Тип статьи: научная
УДК 631.372:004.4
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-4-47-55

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Сергей Николаевич Пиляев [1]***, Дмитрий Николаевич Афоничев*** [2]***,***
Сергей Александрович Врагов [3]
[1,2] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия*
[3] *Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия*
[1] pilyaevs@mail.ru
[2] dmafonichev@yandex.ru
[3] svragov@list.ru

Автор, ответственный за переписку: Сергей Николаевич Пиляев, pilyaevs@mail.ru
Corresponding author: Sergey Pilyaev, pilyaevs@mail.ru

Реферат. *В зависимости от типа предприятия затраты электроэнергии на электропривод технологических установок, составляют около 40…50 % всей потребляемой электроэнергии. Проанализированы два принципа управления асинхронным электродвигателем. Оптимальный, с точки зрения энергетической эффективности, скалярный закон регулирования амплитуды напряжения питания предполагает подбор для каждого фиксированного значения частоты питания и момента нагрузки такого значения амплитуды напряжения, при котором потери в двигателе минимальны, а КПД – максимальный. Для этих целей в состав электропривода добавляется дополнительный регулятор, который при изменении частоты питания корректирует в незначительных пределах полученное, согласно, базового закона значение амплитуды напряжения, таким образом, чтобы обеспечить экстремум КПД. В качестве целевой функции экстремального регулятора (критерия энергетической эффективности асинхронного электродвигателя) могут быть выбраны: потери мощности в двигателе, основанные на токе в обмотке статора или на величине основного магнитного потока, сохранение постоянного скольжения ротора, комбинации нескольких параметров. Предложена компьютерная модель системы скалярного управления с подобным экстремальным регулятором, созданная в программном комплексе SimInTech. Применение предлагаемого регулятора позволяет повысить КПД электродвигателя на 1,3…11,2 %, наибольшее значение увеличения КПД достигается при частоте 20 Гц, а наименьшее – при частоте 50 Гц. Предложенная компьютерная модель является универсальной, и позволяет исследовать различные комбинации оптимизационных критериев и алгоритмов работы экстремального регулятора.*

Ключевые слова: *энергоэффективность, электрическая энергия, электропривод, асинхронный электродвигатель, управление, экстремальный регулятор, потери, коэффициент полезного действия.*

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN AGRICULTURE

Sergey Pilyaev [1]***, Dmitry Afonichev*** [2]***, Sergey Vragov*** [3]
[1,2] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*
[3] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*
[1] pilyaevs@mail.ru
[2] dmafonichev@yandex.ru

[3] svragov@list.ru

Abstract. *The cost of electricity for the electric drive of technological installations is about 40 ... 50% of the total electricity consumed, depending on the type of enterprise. Two principles of control of an asynchronous electric motor are analyzed. Optimum from the point of view of energy efficiency, the scalar law of regulation of the supply voltage amplitude assumes the selection for each fixed value of the supply frequency and load moment of such a value of the voltage amplitude at which the losses in the motor are minimal and the efficiency is maximum. For these purposes, an additional controller is added to the composition of the electric drive, which, when the power frequency changes, corrects the value of the voltage amplitude obtained, according to the basic law, to a small extent, in such a way as to ensure the extremum of efficiency. As an objective function of the extremal controller (a criterion for the energy efficiency of an asynchronous electric motor), the following can be chosen: power losses in the motor based on the current in the stator winding or on the value of the main magnetic flux, maintaining a constant rotor slip, combinations of several parameters. A computer model of a scalar control system with a similar extremal controller, created in the SimInTech software package, is proposed. The use of the proposed regulator allows to increase the efficiency of the electric motor by 1.3 ... 11.2%, the largest increase in efficiency is achieved at a frequency of 20 Hz, and the smallest - at a frequency of 50 Hz. The proposed computer model is universal and allows you to explore various combinations of optimization criteria and algorithms for the extremal controller.*

Keywords: *energy efficiency, electric energy, electric drive, asynchronous electric motor, control, extreme regulator, losses, efficiency.*

Для цитирования: Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н., Врагов С.А. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода в сельском хозяйстве // Наука в центральной России. 2023. Т. 64, № 4. С. 47-55. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-4-47-55.

For citation: Pilyaev S., Afonichev D., Vragov S. Improving the energy efficiency of an asynchronous electric drive in agriculture. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 64(4): 47-55. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-4-47-55.

Введение. В связи с интенсификацией производства и широким внедрением современных технологий потребление электроэнергии сельскохозяйственными предприятиями увеличивается с каждым годом. С другой стороны, из-за несовершенства рынка электроэнергии и отраслевого регулирования тарифов цены на электроэнергию для сельскохозяйственных потребителей повышаются. Этот процесс негативно сказывается на развитии отрасли, так как значительно повышает себестоимость производимой продукции. Так, по литературным данным, доля оплаты электроэнергии в себестоимости сельскохозяйственной продукции составляет порядка 17…25 %, а в ряде производств, особенно с переработкой продуктов, достигает 40…50 % [1, 2], повышаясь с каждым годом. Поэтому, при невозможности повлиять на цену потребляемой электроэнергии и снижение затрат на ее использование необходимо повышение эффективности сельских систем электроснабжения и применение энергосберегающих и энергоэффективных устройств, потребляющих электроэнергию. Энергосбережение является наиболее дешевым и безопасным способом рационального использования генерирующих мощностей, так как затраты на экономию 1 кВт мощности обходятся в 4…5 раз дешевле, чем стоимость вновь вводимого 1 кВт генерируемой мощности [3].

Анализ структуры электропотребления типовых сельскохозяйственных предприятий показывает, что в зависимости от типа предприятия затраты электроэнергии на электропривод технологических установок составляют порядка 40…50 % всей потребляемой электроэнергии [2, 3]. Исходя из этого, задача повышения энергетической эффективности электроприводов технологических установок, заключающаяся в снижении потерь в них и повышении коэффициента мощности в сельскохозяйственных распределительных сетях, является одной из самых актуальных в настоящее время. Конечной целью всех мероприятий по энергосбережению в сельском хозяйстве является реализация следующего закона использования электрической энергии: на любой технологический процесс должно тратиться столько электрической энергии,

чтобы оптимальным образом обеспечивать его выполнение при минимуме ее потерь. В настоящее время создались все предпосылки для решения этой задачи – повышения энергетической эффективности электроприводов сельскохозяйственных технологических машин. К ним можно отнести: появление сравнительно недорогих технических средств управления – программируемых логических контроллеров, сетевого оборудования, интеллектуальных счетчиков электрической энергии, модемов и так далее; широкий уровень развития частотно управляемых электроприводов и другой техники электропривода; наличие развитой и апробированной теоретической базы как основы для создания моделей и алгоритмов управления уровнем электропотребления предприятия. Исходя из этого, к основным задачам снижения электропотребления сельскохозяйственного предприятия относятся следующие [4, 5, 6, 7, 8, 9]:

- разработка и внедрение новых инженерных решений и технических средств, позволяющих снизить реальное потребление электрической энергии в технологических процессах;
- разработка и внедрение новых систем управления режимами работы электрического оборудования технологических установок;
- внедрение новых моделей и алгоритмов оптимизации уровня потребления электрической энергии определенных групп технологического оборудования, основанных на современных цифровых технологиях.

Существует достаточно много самых разнообразных принципов и схем управления асинхронным электродвигателем, базовыми для которых являются два принципа управления: скалярный и векторный [10]. Каждый из этих принципов управления имеет свои достоинства и недостатки. Целью данной работы было рассмотрение принципа и алгоритм повышения энергетической эффективности электроприводов на базе асинхронных электродвигателей со скалярным управлением

Результаты и обсуждение. Принцип скалярного управления асинхронным двигателем основан на том, что при изменении частоты напряжения питания *f* амплитуда напряжения *U* тоже изменяется. Данный принцип предусматривает три варианта в зависимости от вида нагрузки двигателя [10, 11]: $U / f = const$ (рисунок 1) – для активной нагрузки (момент нагрузки постоянен); $U / f^2 = const$ – для нагрузки вентиля торного типа; $U / \sqrt{f} = const$ – для нагрузки, обратно пропорциональной частоте вращения.

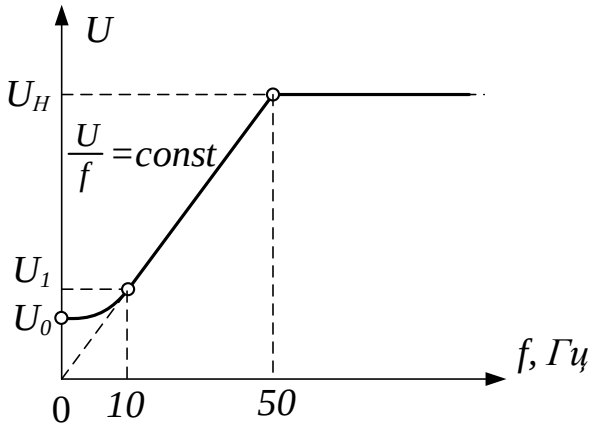

Рисунок 1 – Принцип скалярного частотного управления при $U / f = const$

Скалярное управление достаточно для большинства задач, в которых применяется электропривод с относительно небольшим диапазоном регулирования частоты вращения двигателя (до 1:10): для технологических установок, где не требуется высокая точность регулирования частоты вращения. Этот принцип относительно прост в реализации и более экономичен, чем более сложный векторный принцип управления. Поэтому системы электропривода с асинхронными электродвигателями на основе скалярного частотного

управления получили большое распространение в сельском хозяйстве. Однако, как показано в ряде исследований [5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14] законы изменения амплитуды питающего напряжения при скалярном управлении не обеспечивают достаточно энергоэффективные, наиболее выгоднейшие с точки зрения экономии электроэнергии, режимы работы. Под такими, энергосберегающими режимами работы понимаются такой закон изменения амплитуды питающего напряжения от его частоты $U(f)$, при котором для каждого значения частоты и момента нагрузки обеспечивается минимум потерь в двигателе, а следовательно максимальное значение коэффициента полезного действия (КПД). Таким образом, оптимальный, с точки зрения энергетической эффективности, скалярный закон регулирования амплитуды напряжения питания предполагает подбор для каждого фиксированного значения частоты питания f и момента нагрузки M такого значения U, при котором потери в двигателе минимальны, а КПД – максимальный. Для этих целей в состав электропривода добавляется дополнительный регулятор, который при изменении частоты питания f корректирует в незначительных пределах полученное, согласно, базового закона значение амплитуды напряжения U таким образом, чтобы обеспечить экстремум КПД. Функциональная схема подобной системы приведена на рисунке 2. В этом случае амплитуда питающего напряжения регулируется традиционным путем с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) ключами инвертора. Полученное с регулятора частоты вращения ротора значение частоты питающего напряжения подается на блок определения требуемой амплитуды напряжения, согласно, выбранного закона скалярного управления $U(f)$, к этой величине амплитуды напряжения U добавляется управляющий сигнал с экстремального регулятора ΔU, который позволяет получить наиболее оптимальное значение напряжения, обеспечивающее минимум заданного энергетического критерия эффективности.

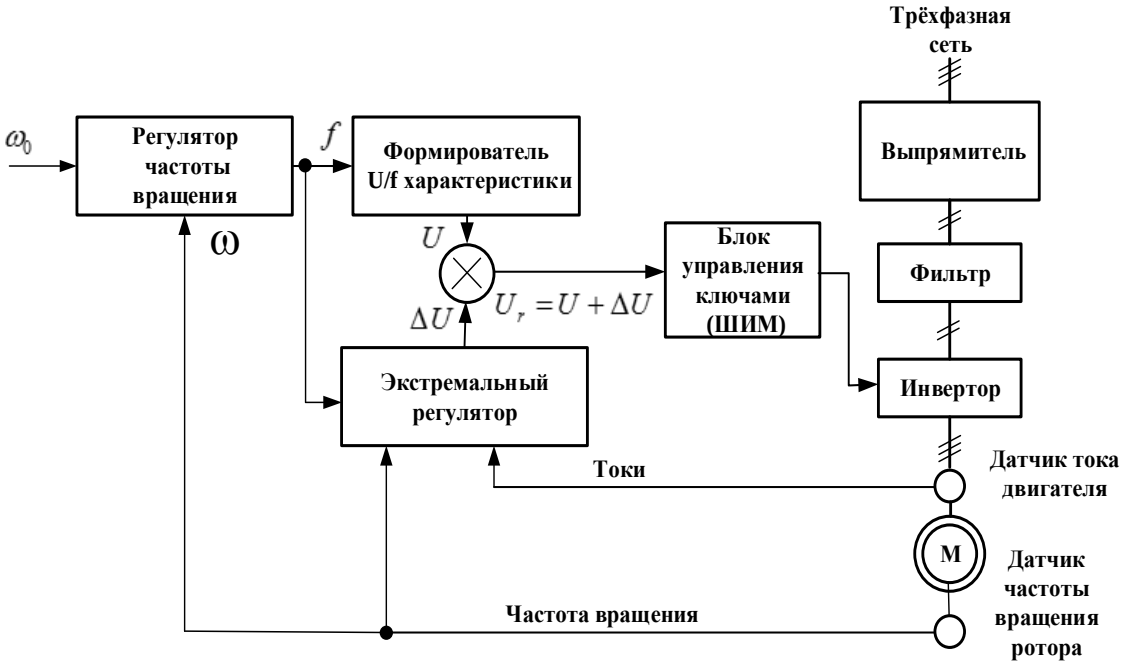

Рисунок 2 – Функциональная схема скалярного электропривода с экстремальным регулятором

В качестве целевой функции экстремального регулятора (критерия энергетической эффективности асинхронного электродвигателя) могут быть выбраны: потери мощности в двигателе, основанные на токе в обмотке статора или на величине основного магнитного потока, сохранение постоянного скольжения ротора, комбинации нескольких параметров [7, 10, 11, 12, 13,

14]. Алгоритмы поиска экстремума также могут быть разнообразными, четких, общепринятых рекомендаций и алгоритмов работы подобных энергосберегающих регуляторов пока не существует.

Достаточно часто в качестве основы модели потерь мощности в асинхронном электродвигателе используется величина основного магнитного потока. Так в работе [7] общие потери мощности ΔP при частотном управлении определяются следующим образом

$$\Delta P = 3R_1 I_1^2 + 3R_2 I_2^2 + \Delta P_{mn}\alpha^2\beta^k, \quad (1)$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления статора и ротора, Ом;

I_1, I_2 – токи статора и ротора, А;

ΔP_{mn} – номинальные потери в магнитопроводе, Вт;

α – относительное значение магнитного потока двигателя (в долях от номинального Φ_n);

β – относительная частота напряжения питания (в долях от номинальной частоты напряжения питания f_n);

k – коэффициент, зависящий от типа стали магнитопровода ($k = 1{,}3\ldots1{,}5$).

Номинальные потери в магнитопроводе определяются по известной зависимости [13]

$$\Delta P_{mn} \approx P_{1n} - M_n\omega_c - 3R_1 I_{1n} - 0{,}005P_{2n}, \quad (2)$$

где P_{1n}, P_{2n} – номинальные потребляемая и полезная мощности двигателя, Вт;

M_n – номинальный момент двигателя, Н·м;

$\omega_c = 2\pi f_n$ – номинальная синхронная частота, с$^{-1}$;

I_{1n} – номинальный ток статора, А.

Текущее значение основного магнитного потока определяется током в цепи намагничивания схемы замещения двигателя, который может быть представлен через аппроксимацию кривой намагничивания двигателя [15]

$$I_0^2(\alpha) \approx I_{0n}^2 \frac{a\left(1-\alpha^2\right)+\alpha^2}{b\left(1-\alpha^2\right)+\alpha^2}, \quad (3)$$

где I_{0n} – номинальный ток цепи намагничивания, А;

a, b – коэффициенты, которые подбираются так, чтобы наиболее точно описывать участок кривой намагничивания, в котором расположен интервал оптимального изменения магнитного потока;

α – относительный параметр, характеризующий текущее значение тока намагничивания и, следовательно, магнитного потока.

Из схемы замещения асинхронного двигателя [10] следует:

$$I_1^2 \approx I_2^2 + I_0^2;\ I_2 = \frac{M_n\omega_c\mu}{E_{1n}\alpha}, \quad (4)$$

где μ – относительное значение момента нагрузки (отношение текущего значения момента M к номинальному M_n);

E_{1n} – номинальная электродвижущая сила (ЭДС) статора, В.

Подставляя выражения (3) и (4) в (1) получим зависимости для определения потерь в асинхронном двигателе в следующем виде:

$$\Delta P = A\frac{a(1-\alpha^2)+\alpha^2}{b(1-\alpha^2)+\alpha^2} + B\frac{\mu^2}{\alpha^2} + \alpha^2\beta^k\Delta P_{mn};$$
$$A = 3R_1 I_{0n}^2;\ B = \frac{\left(R_1+R_2\right)\left(M_n\omega_c\right)^2}{3E_{1n}^2}. \quad (5)$$

Из формул (5) видно, что потери мощности в асинхронном электродвигателе при заданных значениях частоты питающего напряжения и моменте нагрузки являются функцией от текущего

значения тока намагничивания, то есть магнитного потока, который в этом выражении отражается переменной α. Следовательно, минимально возможные потери мощности при заданных значениях частоты питающего напряжения и моменте нагрузки достигаются при минимуме функционала $\Delta P(\alpha)$.

Поиск минимума функционала потерь мощности в двигателе (5) возможно реализовать несколькими способами. Так в работе [7] предлагается использование пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. В этом случае алгоритм работы экстремального регулятора (рисунок 2) состоит в следующем:

- по математической модели двигателя при текущих значениях тока статора и частоты вращения ротора вычисляются параметры μ и β в формуле (5);
- вычисляется значение переменной α, обеспечивавшее минимум функционала $\Delta P(\alpha)$, и требуемое значение тока намагничивания при данном значении α;
- с помощью ПИД или FUZZY регулятора определяется поправка ΔU для получения оптимального значения тока намагничивания.

Недостаток такого подхода заключается в трудностях задания и вычисления момента нагрузки двигателя. Поэтому в работе [9] предлагается использование для поиска минимума целевой функции потерь мощности в асинхронном двигателе методов и алгоритмов математического программирования. На рисунке 3 представлена компьютерная модель системы скалярного управления с подобным экстремальным регулятором, созданная в программном комплексе SimInTech [16].

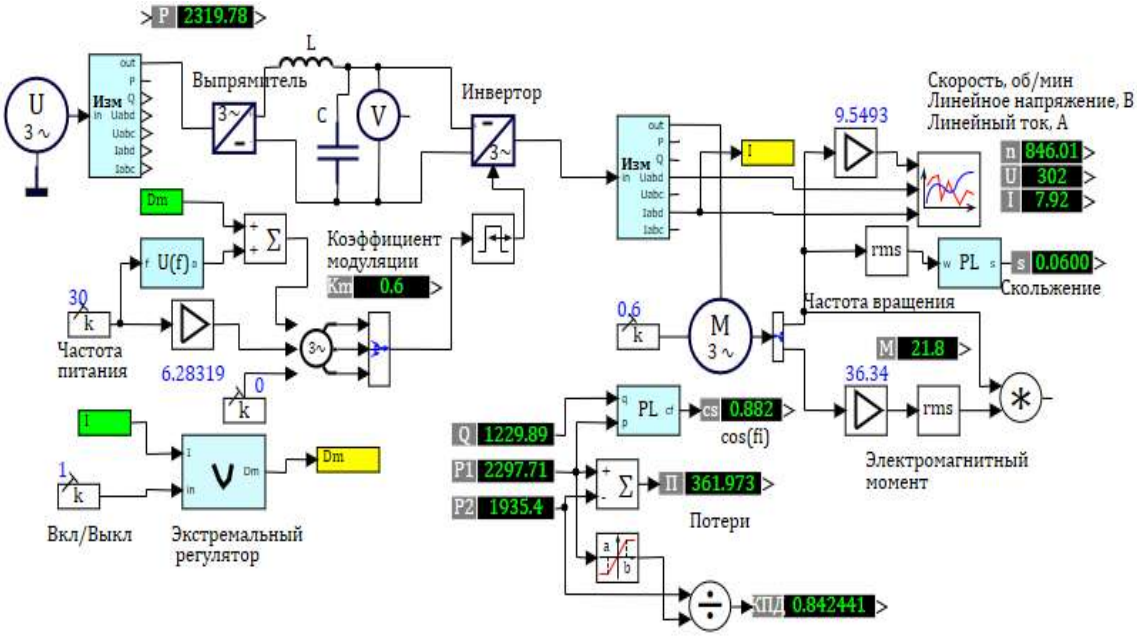

Рисунок 3 – Компьютерная модель системы скалярного управления с экстремальным регулятором в программе SimInTech

В таблице 1 приведены результаты моделирования частотного управления двигателя 4А112М4У3 мощностью 5,5 кВт при постоянном моменте нагрузки с энергосберегающим регулятором и без него.

Из таблицы 1 видно, что применение предлагаемого регулятора позволяет повысить КПД электродвигателя на 1,3…11,2 %, наибольшее значение увеличения КПД достигается при частоте 20 Гц, а наименьшее – при частоте 50 Гц.

Предложенная компьютерная модель является универсальной, и позволяет исследовать различные комбинации оптимизационных критериев и алгоритмов работы экстремального регулятора.

Таблица 1 – Энергетические параметры двигателя при M=22 Н·м

Частота f, Гц	Наличие регулятора	U, В	I, А	ΔP, Вт	P_1, Вт	P_2, Вт	КПД	$\cos\varphi$
10	Нет	187	6,93	210	869	658	0,776	0,578
	Да	189	6,84	173	835	662	0,792	0,584
15	Нет	237	6,66	255	1206	951	0,783	0,578
	Да	272	6.51	209	1192	983	0,824	0,662
20	Нет	188	8,17	411	1644	1232	0,749	0,900
	Да	279	7,03	259	1554	1295	0,833	0,822
25	Нет	258	8,11	373	1963	1590	0,809	0,887
	Да	297	7,07	265	1912	1647	0,861	0,835
30	Нет	297	7,92	363	2301	1938	0,842	0,881
	Да	313	6,88	271	2256	1985	0,879	0,834
35	Нет	322	7,61	354	2638	2284	0,865	0,878
	Да	343	7,29	273	2592	2318	0,894	0,838
40	Нет	341	7,84	343	2984	2641	0,885	0,877
	Да	350	6,85	272	2943	2671	0,907	0,842
45	Нет	358	7,64	338	3306	2967	0,897	0,875
	Да	370	7,21	279	3282	3004	0,915	0,844
50	Нет	382	7,37	339	3672	3334	0,907	0,878
	Да	384	6,88	295	3651	3356	0,919	0,863

Заключение. Таким образом, рассмотренные в данной работе принцип и алгоритм повышения энергетической эффективности электроприводов на базе асинхронных электродвигателей со скалярным управлением позволяют достаточно эффективно снизить общие потери в двигателе и тем самым повысить его КПД.

Список источников

1. Эрк А.Ф., Судаченко В.Н. Методы энергосбережения и повышения энергоэффективности сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – С-Пб.: ИАЭП, 2015. № 87. С.233–239.

2. Переверзев И.А., Султанов Г.А. Характеристика основных объектов электропотребления в сельскохозяйственном производстве // Новые технологии, 2013, № 3. С. 78–85.

3. Коняев Н.В., Познахирев Е.Н., Воронин В.В. Тенденция энергопотребления в сельском хозяйстве // Электроэнергетика сегодня и завтра: сборник научных статей международной научно-технической конференции. Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова. Курск: «Университетская книга», 2022. С. 88–92.

4. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Повышение энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий // Управление инновационным развитием аграрного сервиса России: материалы национальной научно-практической конференции; г. Воронеж; 15 сентября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 335–341.

5. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Повышение эффективности работы технологических установок // VII Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство»: сборник материалов; г. Воронеж, 20 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГУИТ, 2020. С. 416–419.

6. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Шубин Н.Э. Повышение энергоэффективности систем сельскохозяйственного электроснабжения средствами электропривода // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. Ч. II. С. 209–214.

7. Пиляев С.Н., Труфанов В.В., Афоничева Д.Д. Повышение энергоэффективности технологических установок на основе скалярного управления асинхронным электроприводом // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции в 2-х ч.; Россия, Воронеж, 25 февраля 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. II. С. 127–132.

8. Пиляев С.Н., Брюховецкий А.Н., Заболотная А.А. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода сельскохозяйственных технологических установок // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 09-10 июня 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 401–409.

9. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Модель системы скалярного управления асинхронным электроприводом с экстремальным регулятором // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции; Россия, Воронеж, 29-30 апреля 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. Ч. I. С. 65–73.

10. Austin Hughes, Bill Drury. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications. United Kingdom: Oxford, Elsevier Ltd, 2019. 649 p.

11. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.

12. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. М.: СОЛОН-Пресс, 2015.268 с.

13. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы двигателей переменного тока в системах частотного управления. Екатеринбург: Уральский Федеральный университет, 2017. 256 с.

14. Kioskeridis and N. Margaris Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996. Vol. 11. № 2. P. 213–220.

15. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff Analysis of electric machinery and drive systems. USA, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 635 p.

16. Среда динамического моделирования SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://simintech.ru.

Reference

1. Erk A.F., Sudachenko V.N. Methods of energy saving and energy efficiency improvement of agricultural production // Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products. - St. Petersburg: IAEP, 2015. No. 87. P. 233–239.

2. Pereverzev I.A., Sultanov G.A. Characteristics of the main objects of electricity consumption in agricultural production // New Technologies, 2013, No. 3. P. 78–85.

3. Konyaev N.V., Poznahirev E.N., Voronin V.V. Energy consumption trend in agriculture // Power industry today and tomorrow: collection of scientific articles of the international scientific and technical conference. Kursk State Agricultural Academy named after I.I. Ivanova. Kursk: University Book, 2022, pp. 88–92.

4. Afonichev D.N., Pilyaev S.N. Improving the energy efficiency of agricultural enterprises // Management of innovative development of agrarian service in Russia: materials of the national scientific and practical conference; Voronezh; September 15, 2020 Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 335–341.

5. Afonichev D.N., Pilyaev S.N. Improving the efficiency of technological installations // VII International scientific and technical conference "Innovative technologies in the food industry: science, education and production": collection of materials; Voronezh, November 20, 2020 Voronezh: VSUIT, 2020, pp. 416–419.

6. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Shubin N.E. Improving the energy efficiency of agricultural power supply systems by means of an electric drive // Actual directions of scientific research for the effective development of the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference; Voronezh, March 27, 2020 Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2020. Part II. pp. 209–214.

7. Pilyaev S.N., Trufanov V.V., Afonicheva D.D. Improving the energy efficiency of technological installations based on scalar control of an asynchronous electric drive // Trends in the development of technical means and technologies in the agro-industrial complex: materials of the international scientific and practical conference in 2 hours; Russia, Voronezh, February 25, 2021 Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021. Part II. pp. 127–132.

8. Pilyaev S.N., Bryukhovetsky A.N., Zabolotnaya A.A. Improving the energy efficiency of an asynchronous electric drive of agricultural technological installations // Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference; Voronezh, June 09-10, 2020 Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 401–409.

9. Pilyaev S.N., Afonichev D.N. Model of a scalar control system for an asynchronous electric drive with an extreme controller // Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific-practical conference; Russia, Voronezh, April 29-30, 2021. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2021. Part I. P. 65–73.

10. Austin Hughes, Bill Drury. Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications. United Kingdom: Oxford, Elsevier Ltd, 2019. 649 p.

11. Sokolovsky G.G. Electric drives of alternating current with frequency regulation. M.: Publishing Center "Academy", 2006. 272 p.

12. Vasiliev B.Yu. Electric drive. Energy of the electric drive. M.: SOLON-Press, 2015. 268 p.

13. Polyakov V.N., Shreiner R.T. Energy efficient modes of AC motors in frequency control systems. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2017. 256 p.

14. Kioskeridis and N. Margaris Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996. Vol. 11. No. 2. P. 213–220.

15. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff Analysis of electric machinery and drive systems. USA, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 635 p.

16. SimInTech dynamic modeling environment [Electronic resource]. Access mode: http://simintech.ru.

Информация об авторах

С.Н. Пиляев - кандидат технических наук, доцент; Д. Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор; С.А. Врагов – преподаватель.

Information about the authors

S. Pilyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; D. Afonichev – Doctor of Technical Sciences, Professor; S. Vragov – lecturer.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 23.07.2023 Принята к публикации (Accepted): 24.08.2023