

УДК 621.3.07

## Наблюдатель угловой скорости ротора асинхронных приводов электроцентробежных насосных установок\*

В.В. ТИМОШКИН<sup>1</sup>, А.С. ГЛАЗЫРИН<sup>2</sup>, А.Ю. ЧЕРНЫШЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 634050, РФ, г. Томск, ул. Ленина 15, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ассистент кафедры электропривода и электрооборудования. E-mail: tim\_vv@mail.ru

<sup>2</sup> 634050, РФ, г. Томск, ул. Ленина 15, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электропривода и электрооборудования. E-mail: asglazyrin@tpu.ru

<sup>3</sup> 634050, РФ, г. Томск, ул. Ленина 15, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры электропривода и электрооборудования. E-mail: ach@tpu.ru

В связи с необходимостью ограничения действия ударных моментов на механизм и пусковых токов в установках ЭЦН в большинстве случаев используются такие устройства плавного пуска, как преобразователь частоты (ПЧ) и тиристорный регулятор напряжения (ТРН-АД). В устройствах ТРН-АД из-за технических сложностей, возникающих в случае установки датчика скорости, необходимого для обеспечения обратной связи в системе управления электроприводов, трудно обеспечить заданную разгонную характеристику. Предложена структура наблюдателя угловой скорости, позволяющая получать оценку угловой скорости на основе токов и напряжений, снятых с обмоток асинхронного двигателя при импульсно-фазовом управлении. В основе разработанного наблюдателя угловой скорости лежит математическая модель АД в двухфазной системе координат. Принцип работы наблюдателя угловой скорости заключается в отработке невязки результирующих модулей тока статора, полученных непосредственно с АД и математической модели, при одних и тех же входных воздействиях напряжения с помощью ПИ-принципа. Экспериментальные исследования показали работоспособность наблюдателя угловой скорости и правомерность использования для получения оценки угловой скорости двухфазной модели асинхронного двигателя при несинусоидальном напряжении ТРН.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, тиристорный регулятор напряжения, наблюдатель скорости, плавный пуск, электроцентробежный насос, преобразователь частоты, математическая модель, оценка крутящего момента, невязка, вектор тока и напряжения, асинхронный двигатель, импульсно-фазное регулирование, интегральный регулятор, плавный пуск, обратная связь

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-63-73

---

\* Статья получена 29 августа 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Для повышения эффективности асинхронных электроприводов электроцентробежных насосных установок (ЭЦНУ) необходимо использовать современные способы управления. Одна из главных проблем, появляющихся при эксплуатации ЭЦНУ, это гидроудары и рывки при прямом пуске асинхронного двигателя (АД) [1]. Основная опасность гидроудара заключается в том, в связи с быстрым изменением давления возникают локальные перенапряжения в гидравлической сети, а это, в свою очередь, приводит к поломке или быстрому износу основных узлов ЭЦНУ. Другой проблемой при прямом пуске являются большие пусковые токи асинхронного двигателя, которые приводят к просадке напряжения сети и к быстрому износу переключающих контактов. Помимо этого, стоит острая проблема с обеспечением энергосбережения насосных установок [2–6]. В связи с необходимостью ограничения ударных моментов на механизм и пусковых токов в большинстве случаев используются такие устройства плавного пуска, как преобразователь частоты (ПЧ) [7–9] и тиристорный регулятор напряжения (ТРН) [10, 11]. Преобразователи частоты, предлагаемые современными производителями, имеют значительно больший функционал для организации эффективного управления по сравнению с ТРН, но срок окупаемости у них выше. Чем больше мощность электропривода, тем выше разница в цене [12]. При длительной работе насосных установок в номинальном режиме или близком к нему коэффициент полезного действия у ТРН будет выше, чем у ПЧ, но в пусковых или кратковременных режимах будет меньше. Для обеспечения плавного пуска и небольшого диапазона регулирования угловой скорости центробежных установок наиболее выгодно использовать ТРН.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для повышения эффективности плавного пуска АД и работы ЭЦНУ вводят обратную связь по угловой скорости. Путем задания конкретного режима работы насосной установки в замкнутой системе возможно обеспечить энергосбережение. В ряде случаев установить датчик скорости на вал АД проблематично или нецелесообразно ввиду небольшого диапазона регулирования угловой скорости. Поэтому для решения такой проблемы хорошо подходят наблюдатели, которые позволяют получить информацию о текущей угловой скорости АД на основе косвенных данных. Основная часть наблюдателей угловой скорости АД проектировалась для частотного управления [13], и их работоспособность для ТРН не гарантирована. Для получения оценки угловой скорости АД с ТРН необходимо учитывать фактор несинусоидальности токов и напряжений при изменении угла управления [14–15].

В работе поставлена задача исследовать пусковые режимы электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД, с наблюдателем угловой скорости на имитационной модели.

## 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлена разработанная авторами структура наблюдателя для определения угловой скорости асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД [16].

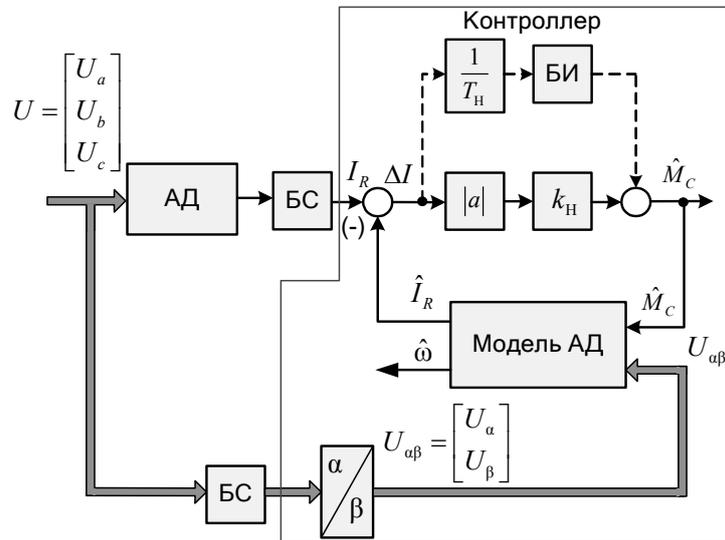


Рис. 1. Структура наблюдателя угловой скорости АД:

БС – блок согласования сигналов; БИ – блок интегрирования;  
 $|a|$  – вычисление абсолютного значения;  $\alpha, \beta$  – блоки преобразования из трехфазной в двухфазную систему координат

В основе наблюдателя угловой скорости лежит модель АД в двухфазной неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ . Принцип работы наблюдателя угловой скорости связан с нахождением оценки момента нагрузки на валу двигателя путем минимизации невязки  $\Delta \hat{I}$  между результирующим модулем тока и его оценкой:

$$\Delta \hat{I} = |I_R - \hat{I}_R|, \quad (1)$$

где  $I_R = \frac{2}{3} \sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}$  и  $\hat{I}_R = \frac{2}{3} \sqrt{\hat{I}_\alpha^2 + \hat{I}_\beta^2}$  – результирующий модуль токов АД и результирующий модуль оценки токов в системе координат  $\alpha, \beta$ .

Невязка момента нагрузки  $\Delta \hat{M}$  определяется по выражению

$$\Delta \hat{M} = |M_C - \hat{M}_C|, \quad (2)$$

где  $M_C \approx K_{r1} I_R$  и  $\hat{M}_C \approx K_{r2} \hat{I}_R$  – момент нагрузки и оценка момента нагрузки;  $K_{r1}$  – нелинейный коэффициент, характеризующий зависимость между нагрузкой  $M_C$  и током  $I_R$  АД;  $K_{r2}$  – нелинейный коэффициент, характеризующий зависимость между оценками нагрузки  $\hat{M}_C$  и тока  $\hat{I}_R$  АД.

В случае, когда  $\hat{I} \rightarrow 0$ , невязка момента нагрузки  $\Delta\hat{M}$  тоже будет стремиться к нулю.

При наличии адекватной модели асинхронной машины в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  можно принять  $K_{r1} = K_{r2}$ . С учетом данного условия  $\Delta\hat{M}$  будет определяться как

$$\Delta\hat{M} = K_{r1} |I_R - \hat{I}_R|. \quad (3)$$

Следовательно, используя выражение (3), невязку по току,  $\Delta I = |I_R - \hat{I}_R|$  возможно свести к нулю с помощью пропорционального принципа обработки (рис. 1), тогда оценка момента нагрузки будет определяться как

$$\hat{M}_C = K_H |I_R - \hat{I}_R|, \quad (4)$$

где  $K_H$  – коэффициент пропорциональности.

Оценка угловой скорости наблюдателя для электропривода, выполненного по схеме ТРН-АД, вычисляется по следующему выражению:

$$\frac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \frac{1}{J} [\hat{M}(t) - \hat{M}_C(t)], \quad (5)$$

где  $\hat{M}(t)$  – оценка электромагнитного момента двигателя.

Наблюдатель угловой скорости описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\hat{I}_{S\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_E} [U_{S\alpha}(t) - R_E \hat{I}_{S\alpha}(t) + K_r A_r \hat{\psi}_{r\alpha}(t) + K_r z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_{r\beta}(t)], \\ \frac{d\hat{I}_{S\beta}}{dt} = \frac{1}{L_E} [U_{S\beta}(t) - R_E \hat{I}_{S\beta}(t) + K_r A_r \hat{\psi}_{r\beta}(t) + K_r z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_{r\alpha}(t)], \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} = R_r K_r \hat{I}_{S\alpha} - A_r \hat{\psi}_{r\alpha}(t) - z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_{r\beta}(t), \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} = R_r K_r \hat{I}_{S\beta} - A_r \hat{\psi}_{r\beta}(t) - z_p \hat{\omega}(t) \hat{\psi}_{r\alpha}(t), \\ \hat{M}(t) = K_m [\hat{\psi}_{r\alpha}(t) \hat{I}_{S\beta} - \hat{\psi}_{r\beta}(t) \hat{I}_{S\alpha}], \\ \hat{M}_C(t) = k_H \Delta I, \end{array} \right. \quad (6)$$



$$B = \begin{pmatrix} U_{S\alpha}(t)/L_E & 0 \\ 0 & U_{S\beta}(t)/L_E \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{x}(t) = \begin{pmatrix} \hat{i}_{s\alpha}(t) \\ \hat{i}_{s\beta}(t) \\ \hat{\psi}_{r\alpha}(t) \\ \hat{\psi}_{r\beta}(t) \end{pmatrix}, \quad \hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{\phi}_\alpha \\ \hat{\phi}_\beta \\ \hat{I}_\alpha \\ \hat{I}_\beta \end{pmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix},$$

$$U_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}.$$

В ходе исследования было установлено, что эффективность работы наблюдателя угловой скорости повышается путем введения пропорционально-интегрального регулятора для отработки невязки по токам (рис. 2). Настраиваемыми коэффициентами наблюдателя в этом случае являются постоянная времени  $T_H$  и пропорциональный коэффициент  $k_H$ .

Было проведено исследование наблюдателя угловой скорости на имитационной модели в программной среде Matlab Simulink, описание которой изложено в [16]. Имитационная модель позволяет учитывать основные особенности силовой части и системы управления ТРН.

На рис. 3 представлены переходные процессы по скорости в системе ТРН-АД с наблюдателем и без него, где пуск осуществлялся с помощью задатчика интенсивности. Для корректного анализа плавного пуска замкнутой и разомкнутой системы значения задатчика интенсивности были скорректированы таким образом, чтобы конечная скорость, на которую выходит АД, была одинаковой. Анализ результатов переходных процессов (рис. 3) показывает, что плавный пуск АД возможно обеспечить как с обратной связью, так и без нее. Основными преимуществами электропривода с обратной связью по угловой скорости являются пуск по заданной траектории и обеспечение необходимого ускорения для исполнительного механизма [17]. Также было установлено, что обратная связь по угловой скорости позволяет снизить ударные моменты на механизм в среднем на 15...20 % (рис. 4), что дает возможность повысить количество часов безаварийной работы электропривода.

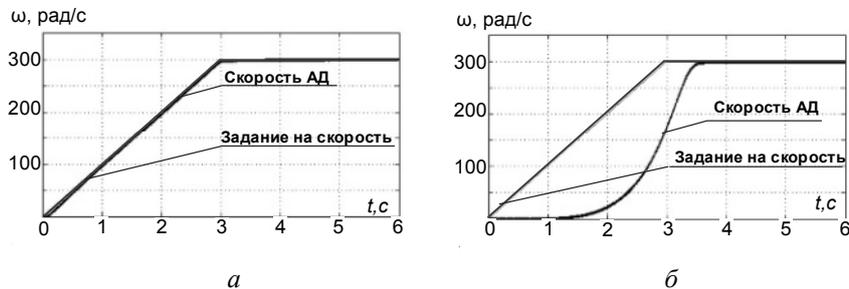


Рис. 3. Переходные процессы угловой скорости ротора АД:

$a$  – с обратной связью по угловой скорости;  $b$  – без обратной связи по угловой скорости

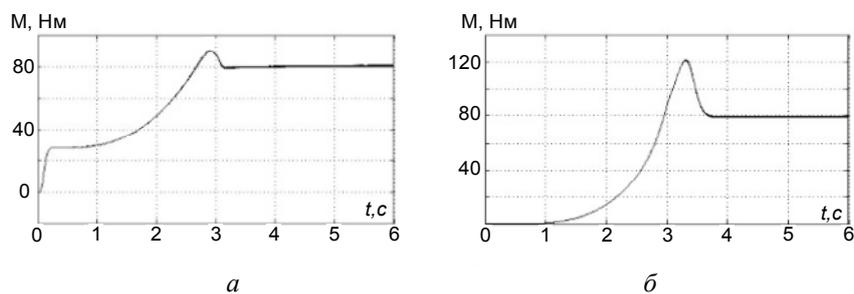


Рис. 4. Переходные процессы момента АД:

*a* – с обратной связью по угловой скорости; *б* – без обратной связи по угловой скорости

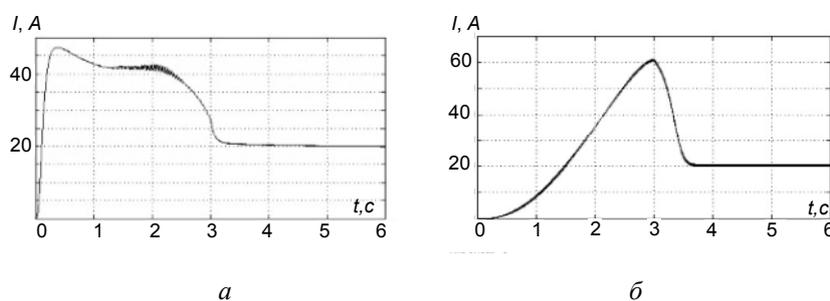


Рис. 5. Переходные процессы тока статора АД:

*a* – с обратной связью по угловой скорости; *б* – без обратной связи по угловой скорости

Значения пусковых токов в системе ТРН-АД с наблюдателем угловой скорости меньше, чем для разомкнутой системы (рис. 5), но при длительных пусках это приводит к увеличению тепловой нагрузки на обмотки АД.

За счет обеспечения требуемой угловой скорости ротора в составе электропривода ТРН-АД возможно организовать алгоритмы энергосбережения, позволяющие существенно снизить затраты на электроэнергию.

Предложенный наблюдатель угловой скорости хорошо подойдет для насосных станций с частыми пусками, вызванными неравномерным режимом работы скважины.

## ВЫВОДЫ

Обратная связь по угловой скорости позволяет повысить эффективность работы электропривода в составе ТРН-АД за счет более эффективного снижения ударных моментов на механизм по сравнению с разомкнутой системой при тех же параметрах пуска.

Показана работоспособность наблюдателя угловой скорости для электропривода по схеме ТРН-АД на основе двухфазной модели асинхронного двигателя при несинусоидальном напряжении питания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плавный пуск группы высоковольтных асинхронных электроприводов центробежных механизмов / В. Копырин, В. Кривовяз, А. Силуков, А. Ткачук // Силовая электроника. – 2008. – № 2 (16). – С. 54–57.
2. Хашимов А.А. Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода для установок и агрегатов промышленного, сельскохозяйственного и бытового значения // Приводная техника. – 2008. – № 5. – С. 57–62.
3. Развитие энергосберегающих электроприводных систем и способов повышения их эффективности в технологиях / М.П. Белов, Р. Кахоров, В.А. Новиков, А.А. Прокопов // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». – 2016. – Т. 5. – С. 78–89.
4. Николаев В.Г. Энергосберегающие способы управления группой лопастных насосов с регулируемым электроприводом // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 3. – С. 18–21.
5. Дидыч В.А. Пути энергосбережения в насосных установках системы мелиорации и орошения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 69. – С. 128–150.
6. Лысенко О.А. Режимы энергосбережения установок центробежных насосов с асинхронными двигателями // Известия Томского политехнического университета. – 2014 – Т. 325, № 4. – С. 133–141.
7. Толпаров Д.В., Дементьев Ю.Н. Анализ систем управления насосных станций // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311, № 4. – С. 113–118.
8. Свистунов В.А. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 12-2. – С. 135–140.
9. Захаров А.В., Колосов А.Л. Исследование эффективности применения специальных серий частотно регулируемых асинхронных двигателей в электроприводах центробежных насосов // Электротехника. – 2008. – № 11. – С. 49–53.
10. Копейкина Т.В. Анализ использования устройства плавного пуска и торможения двигателей электроустановок // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-4. – С. 587–591.
11. Ецин Е.К., Соколов И.А. Работа асинхронного электродвигателя с устройством плавного пуска // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 5. – С. 53–58.
12. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Обоснование использования типа ТРН-АД, замкнутых по наблюдателю угловой скорости, для решения технологических задач // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск, 2014. – С. 173–176.
13. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Идентификация скорости асинхронного электродвигателя лабораторного стенда с помощью фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4. – С. 66–69.
14. Зюзев А.М., Нестеров К.Е. К построению бездатчикового электропривода системы ТПН-АД // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 38–41.
15. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Асинхронный тиристорный электропривод с бездатчиковым измерителем скорости // Электромашиностроение и электрооборудование. – Киев, 2006. – Вып. 66. – С. 35–36.
16. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Разработка наблюдателя скорости для системы управления асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9-3. – С. 656–661.
17. Козлова Л.Е. Принцип построения архитектуры нейроэмулятора угловой скорости электропривода по схеме ТРН-АД // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 161–170.

*Тимошкин Вадим Владимирович*, кандидат технических наук, ассистент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – наблюдатели угловой скорости, идентификация параметров. Имеет более 20 публикаций. E-mail: timvv@sibmail.com

*Глазырин Александр Савельевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – идентификация, диагностика, интеллектуальное управление. Имеет более 50 публикаций. E-mail: asglazyrin@tpu.ru

*Чернышев Александр Юрьевич*, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – электропривод переменного тока. Имеет более 50 публикаций. E-mail: ach@tpu.ru

### ***An observer of the induction motor rotor angular speed of centrifugal electric pump units***\*

*V.V. TIMOSHKIN<sup>1</sup>, A.S. GLAZYRIN<sup>2</sup>, A.Yu. CHERNYSHYOV<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.), assistant lecturer. E-mail: tim\_vv@mail.ru*

<sup>2</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: asglazyrin@tpu.ru*

<sup>3</sup>*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: ach@tpu.ru*

A frequency controller (FC) and a thyristor voltage regulator (TVR) are used for soft starting and limiting the impact momenta influence on the mechanism and inrush currents in the centrifugal electric pump. It is difficult to achieve the desired acceleration characteristic in the thyristor voltage regulator and it depends on technical difficulties resulting from the speed sensor installation for providing feedback of the drive control system. It is also difficult to provide breakdown characteristics. So we set the task to develop the structure of the angular velocity observer for the AC drive with a thyristor voltage regulator and to study experimentally the observer efficiency. The authors have proposed the structure of the angular velocity observer which allows obtaining the estimate of the angular velocity on the basis of currents and voltages of the induction motor stator windings with the pulse-phase control. The AC motor mathematical model in the biphasic system of coordinates is the basis of the developed angular velocity observer. The operation principle of the angular velocity observer consists in revealing the discrepancy of the resulting stator current modules obtained directly from the AC motor and the mathematical model with the same voltage input by the proportional integral principle. When the current discrepancy tends to zero, it means that the corresponding load torque has been estimated and the observer has determined the current AC motor speed. The experimental research has shown the efficiency of the proposed angular velocity observer and the appropriateness of using the AC motor two-phase mathematical model to obtain an angular velocity estimate at a nonsinusoidal voltage of the thyristor voltage regulator

**Keywords:** induction motor drive, thyristor voltage regulator, speed observer, soft start, electric centrifugal pump, frequency converter, mathematical model, torque estimate, discrepancy, current and voltage vector, induction motor, pulse-phase control, integral regulator, smooth starting, feedback

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-63-73

---

\* Received 29 August 2016.

## REFERENCES

1. Kopyrin V., Krivoyaz V., Silukov A., Tkachuk A. Plavnyi pusk gruppy vysokovol'tnykh asinkhronnykh elektroprivodov tsentrobezhnykh mekhanizmov [Soft-start group of high-voltage induction motors centrifugal machines]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2008, no. 2 (16), pp. 54–57.
2. Khashimov A.A. Energoberegayushchie sistemy avtomatizirovannogo elektroprivoda dlya ustanovok i agregatov promyshlennogo, sel'skokhozyaistvennogo i bytovogo znacheniya [Energy saving systems for automated electric drive systems and components for industrial, agricultural and domestic values]. *Privodnaya tekhnika – Drive Technique*, 2008, no. 5, pp. 57–62.
3. Belov M.P., Kahorov R., Novikov V.A., Prokopov A.A. Razvitiye energoberegayushchikh elektroprivodnykh sistem i sposobov povysheniya ikh effektivnosti v tekhnologiyakh [The development of energy-saving electric drive systems and ways to increase efficiency in technology]. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2016, vol. 5, pp. 78–89.
4. Nikolaev V.G. Energoberegayushchie sposoby upravleniya gruppoy lopastnykh nasosov s reguliruемым elektroprivodom [Energy-sparing methods of controlling group of impeller pumps with regulated electric drive]. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*, 2008, no. 3, pp. 18–21.
5. Didych V.A. Puti energoberezheniya v nasosnykh ustanovkakh sistemy melioratsii i orosheniya [Ways for energy saving in pumping plants for melioration and irrigation systems]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2011, no. 69, pp. 128–150.
6. Lysenko O.A. Rezhimy energoberezheniya ustanovok tsentrobezhnykh nasosov s asinkhronnymi dvigatelyami [Power saving modes installations of centrifugal naos with asynchronous motors]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 133–141.
7. Tolparov D.V., Dement'ev Yu.N. Analiz sistem upravleniya nasosnykh stantsii [Analysis of pump station control systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 4, pp. 113–118.
8. Svistunov V.A. Avtomatizatsiya nasosnoi stantsii s primeneniem chastotno-reguliruемого elektroprivoda [Pumping station automation using variable frequency drives]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, no. 12-2, pp. 135–140.
9. Zakharov A.V., Kolosov A.L. Issledovanie effektivnosti primeneniya spetsial'nykh serii chastotno reguliruemykh asinkhronnykh dvigatelei v elektroprivodakh tsentrobezhnykh nasosov [Study the effectiveness of the special series of variable frequency induction motors in electric centrifugal pumps]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2008, no. 11, pp. 49–53. (In Russian)
10. Kopeikina T.V. Analiz ispol'zovaniya ustroystva plavnogo puska i tormozheniya dvigatelei elektroustanovok [Analysis of the use of soft starters and braking of electrical motors]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International journal of applied and fundamental research*, 2016, no. 12-4, pp. 587–591.
11. Eshchin E.K., Sokolov I.A. Rabota asinkhronnogo elektrodvigatelya s ustroystvom plavnogo puska [Work of induction motor with soft starter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2016, no. 5, pp. 53–58.
12. Kozlova L.E., Timoshkin V.V., Glazyrin A.S. [Rationale for the use of TVN-IM type, closed by the angular velocity observer, to solve technological problems]. *Elektrotekhnika. Energetika. Mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh [1st International Conference of Young Scientists "Electrical Engineering. Energy. Mechanical Engineering": proceedings]*. Novosibirsk, 2014, pp. 173–176.
13. Afanas'ev K.S., Glazyrin A.S. Identifikatsiya skorosti asinkhronnogo elektrodvigatelya laboratornogo stenda s pomoshch'yu fil'tra Kalmana i nablyudatelya Lyuenbergera [Identification of induction motor speed laboratory bench using a Kalman filter and observer Lyuenbergera]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya – Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012, no. 4, pp. 66–69.
14. Zyuzev A.M., Nesterov K.E. K postroeniyu bezdatchikovogo elektroprivoda sistemy TPN-AD [Sensorless drive systems based on a thyristor voltage converter and an asynchronous motor]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2005, no. 9, pp. 38–41.

15. Braslavskii I.Ya., Zyuzev A.M., Nesterov K.E. Asinkhronnyi tiristornyi elektroprivod s bezdatchikovym izmeritelem skorosti [Asynchronous thiristor electric drive with sensorless speed meter]. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* [Electric machine industry and electric equipment]. Kiev, 2006, iss. 66, pp. 35–36.

16. Kozlova L.E., Timoshkin V.V., Glazyrin A.S. Razrabotka nablyudatelya skorosti dlya sistemy upravleniya asinkhronnogo elektroprivoda s tiristornym regulyatorom napryazheniya [Speed observer design for control system of induction motor drives with thyristor voltage regulator]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2012, no. 9-3, pp. 656–661.

17. Kozlova L.E. Printsip postroeniya arkhitektury neiroemulyatora uglovoi skorosti elektroprivoda po skheme TRN-AD [The principle of designing an angular velocity neuroemulator architecture of the electric drive based on the TVR-IM circuit diagram]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 161–170.