

## НАБЛЮДАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА В СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В работе рассматривается бездатчиковая система скалярного управления асинхронным приводом с контурами регулирования скорости и активной составляющей тока. Скорость ротора вычисляется по линеаризованной зависимости частоты скольжения от активной составляющей тока, полученной для схемы с  $IR$ -компенсацией. Активная составляющая тока определяется как сумма проекций измеренных  $\alpha, \beta$ -компонент тока на обобщенный вектор напряжения. Произведена оценка погрешности линеаризации. Построена модель подчиненного регулирования с предложенным наблюдателем скорости ротора, с помощью которой произведена оценка точности работы наблюдателя при изменении задаваемой скорости вращения ротора и определен диапазон регулирования, при котором статическая ошибка не превышает 1%.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый привод, ШИМ, диапазон регулирования скорости, активная составляющая тока статора, частота скольжения.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется разработке систем управления электроприводом без датчика скорости на валу двигателя. Такая тенденция вызвана стремлением к уменьшению стоимости и повышению надежности электропривода. В некоторых случаях отказ от применения датчиков скорости обусловлен конструктивными особенностями привода, исключающими возможность установки такого датчика.

Большинство работ, посвященных косвенному определению скорости ротора, относятся к векторным системам частотного управления, используемых для обеспечения высокого качества регулирования ответственных приводных механизмов [1-8].

Применительно к системам скалярного частотного управления вопросу построения наблюдателя скорости уделяется недостаточно внимания. Отметим, что предложенные в публикациях [9,10] способы косвенного определения скорости не обеспечивают точности, сравнимой с точностью, достигаемой в векторных системах. В то же время скалярные системы управления до сих пор востребованы и входят в базовый набор функций преобразователей частоты как отечественного, так и зарубежного производства. Область применения систем скалярного управления стремятся расширить за счет придания этим системам динамических свойств векторных систем. Примеры таких приводов на основе датчиков положения ротора рассмотрены в публикациях [11,12].

В настоящее время основной областью применения систем скалярного управления является привод механизмов с вентиляторной характеристикой, режим работы которых характеризуется небольшим диапазоном регулирования (1:10) и отсутствием в процессе работы резких изменений момента сопротивления. Ввиду широкого использования вентиляторов и насосов в различных технологических установках отказ от датчиков положения ротора в системах скалярного частотного управления приводом позволит заметно улучшить стоимостные показатели и показатели надежности таких установок. Очевидно, что в этом слу-

чае наблюдатель скорости, как и сама система скалярного управления, должен быть относительно простыми и не требовать сложных вычислений.

Работа посвящена созданию бездатчиковой системы скалярного частотного управления приводом на основе наблюдателя, использующего связь скорости вращения ротора с активной составляющей тока статора.

### I ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Для косвенного измерения скорости вращения ротора асинхронного двигателя  $\omega = \omega_s - \omega_r$  необходимо знать частоту вращающегося магнитного поля  $\omega_s$  и частоту ЭДС ротора или частоту скольжения  $\omega_r$ . Частота  $\omega_s$  задается законом управления частотно-регулируемым приводом, частота  $\omega_r$  требует вычисления на основе непосредственно измеряемых величин – напряжения и тока статорных обмоток.

Рассмотрим определение скорости вращения ротора АД на основе зависимости активной составляющей тока статора от частоты ЭДС ротора. Для получения этой зависимости воспользуемся  $\Gamma$ -образной схемой замещения АД (рис. 1). Схема замещения построена для скалярной системы управления, в которой используется  $IR$ -компенсация. Функция компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора является стандартной в современных преобразователях частоты [1].

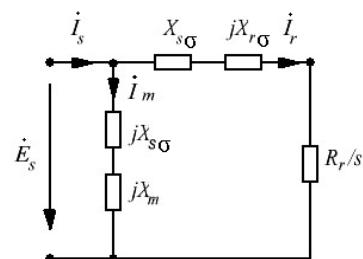


Рис. 1.  $\Gamma$ -образная схема замещения АД

Ток статора  $I_s = I_{sa} - jI_{sr}$  определяется напряжением и проводимостью ветвей схемы замещения АД

$$I_{sa} = \frac{E_s(R_r/s)}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2}; \quad (1)$$

$$I_{sr} = \frac{E_s(X_{r\sigma} + X_{s\sigma})}{(R_r/s)^2 + (X_{r\sigma} + X_{s\sigma})^2} + \frac{E_s}{X_{s\sigma} + X_m}, \quad (2)$$

где  $R_r$  – активное сопротивление ротора;  $X_{r\sigma}$ ,  $X_{s\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния ротора и статора;  $s$  – скольжение.

Для получения явной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора преобразуем формулу (1) с учетом закона управления  $(E/\omega_s) = \gamma = \text{const}$  и выражения  $s = \omega_r/\omega_s$ :

$$I_{sa} = \frac{\gamma \omega_r R_r}{1 + \omega_r^2 \tau^2}, \quad \tau = (L_{s\sigma} + L_{r\sigma})/R_r. \quad (3)$$

С учетом малости величины  $\omega_r \tau \ll 1$  выполним линеаризацию зависимости (3).

$$I_{sa} = k_a \omega_r. \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности  $k_a$  определим из условия совпадения нелинейной зависимости (3) с линеаризованной функцией (4) в номинальном режиме:

$$k_a = \frac{\gamma \omega_{rnom}}{R_r} \frac{1}{1 + (\omega_{rnom} \tau)^2} = \frac{I_{sanom}}{\omega_{rnom}}. \quad (5)$$

Активная составляющая тока статора и частота роторной ЭДС в номинальном режиме определяются по паспортным данным двигателя:

$$\omega_{pnom} = \omega_{0nom} s_{nom}, \quad I_{sanom} = I_{nom} \cos \varphi_{nom}.$$

Оценка частоты скольжения по измеренному значению активной составляющей тока статора позволяет определить скорость вращения ротора по формуле

$$\omega = (\omega_s - k_\omega I_{sa}) / z_p, \quad k_\omega = 1/k_a, \quad (6)$$

где  $z_p$  – число пар полюсов.

Для оценки текущего значения активной составляющей тока используется представление параметров режима в неподвижной  $\alpha, \beta$  и системе координат  $x, y$ , вращающейся со скоростью  $\omega_s$  (рис. 2).

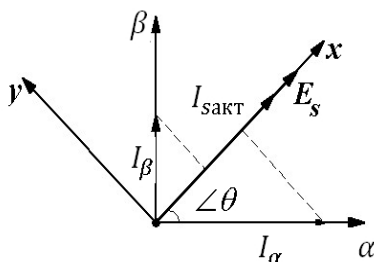


Рис. 2. Векторная диаграмма токов статора в системах координат  $\alpha, \beta$  и  $x, y$

Положение вектора основной гармоники напряжения  $\vec{E}_s$  задается обобщенным вектором системы модулирующих напряжений ШИМ инвертора  $\vec{e}_s$ , который

ориентирован вдоль оси  $x$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt. \quad (7)$$

При известном угле положения  $\theta$  и измеренных  $\alpha, \beta$  – компонентах вектора тока  $\vec{I}_s$  активная составляющая тока  $I_{sa}$  вычисляется как сумма проекций токов  $i_\alpha$  и  $i_\beta$  на ось  $x$ :

$$I_{sa} = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta. \quad (8)$$

Для получения проекций  $i_\alpha$  и  $i_\beta$  по измеренным токам  $i_a, i_b, i_c$  используется преобразование

$$i_\alpha = i_a, \quad i_\beta = (i_b - i_c)/\sqrt{3}. \quad (9)$$

## II ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Найдем ошибку вычисления частоты скольжения по линеаризованной формуле

$$W = (1 - \omega_r^*/\omega_r) \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $\omega_r^*$  – оценка частоты скольжения;  $\omega_r$  – решение уравнения (3) для рабочего участка механической характеристики,

$$\omega_r = \frac{\gamma}{2R_r \tau^2 I_{sa}} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{(2R_r \tau^2 I_{sa})^2} - \frac{1}{\tau^2}}. \quad (11)$$

Из формулы (11) следует, что при использовании  $IR$ -компенсации погрешность линеаризации зависит от параметров схемы замещения и не зависит от частоты поля статора. График зависимости относительной погрешности линеаризации от скольжения для двигателей разной мощности 7,5, 37 и 160 кВт показан на рис. 3.

Влияние мощности двигателя на погрешность связано с зависимостью параметра  $\tau$  от мощности двигателя. Например, для двигателя мощностью 160 кВт имеем  $\tau^2 \approx 10^{-3}$ , для двигателя 7,5 кВт –  $\tau^2 \approx 10^{-5}$ .

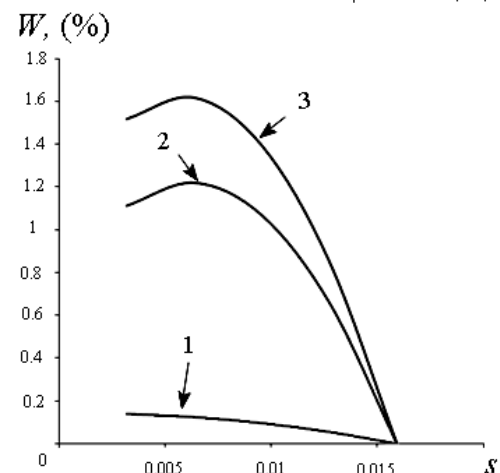


Рис. 3. Относительная погрешность определения частоты скольжения для двигателей мощностью 7,5 кВт (кривая 1), мощностью 37 кВт (кривая 2) и мощностью 160 кВт (кривая 3)

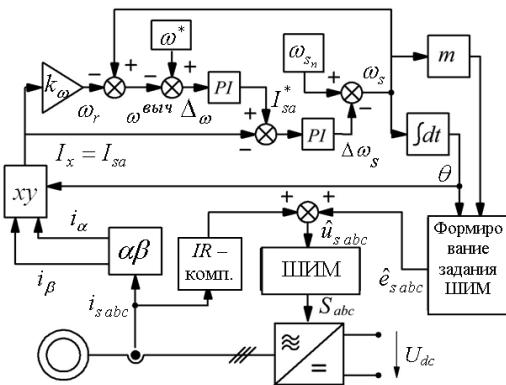
Из графиков видно, что при снижении механиче-

ской нагрузки двигателя погрешность линеаризации возрастает до значения  $W=1,6\%$ .

### III СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Исследование предложенного способа бездатчикового определения скорости вращения ротора в системе скалярного управления асинхронным двигателем выполнено с помощью модели привода в среде MatLab/Simulink. Модель включает асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, модель вентильной нагрузки, датчики тока и блок синусоидальной ШИМ. Использовался двигатель 4A200M2Y3 с параметрами [14]:  $P_{\text{ном}}=37$  кВт,  $U_{\text{ф.н}}=220$  В,  $\omega_s=3000$  об/мин,  $s=0,02$ ,  $R_s=0,084$  Ом,  $L_{\sigma s}=0,0009$  Гн,  $R_r'=0,0564$  Ом,  $L_{\sigma r'}=0,0011$  Гн,  $L_m=0,0109$  Гн,  $U_{dc}=540$  В.

**рис. 4.** Входными сигналами для системы управления служат токи статора  $i_a, i_b, i_c$ , которые затем преобразуются в проекции вращающегося вектора на оси  $\alpha, \beta$  стационарной системы координат. Используя данные о положении  $\theta$  обобщенного вектора трехфазной системы модулирующих напряжений,  $\alpha, \beta$  – компоненты проецируются на ось вращающейся системы координат, в результате чего формируется активная составляющая тока статора  $I_{sa}$ . Частота скольжения оценивается по линейной зависимости  $\omega_s = k_{\omega} I_{sa}$ . Сравнение вычисленной частоты вращения ротора по формуле (5) с заданным значением тока дает ошибку  $\Delta\omega = \omega^* - \omega^{est}$ , которая поступает на вход ПИ-регулятора скорости, выходом которого является задание по активной составляющей тока  $I_{sa}^*$  для внутреннего контура регулирования тока.



**Рис. 4. Структура системы управления**

Выходным сигналом ПИ-регулятора тока является величина  $\Delta\omega_s$ , с помощью которой формируется частота модулирующего напряжения  $\omega_s = \omega_{snom} - \Delta\omega_s$ , где  $\omega_{snom}$  – номинальная частота. Частота  $\omega_s$  используется для формирования с помощью интегратора угла  $\theta$ , а также коэффициента модуляции  $m$ . Коэффициент модуляции при законе регулирования  $E/\omega_s = \text{const}$  определяется как отношение частот  $m = \omega_s/\omega_{snom}$ . По относительной амплитуде  $m$  и текущему углу  $\theta(t)$  формируется симметричная трехфазная система модулирующих сигналов  $\hat{e}_a(t), \hat{e}_b(t), \hat{e}_c(t)$ , которая затем корректируется слагаемыми, учитывающими  $IR$ -компенсацию [13]. Сравнение полученных модулирующих напряжений  $\hat{u}_a(t), \hat{u}_b(t), \hat{u}_c(t)$  с опорным сигналом ШИМ дает функции переключения  $S_a, S_b, S_c$ , управляющие IGBT – модулями инвертора напряжения.

#### IV РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Задача моделирования состояла в оценке погрешности косвенного определения скорости ротора в зависимости от нагрузки привода и соотношении этой погрешности с точностью современных бездатчиковых систем векторного управления, которая в соответствии с данными работы [1,4] составляет  $\pm 1\%$ .

Для оценки погрешности использовались данные измерительного блока двигателя  $\omega^{\text{изм}}$  и результат расчета системы управления  $\omega^{\text{выч}}$ .

$$W_{\omega} = \frac{\omega^{\text{ИЗМ}} - \omega^{\text{ВЫЧ}}}{\omega^{\text{ИЗМ}}} \cdot 100\% . \quad (12)$$

Исследование предложенной системы управления электроприводом производилось следующим образом. Сначала осуществлялся разгон двигателя до номинальной частоты вращения и затем включалась система регулирования скорости. В системе регулирования задавалось ступенчатое изменение скорости вращения по закону

$$\widehat{\omega}(t) = 1 - \sum_{k=1}^{10} \Delta \widehat{\omega} \delta_1(t - kT_1), \quad (13)$$

где  $\delta_1$  – единичная ступенчатая функция;  $\Delta\hat{\omega}$  – шаг приращения скорости;  $T_1$  – длительность одной ступени приращения.

Время  $T_1=2$  с выбрано из условия получения стационарного режима на каждом шаге изменения скорости  $\Delta\hat{\omega}=0,1$ . На последнем шаге приращение скорости составляло  $\Delta\hat{\omega}=0,05$ .

Графики скорости вращения ротора и относительная ошибка ее оценки по формуле (12) представлены на **рис. 5**. Из **рис. 5, б** следует, что с уменьшением задания по скорости растет ошибка оценивания. Такой же вывод вытекает из результатов теоретического анализа раздела II. В диапазоне относительных скоростей от 1 до 0,1 статическая ошибка не превышает 0,5%. При уменьшении скорости вращения до значения 0,05 ошибка увеличивается до 1,5%.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что представленная система бездатчикового скалярного управления электроприводом позволяет осуществлять регулирование скорости вращения ротора в диапазоне 1:10 с ошибкой косвенного вычисления скорости, не превышающей ошибки, характерной для бездатчиковых систем векторного управления  $W_{0\leq 1}\%$ .

Полученные результаты справедливы для случая, когда параметры двигателя соответствуют паспортным данным. Однако эксплуатационные параметры двигателя могут отличаться от номинальных значений вследствие их зависимости от ряда факторов и влиять тем самым на оценку скорости с помощью наблюдателя [4,6,7]. Рассмотрим влияние температурной зависимости  $R(T)$  активных сопротивлений обмоток статора и ротора [14] на ошибку косвенного измерения скорости:

$$R(T) = R^{(20)}[1 + \alpha(T - 20)], \quad (14)$$

где  $R^{(20)}$  – сопротивление при температуре  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha=0,004$  – температурный коэффициент сопротивления меди.

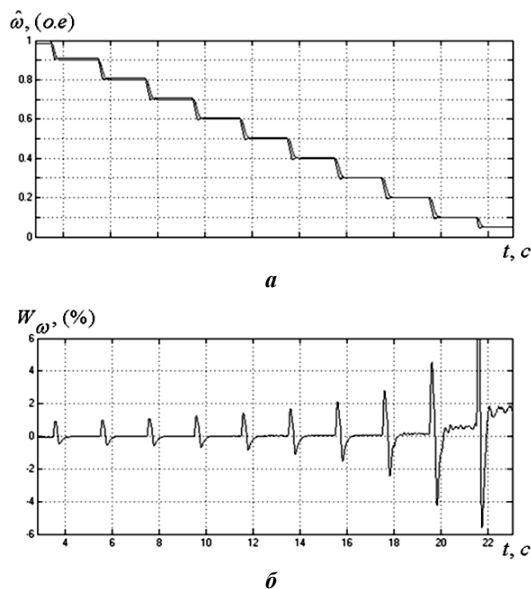


Рис. 5. Скорость вращения ротора (а) и относительная ошибка оценивания скорости (б)

Для оценки погрешности наблюдателя сохраним в системе управления исходные параметры, а в компьютерной модели исследуемого двигателя 4A200M2У3 установим другие значения сопротивлений ротора и статора, которые вследствие нагрева двигателя превышают номинальные значения сначала на 13 % и затем на 50 %.

Оценку скорости вращения производили на каждом шаге ступенчатого изменения задания по скорости вращения (13) и сравнивали с измеренным значением. Зависимость относительной погрешности (12) от заданного значения скорости  $W(\omega)$  определяли по временной диаграмме  $W_\omega(t)$  (рис. 6) с учетом ступенчатой аппроксимации линейной зависимости изменения задания по скорости от времени (12). Например, интервалу времени  $12 \leq t \leq 14$  соответствовала оценка погрешности скорости  $\omega = 0,5\omega_{ном}$ .

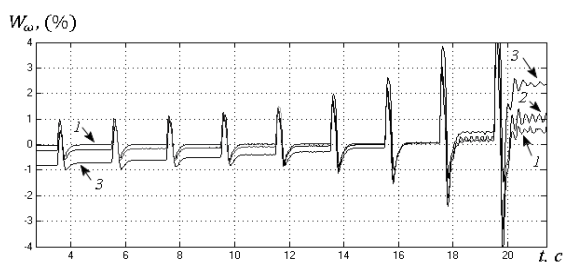


Рис. 6. Относительная ошибка оценивания скорости вращения ротора при номинальных значениях параметров (кривая 1) и при изменении сопротивления ротора и статора на 13% (кривая 2) и на 50% (кривая 3)

Из полученных данных следует, что при изменении сопротивлений на 13% ошибка не превышает  $W \leq 1\%$  в диапазоне регулирования скорости 1:10, достигая предельно допустимого значения для относительной скорости  $\hat{\omega}=0,1$ .

При отличии сопротивления от номинального значения на 50% ошибка достигает  $W = -1\%$  при номинальной скорости  $\hat{\omega}=1$  и значения  $W = 2\%$  при скорости  $\hat{\omega}=0,1$ . В последнем случае область регулирования при условии  $W \leq 1\%$  снижается до интервала 1:5 по сравнению с диапазоном 1:10, который имеет место в

случае оценки скорости в номинальном режиме.

Полученные характеристики бездатчикового привода со скалярным законом частотного управления удовлетворяют требованиям наиболее распространенных приводных механизмов, имеющих вентиляторную характеристику, например вентиляторов главного проветривания шахт [15], аппаратов воздушного охлаждения [16] и др.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано обоснование косвенного измерения скорости вращения асинхронного двигателя в приводе со скалярной системой частотного управления. Оценка производится по результатам  $\alpha\beta$ -преобразования измеренных токов статора, нахождения активной составляющей тока и использовании линеаризованной зависимости активной составляющей тока от частоты тока ротора. Предложена двухконтурная структура бездатчиковой системы скалярного управления. По результатам моделирования привода в среде MatLab/Simulink произведена оценка точности работы наблюдателя скорости. Показано, что в диапазоне регулирования скорости вращения ротора 1:10 относительная погрешность определения скорости не превышает 1% – значения, характерного для бездатчиковых систем векторного управления. Для сохранения 1%-й точности оценки скорости изменение активного сопротивления статорной и роторной цепи двигателя не должно превышать 13 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усольцев А.А. Электрический привод: учеб. пособие. СПб.: Изд-во НИУ ИТМО, 2012. 238 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. 298 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 265 с.
4. Вейнмейстер А.В. Косвенное измерение скорости вращения в электроприводе с асинхронным двигателем на основе идентификатора состояния: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Вейнмейстер Андрей Викторович; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013. 17 с.
5. Reddy P. Nagasekhar, Reddy P. Linga, J. Amarnath Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique // International Journal of Electrical Engineering. 2011. V.4, №1. P. 23–32.
6. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives // Proceedings of the IEEE. 2002. V. 90, № 8. P. 1359–1394.
7. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. №3. С. 50-55.
8. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, А.Б. Воронко, Д.Л. Приступа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2012. Т.19, №3. С. 137-141.
9. Умурзакова А.Д. Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Умурзакова Анара Даукеновна; ТПУ; науч. рук. Ю.Н. Дементьев. Томск, 2015. 116 с.
10. Мельников В.Ю., Умурзакова А.Д. Способы измерения угловой скорости вращения и крутящего момента асинхронного электродвигателя // Материалы докладов шестнадцатой Всероссийской научно-технической конфе-

ренции «Энергетика: Экология, надежность, безопасность». 2010. С. 404–406.

11. Емельянов А.П., Чуркин Б.А. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2014. Т.14. №3 С.85-90.
12. Толочко О.И., Чекавский Г.С., Розкаряка П.И. Скалярное частотное управление асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими // Электромеханика и энергозберігаючі системи. 2012. Т.19, №3. С. 309-312.
13. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 232 с.
14. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504 с.
15. Шонин О.Б., Пронько В.С. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. Т.195, №2. С. 49-57.
16. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. №2. С.1-7.

## INFORMATION IN ENGLISH

### OBSERVER OF ROTOR SPEED IN SCALAR CONTROL INDUCTION MOTOR DRIVE

Shonin O.B., Novozhilov N.G., Kryltsov S.B.

The paper is devoted to speed-sensorless scalar control system of an induction motor drive consisting of two loops for control of the rotor speed and the active component of stator current. The rotor speed estimation is based on the linearized dependence of the slip frequency on the active component of the stator current obtained for an IR-compensation scheme. The active current component is calculated as a sum of projections of measured alpha-beta current components onto the voltage vector. The computer model of control system with the proposed rotor speed observer has been implemented to estimate the observer accuracy for different rotor speeds. The control range of the rotor speed has been determined under conditions of the static error being kept less than 1 %.

**Keywords:** Variable frequency drive, PWM, speed operating range, active component of stator current, slip frequency.

#### REFERENCES

1. Usoltsev A.A. *Elektricheskiy privod: uchebnoe posobie* [Electrical drive: tutorial]. St. Petersburg: ITMO University publ., 2012. 238 p.
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electrical drive]. Ivanovo: ISPU publ., 2008. 298 p.
3. Sokolovskii G.G. *Elektroprivodi peremennogo toka s chastotnim regulirovaniem* [Frequency controlled AC motor drives]. Moscow: Academy, 2006. 265 p.
4. Veynmeyster A.V. *Kosvennoe izmerenie skorosti vrasheniya v elektroprivode s asinhronnim dvigatelem na osnove identifikatora sostoyaniya* [Indirect measurement of speed of rotation in the drive with asynchronous motor on the basis of state ID]: Ph.D. thesis in engineering. St. Petersburg, 2013. 17 p.
5. Nagasekhar Reddy P., Reddy P. Linga, J. Amarnath. Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique. *International Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol.4, no. 1, pp. 23–32.
6. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE*. 2002, vol. 90, no.8, pp. 1359–1394.
7. Vinogradov A., Sibircev A., Kolodin I. Adaptivno-vektornaya sistema upravleniya bezdatchikovogo asinhronnogo elektroprivoda serii EPV [Adaptive-vector control system of sensorless induction motor series EPV]. *Power Electronics*. 2006, no.3, pp. 50-55.
8. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Voronko A.B., Pristupa D.L. Sravnitelnoe eksperimentalnoe testirovanie sistem bezdatchikovogo upravleniya asinhronnimi dvigatelyami [Comparative experimental testing of sensorless control for asynchronous motors]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi. Sistemi*. 2012, vol.19, no. 3, pp. 137–141.
9. Umurzakova A.D. *Kosvennii kontrol vihodnih mekhanicheskikh peremennih asinhronnogo elektrodvigatelya v elektroprivode* [Indirect control of mechanical output variable induction motor in electric drive]: Ph.D. thesis. Tomsk, 2015, 116 p.
10. Melnikov V.Y., Umurzakova A.D. *Sposobi izmereniya uglovoi skorosti vrasheniya i krutyashego momenta asinhronnogo elektrodvigatelya* [Methods for measuring angular velocity and torque of asynchronous motor]. *Proceedings of the Sixteenth All-Russia scientific-technical conference "Energy: Ecology, reliability, security"*. 2010, pp. 404–406.
11. Emelyanov A.P., Churkin B.A. *Skalyarnoe upravlenie asinhronnim korotkozamknutim dvigatelem po aktivnoi sostavlyayushei toka statora* [Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current]. *Bulletin of the South Ural State University*. 2014, vol.14, no.3, pp. 85-90.
12. Tolochko O.I., Chekavsky G.S., Rozkaryaka P.I. *Skalyarnoe chastotnoe upravlenie asinhronnim elektroprivodom s uluchshennimi dinamicheskimi harakteristikami* [Scalar frequency control asynchronous electric drive with improved dynamic characteristics.]. *Electrical engineering energy saving systems*. 2012, vol.19, no.3, pp. 309-312.
13. Dementiev U.N., Chernyshov A.U., Chernyshev I.A. *Elektricheskiy privod: uchebnoe posobie* [Electrical Drive: tutorial]. Tomsk: TPU publ., 2010. 232 p.
14. Krawczyk A.E., Shlaf M.M., Afontin V.I., Sobolevskaya E.A. *Asinhronnie elektrodvigateli serii 4A: spravochnik* [Induction motors series 4A: reference book]. Moscow: Energoatomisdat, 1982. 504 p.
15. Shonin O.B., Pronko V.S. *Povishenie energeticheskoi effektivnosti glavnykh ventilyatornykh ustanovok shaht na osnove mnogocелеvoi sistemi upravleniya chastotno-reguliruemim privodom* [Improving the energy efficiency of the main mine fan installations on the basis of multi-purpose variable frequency drive control system]. *St. Petersburg State Polytechnic University journal*. 2014, vol.195, no.2, pp. 49-57.
16. Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Printsipy invariantnogo upravleniya elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchainykh vozmusheniyyah* [Principles of invariant control electronic gas transportation systems with random perturbations]. *"Vestnik of IGEU" journal*. 2008, vol. no.2, pp.1-7.