



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЙЕРА ЛЕНТОЧНОГО ТИПА С НАБЛЮДАТЕЛЯМИ СКОРОСТИ

Мещеряков В.Н., Мантухов Е.С., Сдвижков А.В.

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в возможности применения различных наблюдателей скорости с использованием асинхронного двигателя с векторным управлением, предлагаемых для использования на наклонном ленточном конвейере, транспортирующего железорудный концентрат. ЦЕЛЬЮ является сравнительное исследование динамики асинхронного электропривода с векторным управлением при использовании датчика скорости и наблюдателей скорости различного типа. МЕТОДАМИ исследования являются разработка математических моделей наблюдателей, компьютерное моделирование и анализ динамических режимов работы электропривода при использовании датчика скорости и различных наблюдателей скорости в условиях работы наклонного ленточного конвейера, анализ точности измерения скорости рассмотренными наблюдателями с учетом влияния теплового изменения активного сопротивления обмоток асинхронного двигателя. РЕЗУЛЬТАТЫ. С помощью компьютерного моделирования получены графики переходных процессов, проведено сравнение результатов моделирования динамических характеристик и показателей качества в системах электропривода с датчиком скорости и с наблюдателями скорости. Определена степень влияния теплового изменения активного сопротивления обмоток асинхронного двигателя на работу наблюдателей разного вида. В результате выполненных исследований установлено, что наблюдатель скорости полного порядка обеспечивает минимальную погрешность измерения скорости и может использоваться в электроприводе наклонного ленточного конвейера.

Ключевые слова: конвейер ленточного типа; асинхронный электропривод; векторное управление; адаптивные наблюдатели скорости; моделирование; показатели качества.

Для цитирования: Мещеряков В.Н., Мантухов Е.С., Сдвижков А.В. Исследование векторной адаптивной системы управления асинхронным электроприводом конвейера ленточного типа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.25. № 3. С.41-54. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-41-54.

STUDY OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BELT CONVEYOR

VN. Meshcheryakov, ES. Mantukhov, AV. Sdvizhkov

Lipetsk state technical university, Lipetsk, Russia

Abstract: THE POSSIBILITY of using various speed observers in a vector-controlled asynchronous electric drive system proposed for use on an inclined conveyor belt transporting iron ore concentrate is considered. THE PURPOSE is a comparative study of the dynamic characteristics of the vector control system of an asynchronous electric drive when using a speed sensor and speed observers of various types. THE RESEARCH METHODS are development of mathematical models of observers, computer modeling and analysis of dynamic modes of operation of the asynchronous electric drive vector control system when using a speed sensor and various speed observers in the conditions of operation of an inclined conveyor belt, analysis of the accuracy of speed measurement by the observers considered, taking into account the influence of thermal changes in the active resistance of the asynchronous motor windings. With the help of computer modeling, graphs of transient processes in the asynchronous electric drive system with vector control are obtained, the results of modeling dynamic characteristics and quality indicators in systems with a speed sensor mounted on the motor shaft and with speed observers. The degree

of influence of the thermal change in the active resistance of the windings of an asynchronous motor on the work of observers of different types is determined. AS A RESULT of the studies carried out, it was found that the full-order speed observer provides a minimum error in speed measurement and can be used in an asynchronous electric drive system with vector control when it is used on an inclined conveyor belt.

Keywords: belt-type conveyor; asynchronous electric drive; vector control; adaptive speed observers; modeling; quality; indicators.

For citation: Meshcheryakov VN, Mantuhov ES, Gladyshev VE, Sdvizhkov AV. Study of adaptive control system of asynchronous electric drive belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(3):41-54. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-41-54.

Введение

Исследования направлены на повышение работоспособности асинхронного электропривода конвейера ленточного типа за счет применения бездатчиковой системы идентификации скорости двигателя, что определяет их актуальность. Целью исследования является сравнение пусковых характеристик асинхронного электропривода с векторным управлением, полученных методом компьютерного моделирования, при использовании датчика скорости и наблюдателей скорости различного типа в сложных условиях работы электропривода на наклонном ленточном конвейере с диапазоном изменения температуры окружающей среды в летний и зимний периоды превышающим 60° С, и анализ точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при температурном изменении сопротивления обмотки статора. Научная значимость исследований заключается в получении новых результатов, дополняющих имеющийся в литературных источниках системные данные о точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при изменении сопротивления обмотки статора, вследствие изменения температуры окружающей среды в рассматриваемом диапазоне.

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к надежности и энергоэффективности работы используемого оборудования. Наклонный ленточный конвейер ПБ-1, работающий на предприятии ПАО «Михайловский ГОК», оснащенный достаточно энергоэффективной и относительно простой системой частотного регулирования асинхронного электропривода со скалярным управлением, позволяющей выполнять регулирование от датчика скорости, смонтированного на валу двигателя, работает в тяжелых условиях окружающей среды при наличии пыли в воздухе, высокой влажности, поэтому использование датчика скорости снижает надежность работы электропривода [1]. В случае перехода на систему векторного управления асинхронным электроприводом, возможно применение бездатчиковой системы, это является перспективным решением, повышающим надежность и качество управления механизмами общепромышленного назначения, например ленточными конвейерами [2-4]. Данное решение позволит уменьшить стоимость привода при проектировании, так как нет необходимости в закупке дорогостоящего оборудования, в монтаже датчика и выполнении коммуникации с ним. По результатам исследования можно будет сделать вывод о наиболее подходящем наблюдателе к системе управления электропривода.

Анализ известных исследований, направленных на совершенствование асинхронного электропривода с использованием наблюдателей скорости различного типа [4], показывает, что точность идентификации скорости требует точных данных сопротивлений обмотки асинхронного двигателя (АД), которые подвержены температурным изменениям в условия работы ленточного конвейера со значительными сезонными изменениями температуры окружающей среды.

С учетом этих особенностей работы электропривода конвейера были сформулированы требования к наблюдателю скорости:

- минимум математических вычислений;
- пониженная чувствительность к неточности определения параметров, вводимых в модель;
- возможность его физической интерпретации.

Проведение исследований работы наблюдателей скорости в энергосберегающих системах электропривода переменного тока, используемых на разных промышленных механизмах [5-7], в том числе векторных систем с элементами адаптивного управления [8-10], наиболее удобно проводить методом имитационного компьютерного моделирования

[15] с использованием пакетов программ, например в программной оболочке *MATLAB Simulink*.

Методы

Работа асинхронного электропривода конвейера ПБ-1 с АД типа АИР355S4, $P_H = 250$ кВт, осуществляющего транспортировку в складское помещение железорудного концентрата, исследована методом компьютерного моделирования. На рисунке 1 приведена схема конвейера ПБ-1, взята из проекта по реконструкции конвейера на предприятии ПАО «Михайловский ГОК».

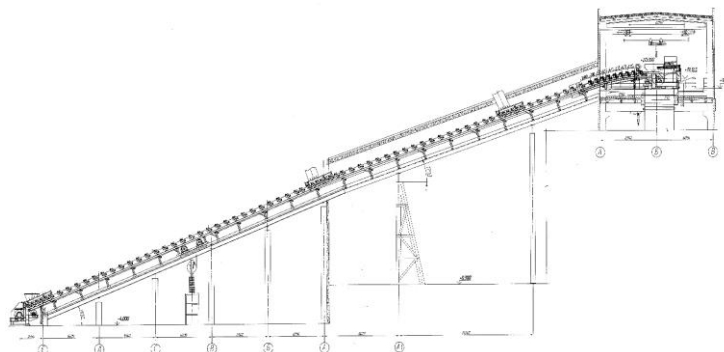


Рис.1. Схема конвейера

Fig. 1. Pipeline diagram

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Кинематическая схема электропривода конвейера содержит редуктор, что позволяет согласовать скорость двигателя и механизма, а также увеличить момент, приложенной к приводному барабану. С противоположной стороны конвейера установлен неприводной барабан для обеспечения движения ленты. Для регулирования натяжения ленты используется натяжная станция. Поступающий на ленту конвейера ПБ-1 сыпучий материал загружается достаточно равномерно, изменение статической нагрузки на валу двигателя происходит плавно. Механизм является высоко инерционным, время разгона составляет 150 с. Температура обмоток двигателя не остается постоянной, поскольку на температуру влияет статическая нагрузка двигателя, кроме того, изменяется температура окружающей среды. Тепловое изменение сопротивления обмоток вносит погрешность в работу наблюдателя скорости, что необходимо учитывать при его выборе и синтезе параметров.

Система управления требует наличия информации о скорости электропривода, которую можно получить или от датчика скорости, или от наблюдателя скорости. Общий вид многофункциональной схемы электропривода, оснащенного наблюдателем скорости, разработанной в работе [4], представлен на рисунке 2.

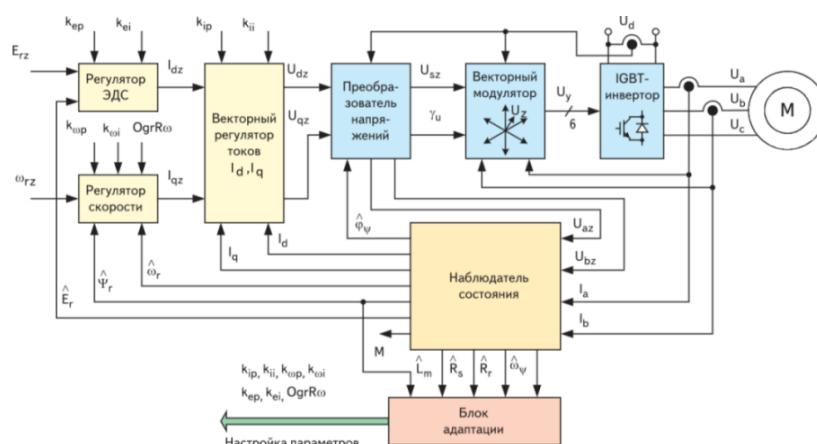


Рис. 2 - Многофункциональная схема асинхронного привода с наблюдателем состояния

Fig. 2/ Functional diagram vector control of an asynchronous drive with an observer

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Исследование работы наблюдателей скорости в рассматриваемой системе электропривода, результаты которых приведены в данной статье, проводилось методом компьютерного моделирования с использованием рассмотренных ниже блок-схем моделей,

разработанных авторами статьи. Временные зависимости переменных двигателя при применении датчика скорости и наблюдателей скорости, приведенные ниже, получены авторами статьи в результате выполненного компьютерного моделирования.

На рисунке 3 приведена компьютерная модель векторной системы управления АД, позволяющая моделировать пуск электропривода при использовании датчика скорости.

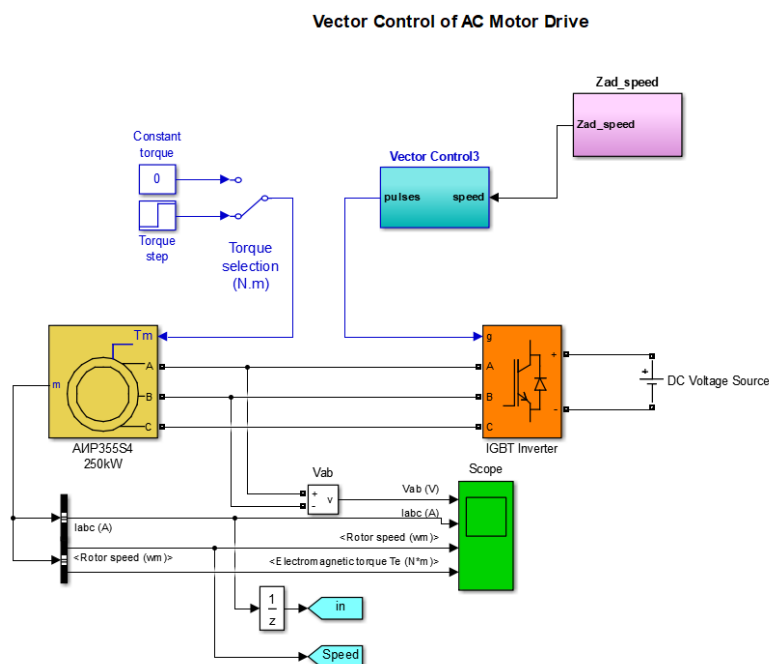


Рис. 3. Компьютерная модель векторной системы управления Fig.3. Physical model of the vector control system

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты

Результаты моделирования пуска электропривода с датчиком скорости, показаны на рисунке 4.

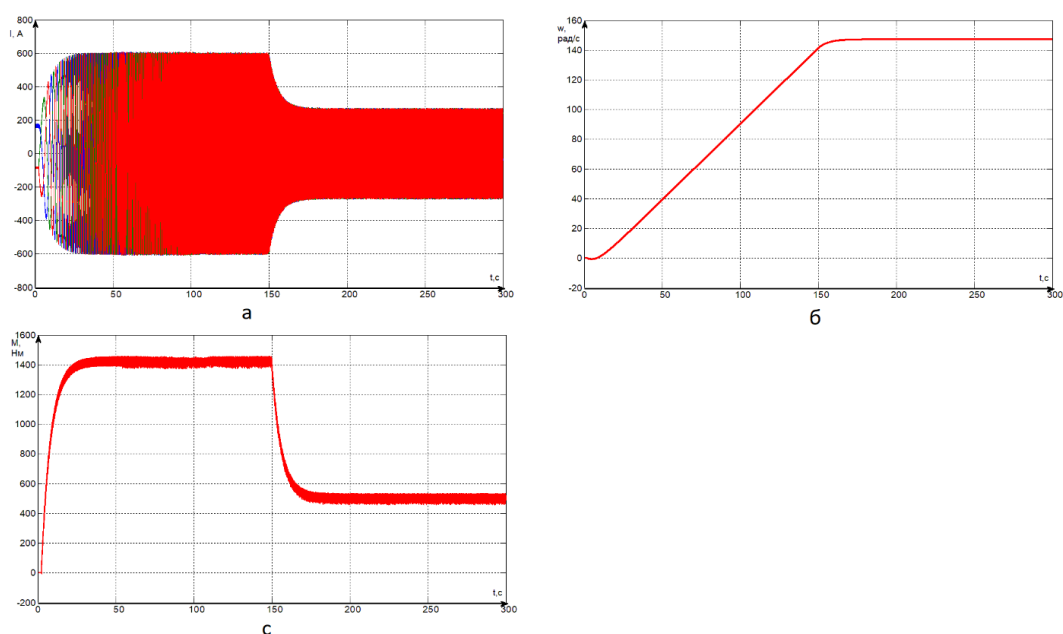


Рис. 4 - Временные зависимости: а - тока статора; б - скорости; в - момента в системе с датчиком скорости Fig. 4- Time dependences: a-stator current; b-speed; c-moment in a system with a speed sensor

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Схема компьютерной модели электропривода с наблюдателем скорости, показана на рисунке 5.

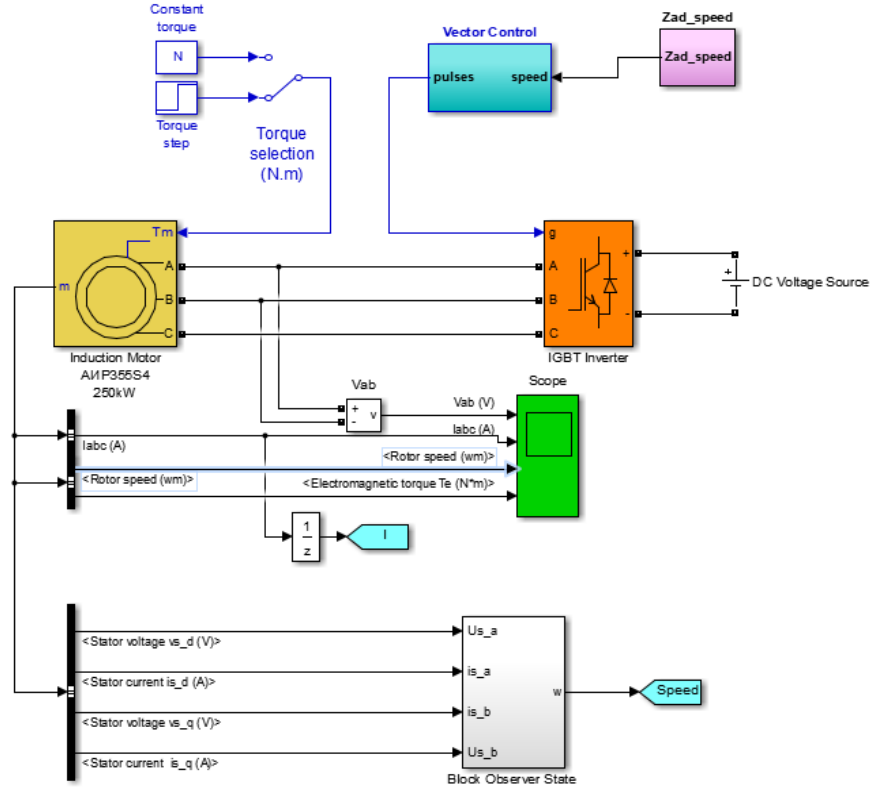


Рис.5. Модель системы управления с наблюдателем скорости

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Для наблюдателя с идентификацией потокоцепления ротора система уравнения имеет вид:

$$\begin{aligned}\psi_{r\alpha} &= \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(\int (U_{s\alpha} - I_{s\alpha} \cdot R_s) dt - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\alpha} \right), \\ \psi_{r\beta} &= \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(\int (U_{s\beta} - I_{s\beta} \cdot R_s) dt - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\beta} \right), \\ \hat{\psi}_{r\alpha} &= \int \left(\frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\alpha} \cdot L_m - \psi_{r\alpha}) - p_{\pi} \cdot \omega \cdot \psi_{r\beta} \right), \\ \hat{\psi}_{r\beta} &= \int \left(\frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\beta} \cdot L_m - \psi_{r\beta}) + p_{\pi} \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha} \right).\end{aligned}$$

Символом $\hat{}$ обозначается оценочное значение из модели ротора.

Скорость определяется по формуле

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot \left(\hat{\psi}_{r\alpha} \cdot \psi_{r\beta} - \psi_{r\alpha} \cdot \hat{\psi}_{r\beta} \right),$$

Реализация адаптивного наблюдателя с идентификацией потокоцепления ротора с фильтром представлена на рисунке 6.

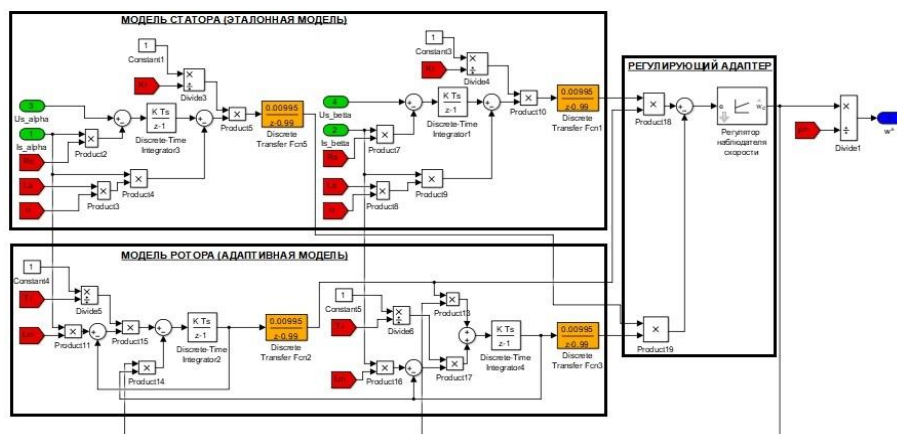


Рис. 6 - Модель адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с применением сглаживающего фильтра

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

При моделировании рассматривались временные зависимости скорости, полученные с наблюдателя, а также тока статора и момента двигателя, полученные из модели электропривода.

Результаты моделирования адаптивного наблюдателя с идентификацией потокосцепления ротора с фильтром, установленным на выходе модели статора, показаны синим цветом на рисунке 7, а и 7, б, на этих же рисунках, а также на последующих рисунках красным цветом показаны графики в системе с датчиком скорости.

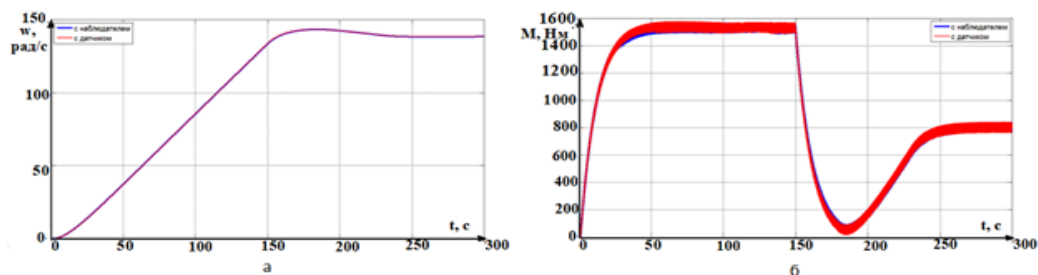


Рис. 7. Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости при наличии выходного фильтра в цепи статора и ротора; б – сравнительная характеристика момента при наличии выходного фильтра в цепи статора и ротора

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Из результатов моделирования следует, что наблюдатель обеспечивает практически идентичные с датчиком скорости зависимости по скорости и моменту за исключение переходных процессов, где колебания по моменту увеличиваются, что негативно сказывается на приводе.

Был исследован метод снижения колебаний момента, заключающийся в замене в системе управления интегратора на аperiodическое звено и добавлении ПИ-звена (на рисунке выделен желтым цветом). Реализация математической модели такого адаптивного наблюдателя представлена на рисунке 8.

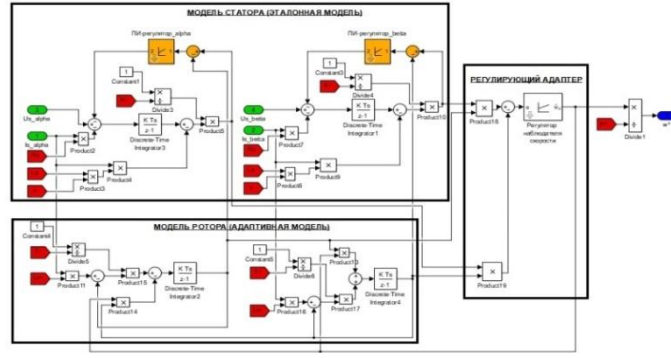


Рис. 8 Модель адаптивного наблюдателя с идентификацией потокоцепления ротора с апериодическим фильтром и ПИ-звеном

Fig. 8 - Model of an adaptive observer operating on the basis of identifying the rotor flux linkage using an aperiodic link filter and setting a PI controller

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Временные зависимости, характерные для адаптивного наблюдателя с идентификации потокоцеплений ротора с апериодическим фильтром и ПИ-звеном приведены на рисунках 9, а и 9, б.

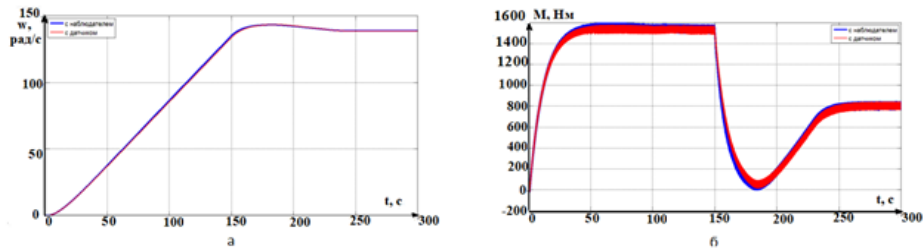


Рис. 9. Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости при добавлении ПИ-звена; б – сравнительная характеристика момента при добавлении ПИ-звена

Fig. 9. Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer limiting the flow coupling of the rotor

*Источник: составлено автором. Source compiled by the author

Наблюдатель с дополнительным ПИ-звеном более надежен, чем описанные выше системы управления с ограничением потокоцепления ротора, добавление ПИ-звена снижает статическую ошибку даже при значениях сопротивления, близких к допустимым предельным.

Наблюдатели, вычисляющие параметры по результатам анализа тока статора, характеризуются высокой точностью определения параметров в диапазоне низких скоростей, поскольку расчетные и измеренные значения линейны.

Уравнения, связывающие потокоцепление ротора и ток статора имеют вид

$$T_r \cdot \frac{d\psi_{ra}}{dt} + \psi_{ra} = I_{sa} \cdot L_m - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\beta},$$

$$T_r \cdot \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \psi_{r\beta} = I_{s\beta} \cdot L_m - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{ra}.$$

Выражения для оцениваемых значений тока статора имеют вид

$$\hat{I}_{sa} = \frac{1}{L_m} \cdot \left[\psi_{ra} + T_r \cdot \frac{d\psi_{ra}}{dt} + T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{r\beta} \right],$$

$$\hat{I}_{s\beta} = \frac{1}{L_m} \cdot \left[\psi_{r\beta} + T_r \cdot \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - T_r \cdot \omega_e \cdot \psi_{ra} \right].$$

Разница между реальными и оцениваемыми токами

$$I_{sa} - \hat{I}_{sa} = \frac{T_r}{L_m} \cdot \psi_{r\beta} \cdot \left(\omega_e - \hat{\omega}_e \right),$$

$$I_{s\beta} - \hat{I}_{s\beta} = -\frac{T_r}{L_m} \cdot \Psi_{r\alpha} \cdot \left(\omega_e - \hat{\omega}_e \right).$$

Можно получить выражение

$$\omega_e - \hat{\omega}_e = K \cdot \left[\left(I_{s\alpha} - \hat{I}_{s\alpha} \right) \cdot \Psi_{r\beta} + \left(\hat{I}_{s\beta} - I_{s\beta} \right) \cdot \Psi_{r\alpha} \right],$$

где $K = \frac{L_m}{T_r \cdot (\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2)}$ – постоянный коэффициент.

Реализация адаптивного наблюдателя, анализирующего ток статора, представлена на рисунке 10.

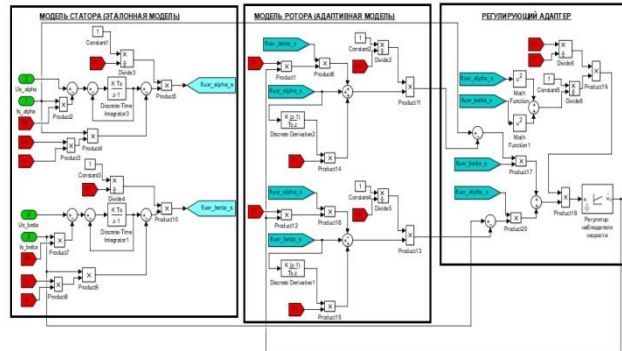


Рис.10. Модель адаптивного наблюдателя анализирующего ток статора Fig. 10. Model of adaptive stator current observer

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты, полученные при моделировании адаптивного наблюдателя скорости, анализирующего ток статора, представлены на рисунке 11.

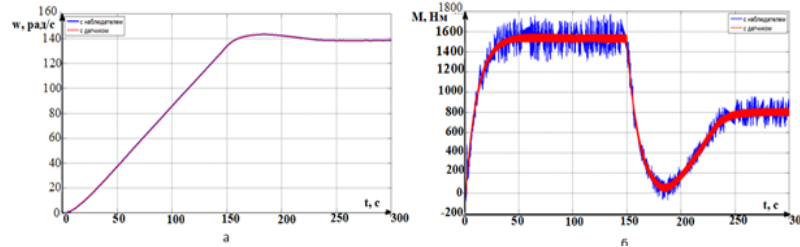


Рис. 11 Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости от наблюдателя по току; б – сравнительная характеристика момента от наблюдателя по току Fig. 11. Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer analyzing the current

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты показали, что фактическая скорость и скорость, рассчитанная наблюдателем, анализирующим ток статора, практически совпадают. На графике момента, полученного при работе наблюдателя, имеются колебания момента двигателя. Такие колебания имеют негативное влияние на привод, на его надежность и долговечность.

Наблюдатель, выполненный на основе определения ЭДС, имеет большую погрешность при низкой скорости двигателя, когда противо-ЭДС имеет малое значение.

Система уравнений наблюдателя по ЭДС имеет следующий вид

$$E_{r\alpha} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(U_{s\alpha} - I_{s\alpha} \cdot R_s - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\alpha} \cdot \frac{d}{dt} \right),$$

$$E_{r\beta} = \frac{L_r}{L_m} \cdot \left(U_{s\beta} - I_{s\beta} \cdot R_s - \sigma \cdot L_s \cdot I_{s\beta} \cdot \frac{d}{dt} \right),$$

$$E_{r\alpha} = \frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\alpha} \cdot L_m - \Psi_{r\alpha}) - p_p \cdot \omega \cdot \Psi_{r\beta},$$

$$E_{r\beta} = \frac{1}{T_r} \cdot (I_{s\beta} \cdot L_m - \psi_{r\beta}) + p_p \cdot \omega \cdot \psi_{r\alpha}.$$

Скорость выражается

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) \cdot \left(\hat{E}_{r\alpha} \cdot E_{r\beta} - \hat{E}_{r\beta} \cdot E_{r\alpha} \right).$$

Реализация адаптивного наблюдателя с идентификацией ЭДС представлена на рисунке 12.

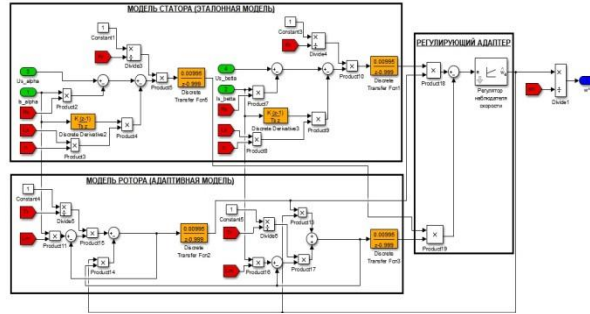


Рис. 12 - Модель адаптивного наблюдателя по ЭДС Fig.12. Model of an adaptive EMF observer

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Результаты моделирования адаптивного наблюдателя скорости на основе идентификации ЭДС ротора показаны на рисунках 13, а и 13, б.

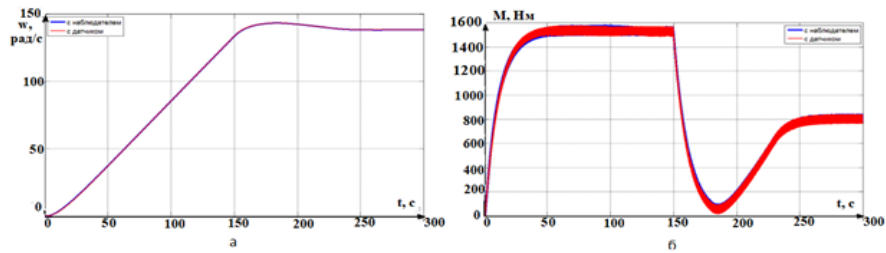


Рис. 13 Временные зависимости: а – характеристика скорости от наблюдателя по ЭДС; б – сравнительная характеристика момента от наблюдателя по ЭДС Fig. 13- Time dependences: a- stator current; b- velocity, with an observer identifying EMF

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author author

Из результатов моделирования видно, что скорость и момент, фактические и рассчитанные с использованием наблюдателя практически совпадают, но на графике по моменту видно, что во время переходных процессов имеется погрешность и наблюдаются колебания.

Наблюдатель полного порядка в ходе вычислений использует все доступные данные электромагнитных процессов, что увеличивает объем вычислений. Данный наблюдатель обеспечивает минимальную статическую ошибку и подвергается меньшему влиянию от изменения параметров во время работы привода. Выражения, описывающие наблюдатель полного порядка, можно получить путем рассмотрения дифференциальных уравнений статора.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi_{r\alpha} &= \frac{1}{k_r} \cdot U_{s\alpha} - \frac{1}{k_r} \cdot I_{s\alpha} \cdot R_s - \frac{\sigma \cdot L_s}{k_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{s\alpha}, \\ \frac{d}{dt} \psi_{r\beta} &= \frac{1}{k_r} \cdot U_{s\beta} - \frac{1}{k_r} \cdot I_{s\beta} \cdot R_s - \frac{\sigma \cdot L_s}{k_r} \cdot \frac{d}{dt} \cdot I_{s\beta}. \end{aligned}$$

Выразим из уравнений производные тока статора

$$\frac{d}{dt} I_{s\alpha} = -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \cdot I_{s\alpha} - \frac{k_r}{\sigma \cdot L_s} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot U_{s\alpha},$$

$$\frac{d}{dt} I_{s\beta} = -\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \cdot I_{s\beta} - \frac{k_r}{\sigma \cdot L_s} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot U_{s\beta}.$$

Используя систему обозначений, получим данные уравнения в удобном виде

$$\frac{dI_{s\alpha}}{dt} = a_{r11} \cdot I_{s\alpha} + a_{r12} \cdot \psi_{r\alpha} - a_{i12} \cdot \psi_{r\beta} + b_1 \cdot U_{s\alpha},$$

$$\frac{dI_{s\beta}}{dt} = a_{r11} \cdot I_{s\beta} + a_{r12} \cdot \psi_{r\beta} + a_{i12} \cdot \psi_{r\alpha} + b_1 \cdot U_{s\beta},$$

$$\text{где } a_{r11} = -\left(\frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \cdot T_r}\right), \quad a_{r12} = \frac{L_m}{\sigma \cdot T_r \cdot L_s \cdot L_r}, \quad a_{i12} = -\frac{L_m \cdot \omega_e}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r},$$

$$b_1 = \frac{1}{\sigma \cdot L_s}.$$

Производные проекций потокоцеплений ротора определяются

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = a_{r22} \cdot \psi_{r\alpha} - a_{i22} \cdot \psi_{r\beta} + a_{r21} \cdot I_{s\alpha},$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = a_{r22} \cdot \psi_{r\beta} + a_{i22} \cdot \psi_{r\alpha} + a_{r21} \cdot I_{s\beta},$$

$$\text{где } a_{r21} = \frac{L_m}{T_r}, \quad a_{r22} = -\frac{1}{T_r}, \quad a_{i22} = \omega_e.$$

Совместное рассмотрение приведенных уравнений позволяет представить закон адаптации в следующем виде

$$\hat{\omega}_e = \left(k_p + \frac{k_i}{p}\right) \cdot \left(\Delta I_{s\alpha} \cdot \hat{\psi}_{r\beta} - \Delta I_{s\beta} \cdot \hat{\psi}_{r\alpha}\right).$$

Реализация адаптивного наблюдателя полного порядка представлена на рисунке 14.

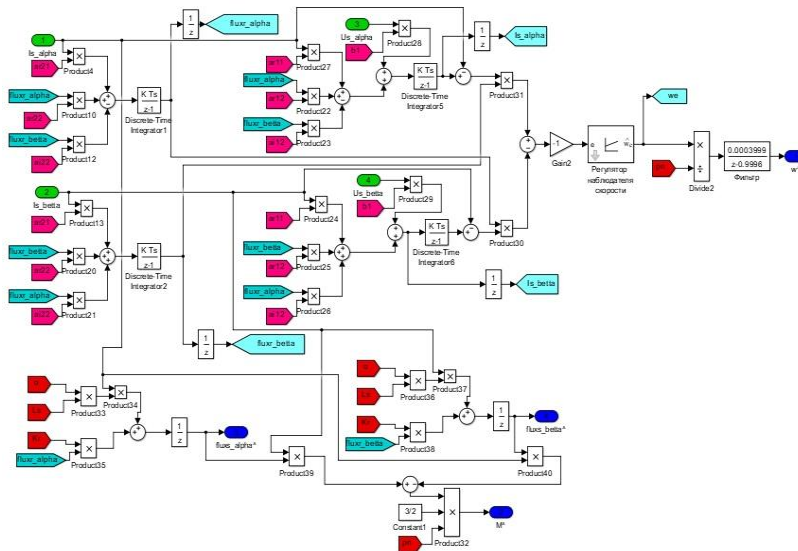


Рис. 14 Модель адаптивного наблюдателя полного порядка Fig.14 Adaptive observer model full order

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author

Результаты, полученные при моделировании наблюдателя полного порядка, показаны на рисунках 15, а и 15, б.

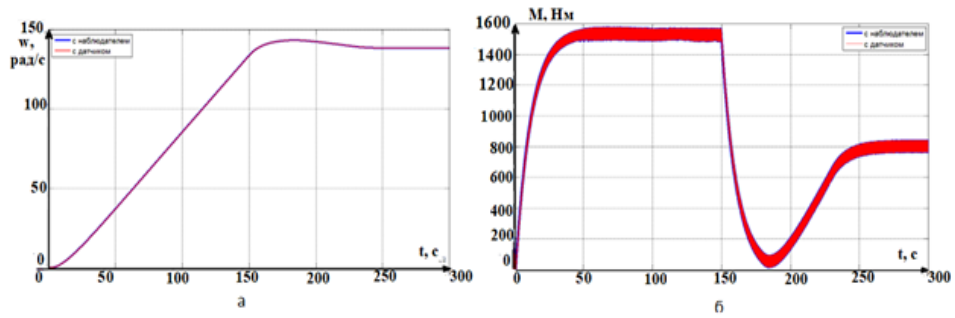


Рис. 15 Временные зависимости: а – сравнительная характеристика скорости от наблюдателя полного порядка; б – сравнительная характеристика момента от наблюдателя полного порядка.

Fig. 15 Graphs: а – comparative characteristic of speed from an observer of full order; б – comparative characteristic of the moment from an observer of full order

*Источник: составлено автором. Source: compiled the author

Из результатов моделирования следует, что графики скорости и момента от наблюдателя и фактические измеренные датчиком скорости практически совпадают, так же можно отметить, что наблюдатель имеет малую статическую ошибку при крайних значениях погрешности сопротивления, вносимые в работу наблюдателя.

Для более детального анализа результатов исследования были определены статические ошибки определения скорости при условии внесения погрешности в значения активного сопротивления статора и активного сопротивления ротора. Для анализа статической ошибки определения скорости использован метод интегрирования мгновенных значений выходных переменных электропривода. Выражение, которое позволяет вычислить интегральный критерий качества, имеет вид

$$I(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) = \frac{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) - \omega_2(t)| dt}{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\omega_2(t)| dt} \cdot 100\% ,$$

где $\hat{\omega}_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t)$ – значения скорости, полученные от наблюдателя;

$\omega_2(t)$ – значение скорости получение от установленного датчика;

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – параметры электропривода.

Структурная схема, реализующая метод вычисления параметрической робастности, приведена на рисунке 16.

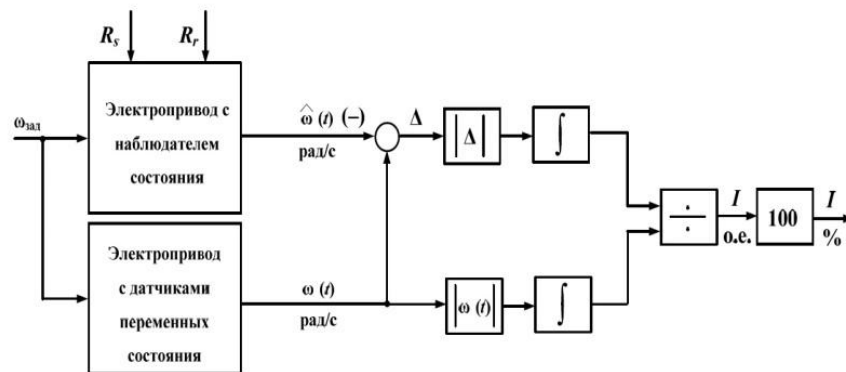


Рис. 16 Структурная схема, реализующая метод вычисления интегрального критерия качества

Fig. 16- Block diagram of the method calculations integral quality criterion

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Во время работы в АД происходят изменения параметров, наибольшее влияние на точность вычислений имеют активные сопротивления обмоток. Результаты определения статической ошибки при увеличении на 40% и уменьшении на 40% значений активных сопротивлений обмоток двигателя представлены в таблице 1.

Максимальная ошибка определения скорости адаптивными наблюдателями при изменении
активных сопротивлений статора и ротора

Maximum speed error by adaptive observers when changing stator and rotor active resistances

| Предельное сопротивление обмоток при изменениях температуры | Вид исследуемого адаптивного наблюдателя | | | | |
|---|--|--|--|---|---|
| | Наблюдатель попотокоцепле нию ротора с фильтром (%) | Наблюдатель по потокоцепле нию ротора с фильтром и ПИ-звеном (%) | Наблюдатель, анализирую щий ток статора (%) | Наблюдатель, анализирую щий ЭДС (%) | Наблюда тель полного порядка (%) |
| 1,4R _s | 98,36 | 1,83 | 53,78 | 0,99 | 2,3 |
| 1,4R _r | | | | | |
| 1,4R _s | 94,72 | 0,65 | 10,19 | 0,761 | 0,34 |
| 0,6R _r | | | | | |
| 0,6R _s | 5,616 | 16,09 | 26,69 | 1,232 | 2,193 |
| 1,4R _r | | | | | |
| 0,6R _s | 1,07 | 6,241 | 9,324 | 1,13 | 0,5 |
| 0,6R _r | | | | | |

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Выводы

Современные программные средства компьютерного моделирования позволяют моделировать динамические процессы в системе асинхронного электропривода с векторным управлением с использованием наблюдателей скорости различного типа.

Вычислительная мощность современных управляющих контроллеров делает возможной практическую реализацию и внедрение наблюдателей скорости в системы управления асинхронными электроприводами, что позволяет отказаться от использования датчиков скорости, устанавливаемых на валу двигателей и повысить надежность электроприводов различных производственных механизмов, например наклонных конвейеров.

Анализ результатов компьютерного моделирования систем векторного управления АД с рассматриваемыми наблюдателями показал, что при условиях изменения сопротивления обмоток асинхронного двигателя, наибольшую точность идентификации скорости обеспечивают наблюдатель, анализирующий ЭДС, и наблюдатель полного порядка.

Выполненные исследования показали, что наблюдатель полного порядка позволяет получить наилучшие результаты идентификации скорости электропривода, и возможна его практическая реализация в системе асинхронного электропривода с векторным управлением, следовательно этот электропривод может быть рекомендован для использования на наклонном конвейере ленточного типа.

Полученные в данном исследовании динамические характеристики системы электропривода с векторным управлением и наблюдателями скорости расширяют и систематизируют известные из других источников данные о точности идентификации скорости различными известными наблюдателями при температурном изменении сопротивления обмотки статора. Поскольку изменения температуры окружающей среды в рассмотренном диапазоне характерны для центральной и северной части Российской Федерации, электроприводы и средства автоматики, установленные на открытой территории предприятий, должны выбираться с учетом этих особенностей климатической зоны.

Результаты исследований могут быть использованы на рассмотренном наклонном ленточном конвейере, а также при проектировании и модернизации электроприводов механизмов общепромышленного и специального назначения с регулируемым асинхронными электроприводами с наблюдателями скорости.

Литература

- 1.Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
- 2.Синюкова, Т. В., Сенцов Е.В. Синтез идентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN // Приборы и системы. Управление,

контроль, диагностика. 2019 г. № 9. С. 13-20. DOI 10.25791/pribor.09.2019.870.

3. Калачев, Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе (записки дилетанта) [Текст] / Ю.Н. Калачев. – М., 2015. – 60 с.

4. Stanimir Valtchev; Viktor Meshcheryakov; Elena Gracheva etc, Energy-Saving Control for Asynchronous Motor Motion System Based on Direct Torque Regulator Energies 2023, Volume 16, Issue 9, 3870

5. Титов С.С. Разработка технологии и оборудования для индукционной осесимметричной закалки мелющих стальных шаров / С.С. Титов., В.Н. Мещеряков, И.О. Леушин, О.В. Фёдоров О.В. // Черные металлы. 2020. № 6. С. 11-16.

6. Сенцов Е.В. Моделирование бездатчиковой системы управления электропривода печного рольганга с применением нейросетевых объектов / Е.В. Сенцов, В.Н. Мещеряков //Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1 (58). С. 49-56.

7. Мещеряков В.Н., Данилов В.В. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 4-11.

8. T. V. Sinyukova, E. V. Sentsov and A. V. Sinyukov, "Neural Network Speed Observers," 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 320-324, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484.

9. Himanshu Swami, Amit Kumar Jain, "An Improved Scalar Controlled Drive Based on Steady State Model of Vector Controlled Drive for Squirrel Cage Induction Motor", 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Kyoto. 2021.pp. 1-5. doi:10.1109/ISIE45552.2021.9576415

10. Alexander Pugachev, Andrey Kosmodamianskiy, "Induction Motor Scalar Control System with Power Losses Minimization", 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). sochi. 2019.pp. 1-5. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8742951.

11. Куksин, А.В., Романов А.В. Математическая модель адаптивно-векторной системы управления бездатчикового асинхронного электропривода// Электротехника. 2009. № 11.

12. Фираго, Б.И. Векторные системы управления электроприводами [Текст]: учебное пособие / Б.И. Фираго, Д.С. Васильев. – Минск: Высшая школа, 2016. – 159 с.

13. Афанасьев, К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Афанасьев Кирилл Сергеевич. – Томск, 2015. – 106 с.

14. Трегубова К.А. Обзор существующих наблюдателей состояния в векторном электроприводе / К.А. Трегубова, Т.В. Синюкова // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки. Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 2018. С. 152-154.

15. Zhao Q., Yang Z., Sun X., Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter // International Journal of Electronics. 2020. V. 107. N 9. P. 1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>

Авторы публикации

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры Электропривода, Липецкий государственный технический университет.

Мантухов Егор Сергеевич – аспирант, Липецкий государственный технический университет.

Сдвижков Андрей Витальевич – аспирант, Липецкий государственный технический университет.

References

1. Novikov VA, Savva SV, Tatarintsev NI. Electric drive-in modern technologies: a textbook for university students. M.: Academy, 2014. 400 p.

2. Sinjukov, TV, Sentsov EV. Synthesis of the rotor frequency of the asynchronous rotor,

based on the concept NN. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2019;9:13-20. doi 10.25791/pribor.09.2019.870

3. Kalachev YuN. State observers in a vector electric drive (notes of an amateur). 2015. 60 p.

4. Stanimir Valtchev, Viktor Meshcheryakov, Elena Gracheva, et al. Energy-Saving Control for Asynchronous Motor Motion System Based on Direct Torque Regulator. *Energies* 2023;16(9):3870.

5. Titov SS, Meshcheryakov VN., Leushin IO. Development of technology and equipment for induction axisymmetric hardening of grinding steel balls. *Ferrous metals*. 2020; 6:11-16.

6. Sentsov EV, Meshcheryakov VN. Modeling of a sensorless control system for an electric drive of a furnace roller table using neural network objects. *Electrotechnical systems and complexes*. 2023;1 (58):49-56.

7. Meshcheryakov VN, Danilov VV. Improving the energy efficiency of an asynchronous electric drive with vector control by regulating the longitudinal component of the stator current at partial static load. *Electrical systems and complexes*. 2018;3 (40):4-11.

8. Sinyukova TV, Sentsov EV and Sinyukov AV. *Neural Network Speed Observers*, 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 320-324, doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484.

9. Himanshu Swami, Amit Kumar Jain. *An Improved Scalar Controlled Drive Based on Steady State Model of Vector Controlled Drive for Squirrel Cage Induction Motor*, 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Kyoto. 2021.pp. 1-5. doi:10.1109/ISIE45552.2021.9576415

10. Alexander Pugachev, Andrey Kosmodamianskiy. *Induction Motor Scalar Control System with Power Losses Minimization*, 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). sochi. 2019.pp. 1-5. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8742951.

11. Kuksin, AV, Romanov AV. Mathematical model of the adaptive-vector control system of a sensorless asynchronous electric drive. *Electrical engineering*. 2009. No. 11.

12. Firago, B.I. Vector control systems for electric drives. Minsk: Higher School, 2016. 159 p.

13. Afanasiev KS. Development of a state observer for an asynchronous electric drive with increased parametric robustness dis... cand. those. Sciences: 05.09.03 / Afanasiev Kirill Sergeevich. Tomsk, 2015. 106 p.

14. Tregubova KA. Review of existing state observers in a vector electric drive / K.A. Tregubova, T.V. Sinyukova. *Automation and informatics. Trends in the development of modern science*. Proceedings of the scientific conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University, 2018. P. 152-154.

15. Zhao Q, Yang Z, Sun X, Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter. *International Journal of Electronics*. 2020;107(9):1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>.

Authors of the publication

Viktor N. Meshcheryakov – Lipetsk State Technical University.

Egor S. Mantukhov – Lipetsk State Technical University.
Lipetsk State Technical University.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
Смежные шифры в рамках группы научной специальности:

Получено 10.05.2023 г.

Отредактировано 17.05.2023 г.

Принято 29.05.2023 г.