных сопротивлений статора и ротора, а также к изменению взаимной индуктивности в зависимости от тока цепи намагничивания;
- 3) третьей проблемой является получение необходимой точности оценки эквивалентных (усредненных на интервале расчета процессов в наблюдателе состояния) значений токов и напряжений статора. На точность оценки эквивалентных напряжений в области малых частот основной гармоники и высоких частот модуляции существенно влияет «мертвое время» и задержки переключения ключей инвертора.

2. Структурная схема системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом

Структурная схема системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом приведена на рис. 1.

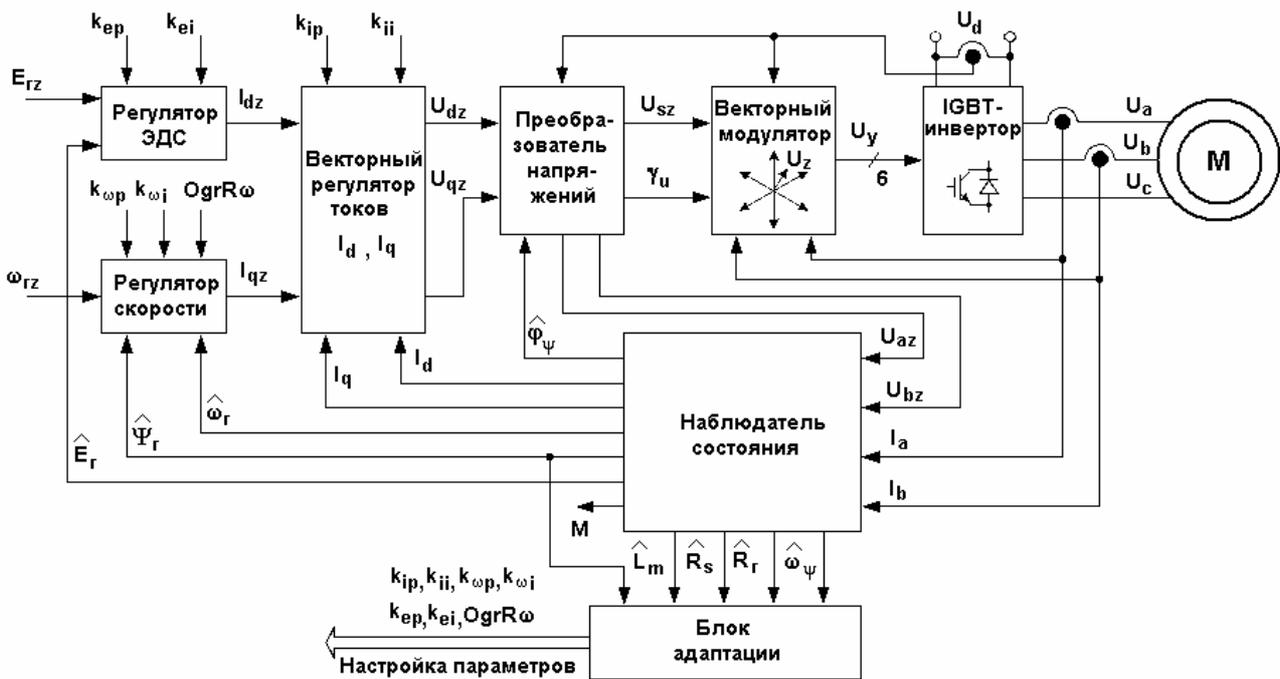


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Преобразователь напряжений включает в себя ограничитель заданного напряжения статора по осям d и q и преобразователь координат: ортогональная система (d, q) → полярная система → естественная трехфазная система (a, b, c), неподвижная относительно статора, и блок компенсации запаздывания системы управления.

Векторный модулятор реализует «треугольный» алгоритм пространственно-векторного формирования выходного напряжения IGBT-инвертора с функцией компенсации «мертвого времени» и задержек переключения силовых ключей.

Наблюдатель состояния реализует вычисление всех переменных и параметров двигателя, необходимых для реализации алгоритма адаптивно-векторного управления, по информации о двух фазных токах статора и двух заданных значениях фазных напряжений.

Структурная схема наблюдателя состояния приведена на рис. 2.

Для вычисления необходимых переменных вводится ортогональная система координат (x, y), вращающаяся синхронно с частотой поля. Ее угловое положение не фиксируется относительно какой-либо переменной или оси двигателя и может быть произвольным, т. е. «плавающим».

Принципиальными факторами являются не угловое положение, а синхронность системы (x, y), которая обеспечивает в установившихся режимах работы двигателя постоянные значения вычисляемых переменных, а также ее относительно высокая инерционность (скорость изменения углового положения должна быть ограничена), что обеспечивает желаемую степень устойчивости цифровых вычислительных алгоритмов. В качестве частоты вращения системы координат (x, y) могут приниматься

переменные, величина которых в установившихся режимах работы равна частоте вращения поля.

Это могут быть частоты вращения векторов потокосцеплений, отфильтрованные значения частот вращения векторов напряжения или тока статора.

В рассматриваемом случае частота вращения системы (x, y) принята равной оценке частоты вращения вектора потокосцепления ротора ω_ψ .

Угловое положение и частота системы координат на k -интервале расчета переменных наблюдателя вычисляются по выражениям:

$$\begin{aligned} \omega_{x,k} &= \hat{\omega}_{\psi,k-1}; \\ \omega_{x,k} &= \varphi_{x,k-1} + \omega_{x,k} T_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_0 – интервал расчета переменных наблюдателя.

Преобразование токов и преобразование напряжение из системы координат (a, b, c) в систему координат (x, y) осуществляется по выражениям:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{2}{\sqrt{3}} [U_{az} \sin(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + U_{bz} \sin(\varphi_{x,k-1})] \\ U_y &= \frac{2}{\sqrt{3}} [U_{az} \cos(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + U_{bz} \cos(\varphi_{x,k-1})] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{2}{\sqrt{3}} [I_a \sin(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \sin(\varphi_{x,k})] \\ I_y &= \frac{2}{\sqrt{3}} [I_a \cos(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \cos(\varphi_{x,k})] \end{aligned}, \quad (3)$$

где I_a, I_b, U_{az}, U_{bz} – токи и заданные напряжения статора фаз a и b .

Использование для преобразования напряжений углового положения системы координат на предыдущем интервале расчета связано с наличием запаздывания в измерении тока по отношению к формированию напряжения. Переход в полярную систему координат, неподвижную относительно стато-

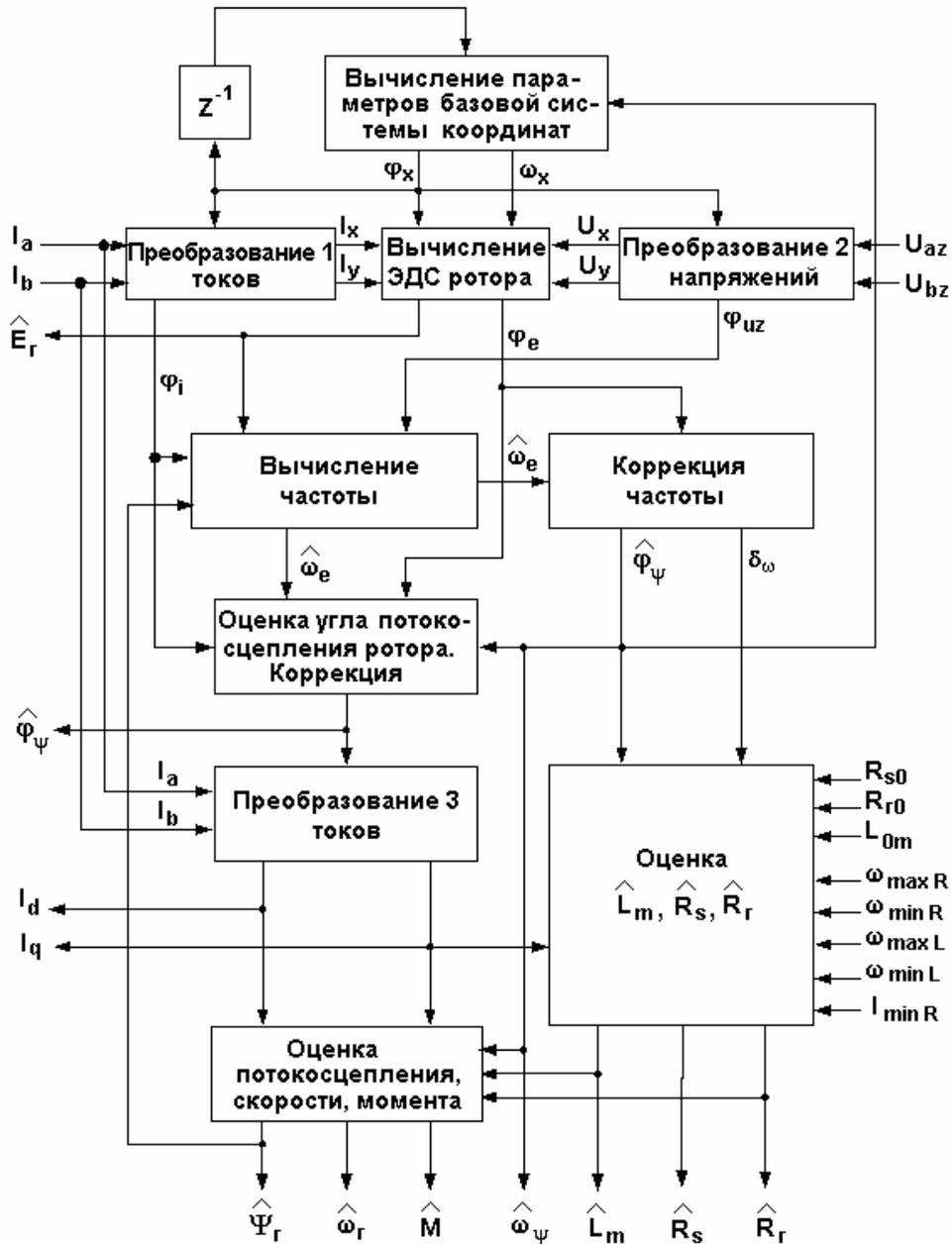


Рис. 2. Структурная схема наблюдателя состояния

ра, дает угловые положения векторов заданного напряжения и тока статора.

Расчет ЭДС ротора осуществляется на основе цифрового решения уравнений статорной цепи АД, записанных в системе координат (x, y) :

$$\begin{cases} U_x = R_s I_x + \sigma L_s (dI_x / dt) - \sigma L_s \omega_x I_y + E_{rx} \\ U_y = R_s I_y + \sigma L_s (dI_y / dt) - \sigma L_s \omega_x I_x + E_{ry} \end{cases}, \quad (4)$$

где $E_{rx} = (L_m/L_r)(d\Psi_{rx}/dt) - \omega_x (L_m/L_r)\Psi_{ry}$;
 $E_{ry} = (L_m/L_r)(d\Psi_{ry}/dt) - \omega_x (L_m/L_r)\Psi_{rx}$ – проекции вектора ЭДС ротора в системе координат (x, y) ;

Ψ_{rx}, Ψ_{ry} – проекции вектора потоко-сцепления ротора в системе координат (x, y) ;

$\sigma = 1 - (L_{2m}/L_s L_r)$ – коэффициент рассеяния;

L_s, L_r, L_m – индуктивности статора, ротора и взаимоиנדукции;

R_s – активное сопротивление статора.

Преобразование в полярную систему координат, неподвижную относительно статора, дает оценки модуля и углового положения вектора ЭДС ротора. Вычисление модуля первой оценки частоты вращения вектора потоко-сцепления ротора выполняется с учетом предположения, что трансформаторная составляющая ЭДС ротора пренебрежимо мала в сравнении с ЭДС вращения, по выражению:

$$|\hat{\omega}_e| = \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{\hat{E}_r}{\hat{\Psi}_r}, \quad (5)$$

где $\hat{\Psi}_r$ – оценка потоко-сцепления ротора.

Знак частоты вращения вектора потоко-сцепления ротора вычисляется на основе оригинального алгоритма по информации об угловых положениях векторов заданного напряжения и тока статора, модуле частоты вращения на текущем и предыдущих

Структурные схемы регулятора скорости, блока векторного регулятора токов и преобразователя напряжения представлены, соответственно, на рис. 4, 5 и 6.

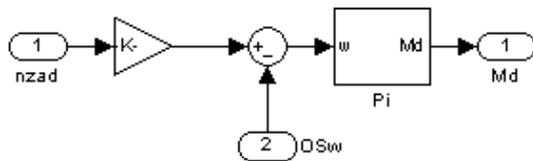


Рис. 4. Структура модели регулятора скорости

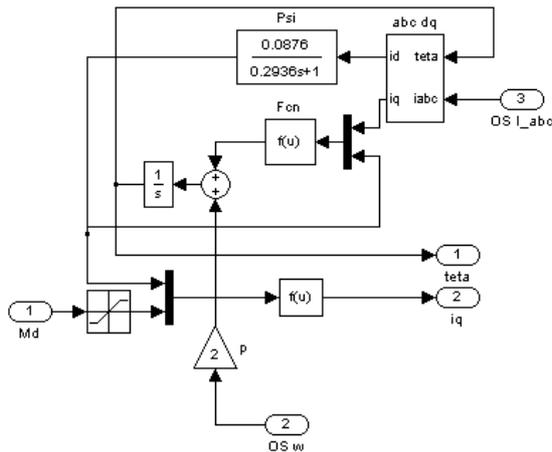


Рис. 5. Структура модели векторного регулятора токов

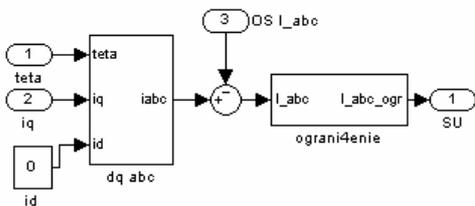


Рис. 6. Структура модели преобразователя напряжения

4. Исследование работы системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом

РЕЖИМ «ПУСК»

Кривые, характеризующие динамику работы системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом в режиме «ПУСК», представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, в начальный момент времени, непосредственно при пуске двигателя, наблюдается резкий скачок тока статора. Для облегчения пуска двигателя момент нагрузки необходимо подавать на разогнанный двигатель.

РЕЖИМ ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛА ЗАДАНИЯ СКОРОСТИ

Исследуем данную систему на пригодность отработки меняющегося во времени сигнала задания частоты вращения АД.

Кривые, характеризующие динамику данного режима работы, и сигнал задания представлены на рис. 8.

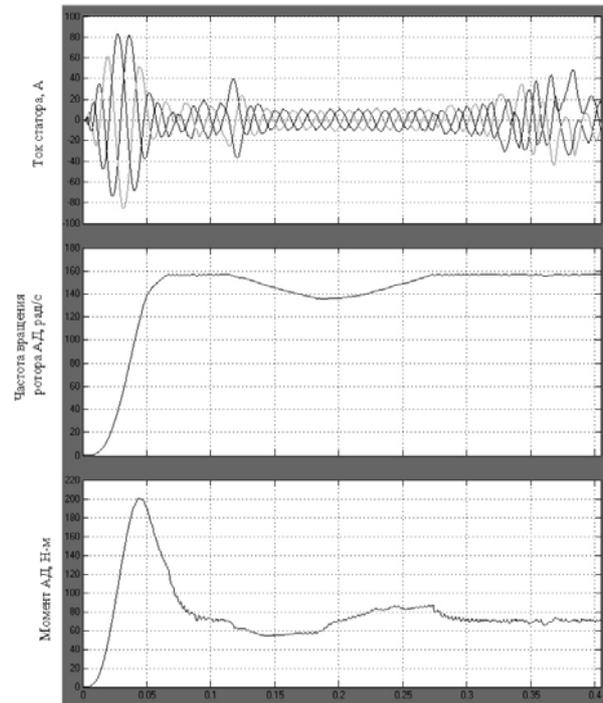


Рис. 7. Динамика работы системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом в режиме «ПУСК»

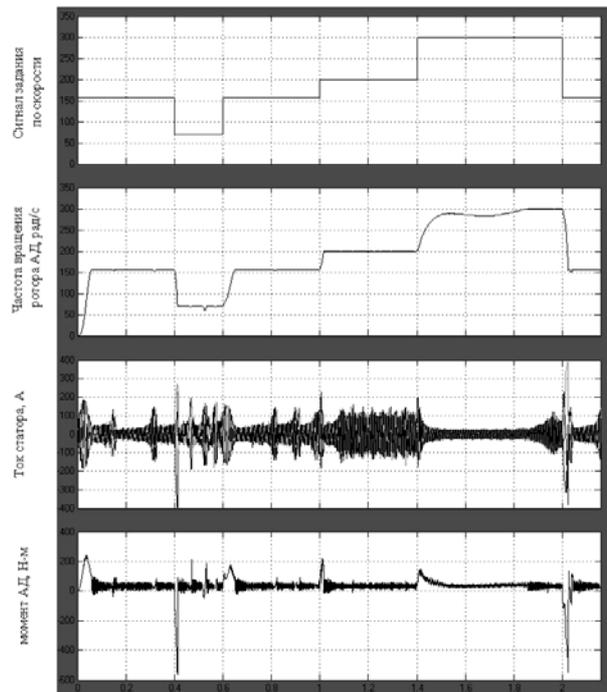


Рис. 8. Сигнал задания скорости и кривые, характеризующие динамику работы системы

Из него следует, что система полностью отрабатывает сигнал задания, позволяет быстро регулировать частоты вращения вала двигателя. Так же, система предусматривает возможность кратковременного превышения частоты вращения вала двигателя над номинальным значением.

РЕЖИМ «ПЕРЕГРУЗКА»

Проанализируем динамику системы адаптивного управления в режиме «ПЕРЕГРУЗКА».

Кривая изменения момента нагрузки и динамика режима «ПЕРЕГРУЗКА» показана на рис. 9.

При использовании адаптивно-векторной системы управления допускаются кратковременные перегрузки.

Литература

1. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н., Монов Д. А. Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных // *Электротехника*. 2001. № 12.
2. Архангельский Н. Л., Курнышев Б. С., Виноградов А. Б., Лебедев С. К. Система векторного управления асинхронным электроприводом с идентификатором состояния // *Электричество*. 1991. № 11.
3. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // *Электротехника*. 2003. № 7.

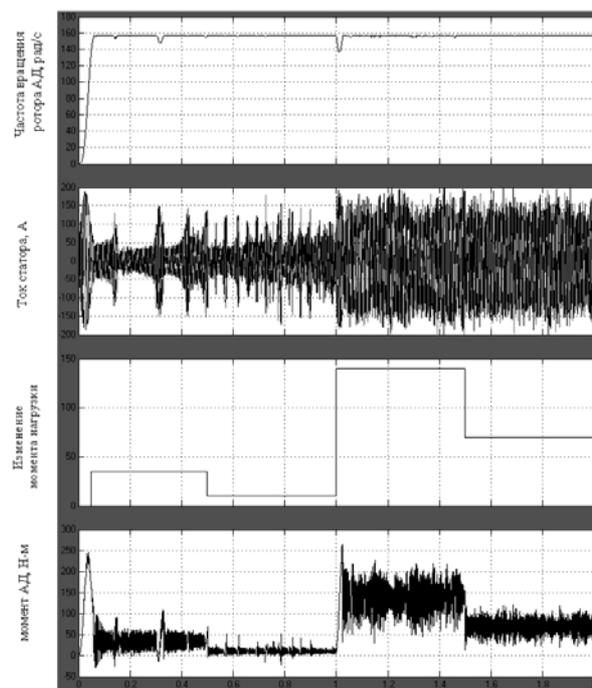


Рис. 9. Изменение момента нагрузки и динамика работы системы адаптивно-векторного управления асинхронным электроприводом в режиме «ПЕРЕГРУЗКА»

Международный институт компьютерных технологий
Воронежский государственный технический университет

MATHEMATICAL MODEL OF AN ADAPTIVE-VECTOR CONTROL SYSTEM OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRICAL DRIVE WITHOUT USAGE OF SENSORS

A.V. Kyksin, A.V. Romanov

In paper the problems of application of an adaptive-vector control system of the asynchronous electrical drive without usage of sensors surveyed. Are reduced mathematical model of the system and outcomes of machine experiment.

key words: electrical drive, asynchronous electrical drive without usage of sensors surveyed, control system, adaptive-vector control system