

Л. А. Липницкий

*Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЕМОГО ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА ПТИЧНИКОВ

Аннотация: Для обеспечения воздухообмена в птичниках используются вентиляционные системы, оборудованные осевыми вентиляторами с трехфазными асинхронными двигателями с регулированием частоты вращения для непрерывного плавного удаления загрязненного воздуха. В статье приведены результаты исследований влияния мощности трехфазного асинхронного двигателя осевого вентилятора на технические характеристики двигателя при регулировании его частоты вращения изменением величины питающего синусоидального напряжения. Установлено, что в этом двигателе в диапазоне вращения 950–1000 об/мин фазный ток статорной обмотки превышает номинальный фазный ток в 1,5 раза, что при длительной работе ведет к перегреву и выходу из строя двигателя. Для надежной и устойчивой работы регулируемого двигателя мощность вентиляторной нагрузки была уменьшена в 2 раза, при этом максимальный фазный ток стал меньше номинального фазного тока двигателя, что повысило устойчивость и надежность работы двигателя. Однако при этом был значительно сужен линейный диапазон регулировочной характеристики, ряд параметров двигателя ухудшились. В результате было предложено модернизировать трехфазный асинхронный двигатель путем увеличения числа витков статорной обмотки, что привело к снижению мощности исследуемого двигателя. Как показало исследование, модернизированный трехфазный асинхронный двигатель с вентиляторной нагрузкой обладает улучшенными техническими характеристиками, включая расширение линейного участка регулировочной характеристики, средних значений коэффициента мощности и КПД, уменьшение среднего значения фазного тока статорной обмотки двигателя, меньшую крутизну изменения числа оборотов двигателя от изменения напряжения. Была достигнута большая надежность и устойчивость работы двигателя и улучшен его тепловой режим работы. Значимость полученных результатов состоит в том, что они позволяют рекомендовать модернизированный регулируемый ТАД для привода осевых вентиляторов, используемых в вентиляционных системах птичников, для организации непрерывного плавного удаления загрязненного воздуха.

Ключевые слова: трехфазный асинхронный двигатель, осевой вентилятор, воздухообмен, птичник, вентиляторная нагрузка, мощность, частота вращения, напряжение, ток, обмотка статора

Для цитирования: Липницкий, Л. А. Улучшение технических характеристик регулируемого трехфазного асинхронного двигателя осевого вентилятора системы воздухообмена птичников / Л. А. Липницкий // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 99–115. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-99-115>

Leanid A. Lipnitski

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Belarus

IMPROVEMENT OF SPECIFICATIONS OF CONTROLLED THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR OF AXIAL FAN IN HENHOUSE AIR EXCHANGE SYSTEM

Abstract: To ensure air exchange in henhouses, ventilation systems equipped with axial fans with three-phase asynchronous motors with speed control for continuous smooth removal of contaminated air are used. The paper presents the results of studies of the effect of power of a three-phase asynchronous motor of an axial fan on specifications of the motor when controlling its speed by changing the value of the supply sinusoidal voltage. It is determined that in the rotation range of 950–1000 rpm in this motor, the phase current of the stator winding exceeds the rated phase current by 1.5 times, which leads to overheating and getting the motor out of order in case of prolonged operation. For reliable and stable operation of the adjustable motor, the fan load power was 2 times reduced, while the maximum phase current became less than the nominal phase current of the motor, which increased the stability and reliability of the motor. However, the linear range of the control parameters was significantly narrowed, a number of engine parameters deteriorated. As a result, it was proposed to upgrade the three-phase asynchronous motor by increasing the number of coils of the stator winding, which led to decrease in power of the motor studied. As the study showed, the upgraded three-phase asynchronous motor with a fan load has improved specifications, including expansion of the linear section of the control parameter, the average values of power factor and efficiency,

decrease in the average phase current of the stator winding of the motor, the lower steepness of change in the motor rpm from voltage changes. High reliability and stability of the motor were achieved and its thermal operating mode was improved. The research results allow to recommend the upgraded three-phase asynchronous motor for axial fans drives of henhouse ventilation systems for continuous smooth removal of contaminated air.

Keywords: three-phase asynchronous motor, axial fan, air exchange, henhouse, fan load, power, rpm, voltage, current, stator winding

For citation: Lipnitski L. A. Improvement of specifications of controlled three-phase asynchronous motor of axial fan in henhouse air exchange system. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2020, vol. 58, no 1, pp. 99–115 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-99-115>

Введение. Обеспечение воздухообмена в птичниках является довольно сложной проблемой с точки зрения промышленной вентиляции как в вопросе проектирования, так и технического исполнения. На повышение эффективности птицеводческого производства влияет целый ряд факторов, включая температуру и расход воздуха, концентрацию влаги и углекислого газа в нем [1–3]. Важнейшим фактором, обеспечивающим поддержание микроклимата в птичниках, является плавное регулирование воздухообмена [4–6].

Создание нормируемого микроклимата в птичниках осуществляется регулированием воздухообмена в них при помощи осевых вентиляторов с трехфазными асинхронными двигателями. Наиболее частым способом регулирования воздухообмена является изменение числа включаемых вентиляторов, что приводит к неравномерности микроклимата по объему помещения [7]. Отмеченный недостаток устраняется путем непрерывного плавного удаления загрязненного воздуха из помещений птичников с помощью регулирования воздухопроизводительности осевых вентиляторов за счет изменения частоты вращения двигателей [8, 9].

Существует два способа плавного регулирования частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей (ТАД) осевых вентиляторов [10, 11]:

- 1) изменением частоты питающего напряжения двигателя инвертором;
- 2) изменением величины питающего напряжения двигателя трехфазными автотрансформаторным или тиристорным регуляторами напряжения.

При изменении частоты питающего напряжения инвертор преобразует электроэнергию трехфазной электросети с напряжением 220/380 В переменного тока и стабильной частотой 50 Гц в электроэнергию трехфазного переменного тока переменной частоты, но из-за сложной конструкции, недостаточно высокой надежности и высокой стоимости этот способ для регулирования воздухопроизводительности небольших осевых вентиляторов не используется [12, 13].

При регулировании частоты вращения ТАД осевых вентиляторов путем изменения величины питающего напряжения при помощи трехфазного тиристорного регулятора сильно искажается синусоидальная форма питающего напряжения, в результате значительно ухудшаются технические характеристики двигателя, и его работа в диапазоне регулирования частоты вращения становится недостаточно надежной и устойчивой [14, 15].

Трехфазный асинхронный двигатель с регулированием частоты вращения изменением величины напряжения питания при помощи трехфазного автотрансформаторного регулятора напряжения для регулирования воздухопроизводительности осевого вентилятора не применяется из-за больших массогабаритных характеристик автотрансформатора, сложности его эксплуатации для регулирования величины синусоидального напряжения, прикладываемого к статорной обмотке двигателя [16, 17]. Однако трехфазный автотрансформаторный регулятор напряжения, прикладываемый к статорной обмотке двигателя, позволяет исследовать влияние мощности ТАД на его технические характеристики, так как он не искажает синусоидальное напряжение и тем самым исключает влияние несинусоидального напряжения на технические характеристики.

В связи с вышеизложенным представляется актуальным исследовать возможность изменения технических характеристик ТАД с вентиляторной нагрузкой для получения более устойчивой и надежной его работы при плавном регулировании частоты вращения.

Цель исследования – улучшение технических характеристик существующих трехфазных асинхронных двигателей с целью их использования для плавного регулирования воздухопроизводительности осевого вентилятора.

Материалы и методы исследования. Основными техническими характеристиками, определяющими работу ТАД осевых вентиляторов в диапазоне регулирования его частоты вращения изменением величины синусоидального напряжения, прикладываемого к статорной обмотке двигателя, являются зависящие от величины синусоидального напряжения U параметры [18]:

$$P = f(U); \quad I = f(U); \quad n = f(U); \quad \cos \varphi = f(U); \quad \eta = f(U).$$

где P – мощность, потребляемая двигателем; I – фазный ток статорной обмотки двигателя; n – частота вращения двигателя; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя; η – КПД двигателя.

Многочисленными исследованиями работы ТАД с вентиляторной нагрузкой при регулировании его частоты вращения путем изменения величины питающего напряжения установлено, что фазный ток статорной обмотки при частоте вращения, равной 0,67 от частоты n_c синхронной

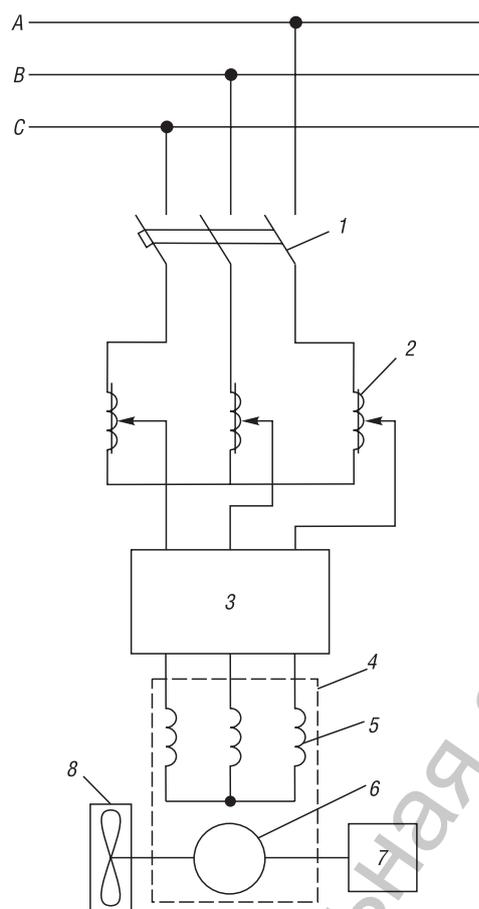


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема испытательного стенда для исследования влияния мощности регулируемого ТАД на его технические характеристики: 1 – автоматический выключатель; 2 – трехфазный автотрансформаторный регулятор; 3 – комплексный измерительный прибор; 4 – трехфазный асинхронный двигатель; 5 – статорная обмотка; 6 – ротор; 7 – тахометр; 8 – осевой вентилятор

Fig. 1. The electrical circuit diagram of installation for studying the effect of power of an adjustable three-phase asynchronous motor on its specifications: 1 - automatic switch; 2 - three-phase autotransformer regulator; 3 - integrated measuring device; 4 - three-phase asynchronous motor; 5 - stator winding; 6 - rotor; 7 - tachometer; 8 - axial fan

скорости, превышает номинальный фазный ток двигателя в 1,5–2 раза [19–21]. Из-за этого для предотвращения перегрева и выхода из строя ТАД с осевых вентиляторов необходимо применять двигатель с повышенным скольжением и завышать его мощность в 2–4 раза [22].

Для определения значений фазного тока I , потребляемой мощности P , частоты вращения n и напряжения питания U трехфазного асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой на кафедре энергоэффективных технологий МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ в 2018 г. был создан испытательный стенд, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 1.

При замыкании автоматического выключателя 1 при помощи трехфазного автотрансформаторного регулятора 2 изменяется величина напряжения U , прикладываемого к статорной обмотке 5 ТАД, при этом меняется частота вращения n ротора 6, к которому присоединены осевой вентилятор 8 и тахометр 7. Значения I , P , U измеряются комплексным прибором 3 (К50), а частота вращения n – тахометром 7.

При помощи испытательного стенда в 2019 г. на указанной выше кафедре исследована работа асинхронного двигателя АИР71А4 (производитель ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель», Беларусь). Данный двигатель выбран как наиболее часто применяемый в осевых вентиляторах, используемых для регулирования воздухообмена в птичниках.

Технические данные серийного ТАД АИР71А4 приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики трехфазного асинхронного двигателя АИР71А4, ОАО «Могилевский завод «Электродвигатель», Беларусь

T a b l e 1. Specifications of the three-phase asynchronous motor AIR71A4, OJSC “Mogilev Plant “Electric Motor”, Belarus

Параметры	Значение
Мощность, P , кВт	0,55
Напряжение сети, U , В	220/380
Частота вращения, n , об/мин	1360
Коэффициент мощности, $\cos \varphi_n$	0,71
Номинальный ток, I , А	1,7/2,9
Коэффициент полезного действия η_n	0,71

Результаты и их обсуждение. ТАД АИР71А4 с вентиляторной нагрузкой $P_{нар}$, равной номинальной мощности ТАД $P_n = 550$ Вт, при регулировании его частоты вращения n в пределах 950–1000 об/мин путем изменения величины синусоидального питающего напряжения при длительной работе выходит из строя из-за перегрева, так как фазный ток статорной обмотки при этой частоте вращения превышает номинальный ток в 1,5 раза. При этом работа двигателя с этой частотой вращения является не устойчивой из-за большой крутизны характеристики $n = f(U)$ [23, 24].

Для обеспечения надежной и устойчивой работы регулируемого ТАД осевого вентилятора мощность вентиляторной нагрузки уменьшена в 2 раза. Технические данные ТАД АИР71А4 с вентиляторной нагрузкой, составляющей почти половину величины мощности двигателя, приведены в табл. 2.

Так как мощность вентиляторной нагрузки уменьшена в 2 раза, то двигатель АИР71А4 увеличил число оборотов при $U = 380$ В до 1450 об/мин, и при частоте вращения ротора двигателя $n = 950$ –1000 об/мин максимальный фазный ток I стал меньше номинального фазного тока двигателя.

Измеренные комплексным прибором 3 и тахометром 7 значения параметров I, P, U, n регулируемого ТАД с вентиляторной нагрузкой, составляющей половину величины мощности двигателя, приведены в табл. 3.

На основании измеренных значений параметров $I, P, n, \cos \varphi, \eta$ ТАД при изменении величины питающего синусоидального напряжения двигателя были построены графики (рис. 2) $P = f(U)$, $I = f(U)$, $n = f(U)$, а также графики $\cos \varphi = f(U)$, $\eta = f(U)$. При этом значения коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД η двигателя рассчитывали по следующим формулам:

$$\cos \varphi = \frac{P}{1,73 UI}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{300}{P} \left(\frac{n}{1450} \right)^3. \quad (2)$$

Регулировочная характеристика $n = f(U)$ показывает, что для получения широкого диапазона регулирования частоты вращения двигателя приходится значительно уменьшить (до 80 В) напряжение питания двигателя. При этом двигатель имеет два линейных диапазона изменения частоты вращения – от 400 до 1200 об/мин при изменении U от 80 до 180 В и от 1200 до 1450 об/мин при изменении U от 180 до 380 В. В большинстве случаев воздухопроизводительность осевого вентилятора изменяют путем регулирования частоты ТАД за счет изменения частоты питающего напряжения от 80 до 180 В. Однако на этом участке регулировочная характеристика $n = f(U)$ имеет достаточно большую крутизну 8,5 об/(мин·В), что сказывается на устойчивости работы двигателя. Максимальный ток статорной обмотки двигателя при этом уменьшился до 1,4 А.

Анализ графика $\cos \varphi = f(U)$ показал, что коэффициент мощности двигателя увеличивается от 0,65 до 0,85 при изменении U от 80 до 180 В и уменьшается с 0,85 до 0,55 при изменении U от 180 до 380 В.

Таблица 2. Технические характеристики ТАД АИР71А4 при вентиляторной нагрузке 0,55 мощности P_n двигателя

Table 2. Specifications of the three-phase asynchronous motor AIR71A4 a fan load of 0.55 motor power P_n

Параметр	Значение
Мощность, P , кВт	0,3
Напряжение сети, U , В	220/380
Частота вращения, n , об/мин	1450
Коэффициент мощности, $\cos \varphi_n$	0,55
Номинальный ток, I , А	1,2/2,1
Коэффициент полезного действия η	0,68

Таблица 3. Значения технических характеристик регулируемого ТАД АИР71А4 при вентиляторной нагрузке 0,5 мощности P двигателя

Table 3. Values of specifications of the adjustable three-phase asynchronous motor AIR71A4 at a fan load of 0.5 motor power P

U , В	I , А	P , Вт	n , об/мин	$\cos \varphi$	η
80	1,000	85	370	0,61	0,06
120	1,370	220	810	0,77	0,24
160	1,360	315	1160	0,84	0,49
200	1,180	350	1300	0,86	0,62
240	1,080	370	1370	0,83	0,68
280	1,050	380	1405	0,75	0,72
300	1,025	390	1420	0,73	0,72
360	1,120	420	1440	0,60	0,70
380	1,200	435	1450	0,55	0,69

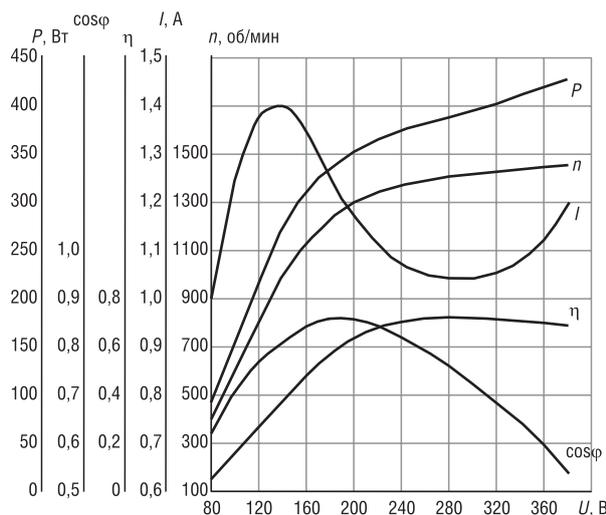


Рис. 2. Технические характеристики регулируемого ТАД АИР71А4 при вентиляторной нагрузке 0,5 мощности P двигателя

Fig. 2. Specifications of the adjustable three-phase asynchronous motor AIR71A4 at a fan load of 0.5 motor power P

Таблица 4. Технические характеристики модернизированного ТАД АИР71А4М с вентиляторной нагрузкой

Table 4. Specifications of upgraded three-phase asynchronous motor AIR71A4M with fan load

Параметр	Значение
Мощность, P , кВт	0,285
Напряжение сети, U , В	220/380
Частота вращения, n , об/мин	1400
Коэффициент мощности, $\cos \phi$	0,79
Номинальный ток, I , А	0,73/1,26
Коэффициент полезного действия η	0,6

Таблица 5. Значения технических характеристик модернизированного ТАД с вентиляторной нагрузкой

Table 5. Values of specifications of upgraded three-phase asynchronous motor with fan load

U , В	I , А	P , Вт	n , об/мин	$\cos \phi$	η
90	0,51	48	230	0,6	0,03
120	0,69	96	440	0,67	0,09
150	0,86	162	650	0,73	0,18
180	0,936	228	860	0,78	0,29
210	0,943	282	1040	0,82	0,41
240	0,906	312	1160	0,83	0,52
270	0,846	336	1250	0,85	0,60
300	0,778	348	1320	0,86	0,69
330	0,745	360	1360	0,85	0,73
360	0,736	366	1380	0,80	0,75
380	0,73	375	1405	0,78	0,77

С целью улучшения технических характеристик регулируемого ТАД мощность исследуемого двигателя уменьшили путем увеличения числа витков статорной обмотки. Для этого из пазов статора исследуемого двигателя извлекли трехфазную обмотку, а в пазы поместили обмотку с большим числом витков меньшего сечения, в результате номинальная мощность ТАД стала равна 285 Вт (табл. 4).

При помощи испытательного стенда (рис. 1) были определены значения параметров (U , P , I , n), характеризующих работу модернизированного ТАД осевого вентилятора в диапазоне регулирования частоты вращения n (табл. 5).

Значения коэффициентов мощности $\cos \phi$ и КПД η ТАД в диапазоне регулирования частоты вращения были рассчитаны с использованием полученных значений U , P , I , n (табл. 5). При этом значения коэффициента мощности $\cos \phi$ определяли по формуле (1), а КПД – по формуле (3):

$$\eta = \frac{285}{P} \left(\frac{n}{1400} \right)^3 \quad (3)$$

По данным табл. 5 построены графики $P = f(U)$, $I = f(U)$, $n = f(U)$, $\cos \phi = f(U)$, $\eta = f(U)$, отображающие изменения технических характеристик в диапазоне регулирования частоты вращения n (рис. 3).

Положительным моментом модернизированного ТАД является увеличение линейного

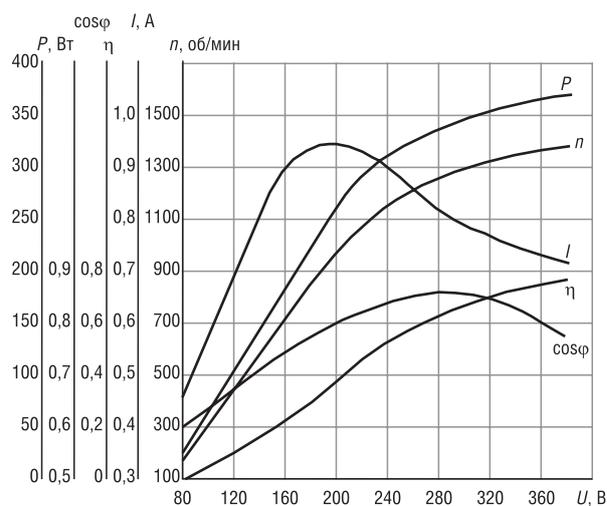


Рис. 3. Изменения технических характеристик модернизированного ТАД в диапазоне регулирования частоты вращения

Fig. 3. Changes in specifications of the upgraded three-phase asynchronous motor in the frequency control range

участка регулировочной характеристики $n = f(U)$ с диапазоном $n = 150\text{--}1250$ об/мин при изменении U от 80 до 260 В и уменьшение крутизны регулировочной характеристики $n = f(U)$ с 8,5 до 6 об/(мин·В), что привело к повышению устойчивости работы ТАД. Значительно увеличиваются средние значения коэффициента мощности и КПД в зоне регулирования частоты вращения, в то время как уменьшается среднее значение фазного тока статорной обмотки двигателя, в результате повышается надежность работы двигателя и улучшается его тепловой режим работы.

Выводы

1. Улучшение технических характеристик $P = f(U)$, $I = f(U)$, $n = f(U)$, $\cos \varphi = f(U)$, $\eta = f(U)$ в диапазоне регулирования частоты вращения ТАД осевого вентилятора, мощность которого в 2 раза превышает мощность вентиляторной нагрузки, достигнуто путем уменьшения его мощности до мощности вентиляторной нагрузки за счет снижения мощности трехфазной статорной обмотки двигателя вследствие увеличения ее числа витков и размещения их в тех же пазах статора, что и прежняя обмотка.

2. В результате модернизированный ТАД с вентиляторной нагрузкой имеет линейный участок регулировочной характеристики $n = f(U)$ в диапазоне частоты вращения от 150 до 1250 об/мин при изменении питающего напряжения двигателя от 80 до 260 В, а крутизна регулировочной характеристики $n = f(U)$ снизилась в 1,4 раза, при этом значительно уменьшилось среднее значение фазового тока статорной обмотки.

3. Улучшение технических характеристик регулируемого ТАД с вентиляторной нагрузкой приводит к повышению устойчивости и надежности его работы.

Значимость полученных результатов состоит в том, что они позволяют рекомендовать модернизированный регулируемый ТАД для привода осевых вентиляторов, используемых в вентиляционных системах птичников, для организации непрерывного плавного удаления загрязненного воздуха.

Список использованных источников

1. Автоматизированная система обеспечения микроклимата в птичниках / И.М. Довлатов [и др.] // Вестн. НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 8–18.
2. Овсянников, А.П. Показатели микроклимата в птицеводческом помещении для кур несушек / А.П. Овсянников, С.М. Домолазов // Учен. зап. Казан. гос. акад. ветеринар. медицины им. Н.Э. Баумана. – 2015. – Т. 221, № 1. – С. 160–161.
3. Егiazаров, А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов / А.Г. Егiazаров. – М. : Стройиздат, 1981. – 239 с.
4. Попова, Л.Н. Эффективная система технологии обеспечения микроклимата в птичниках / Л.Н. Попова, М.Г. Гамидов // Дальневост. аграр. вестн. – 2009. – № 4. – С. 48–50.
5. Лукьянов, В. Проблемы микроклимата в птицеводстве / В. Лукьянов // Птицеводство. – 2005. – № 3. – С. 46–48.
6. Мамедов, Э.С. Регулирование воздухообмена в бройлерном птицеводстве / Э.С. Мамедов // Междуна. техн.-экон. журн. – 2012. – № 2. – С. 84–87.
7. Регулируемые асинхронные электродвигатели в сельскохозяйственном производстве / В.Н. Андрианов [и др.] ; под ред. Д.Н. Быстрицкого. – М. : Энергия, 1975. – 399 с.
8. Оськин, С.В. Особенности электропривода вентиляционных установок в птичниках / С.В. Оськин, В.И. Шипалов // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2008. – № 6. – С. 21–22.
9. Харченко, Д.П. Многоскоростной электропривод вентилятора птичника с коммутатором статорной обмотки на основе бесконтактных коммутирующих ключей // Д.П. Харченко // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2015. – № 10. – С. 18–20.
10. Масандилов, Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей / Л.Б. Масандилов, В.В. Москаленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 96 с. – (Библиотека электромонтера ; вып. 469).
11. Дайнеко, В.А. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий : учеб. пособие / В.А. Дайнеко, А.И. Ковалинский. – Минск : Новое знание, 2008. – 319 с.
12. Воробьев, В.А. Электропривод сельскохозяйственных машин / В.А. Воробьев. – М. : БИБКМ ; ТРАНСЛОГ, 2016. – 299 с.
13. Калинин, И.Ф. Исследование рациональных способов частотного регулирования скорости асинхронных двигателей / И.Ф. Калинин, В.И. Пантелеев, Б.П. Соустин // Изв. Том. политехн. ин-та. – 1972. – Т. 225. – С. 136–140.

14. Гринштейн, Б. И. Опыт разработки и внедрения тиристорных преобразователей частоты для пуска и регулирования частоты вращения мощных синхронных машин / Б. И. Гринштейн, А. М. Колоколкин, А. Н. Тарасов // *Электр. станции.* – 2005. – № 8. – С. 45–53.
15. Браславский, И. Я. Линеаризация САР скорости асинхронного электропривода с тиристорным фазовым управлением / И. Я. Браславский, А. М. Зюзев, Л. П. Кокшаров // *Электричество.* – 1981. – № 12. – С. 42–46.
16. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов ; под ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2012. – 675 с.
17. Фоменков, А. П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий / А. П. Фоменков. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Колос, 1984. – 288 с.
18. Алиев, И. И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах / И. И. Алиев. – М. : РадиоСофт, 2004. – 125 с.
19. Чупейкина, Н. Н. Виды отказов асинхронных двигателей, их признаки, причины и методы устранения / Н. Н. Чупейкина, Э. О. Удодова // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2006. – Спец. вып. 3 (регион. прил. Якутия). – С. 221–248.
20. Данилов, В. Н. Электропривод с вентиляторной нагрузкой для получения низких частот вращения / В. Н. Данилов, Б. Д. Папин, Г. Н. Синева // *Вестн. Челяб. агроинженер. ун-та.* – 1996. – Т. 14. – С. 114–121.
21. Ванурин, В. Н. Снижение пускового тока асинхронных двигателей изменением параметров статорной обмотки / В. Н. Ванурин, К. Б. Пономаренко, А. С. Креймер // *Науч. журн. КубГАУ.* – 2013. – № 87 (03). – С. 226–239.
22. Маковский, А. Л. Силовые преобразователи электрической энергии в технических системах управления : учеб. пособие / А. Л. Маковский. – Минск : БГУИР, 2018. – 250 с.
23. Прохоров, С. Г. Электрические машины / С. Г. Прохоров, Р. А. Хуснутдинов. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2002. – 162 с.
24. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод : учеб. пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск : Том. политехн. ун-т, 2010. – 223 с.

References

1. Dovlatov I. M., Yuferev L. Yu., Kirsanov V. V., Pavkin D. Yu., Matveev V. Yu. Automated system of provision of the microclimate in poultry houses. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*, 2018, no. 7 (86), pp. 8-18 (in Russian).
2. Ovsyannikov A. P., Domolazov S. M. Indicators of microclimate in poultry premises for laying hens. *Uchenye zapiski Kazanskoi gosudarstvennoi akademii veterinarnoi meditsiny im. N. E. Baumana = Scientific notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*, 2015, vol. 221, no. 1, pp. 160-161 (in Russian).
3. Egiazarov A. G. *Heating and ventilation of buildings and structures of agricultural complexes*. Moscow, Stroizdat Publ., 1981. 239 p. (in Russian).
4. Popova L. N., Gamidov M. G. Effective system of technology of maintenance of a microclimate in hen houses. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik = Far Eastern Agrarian Herald*, 2009, no. 4, pp. 48-50 (in Russian).
5. Luk'yanov V. Microclimate problems in poultry farming. *Ptitsevodstvo [Poultry]*, 2005, no. 3, pp. 46-48 (in Russian).
6. Mamedov E. S. Regulating air interchange in broiler production. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal = The International Technical-Economic Journal*, 2012, no. 2, pp. 84-87 (in Russian).
7. Andrianov V. N., Bystritskii D. N., Pavlov A. V., Cheburkina G. M. *Adjustable asynchronous electric motors in agricultural production*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 399 p.
8. Os'kin S. V., Shipalov V. I. Features of electric drive ventilation systems in poultry houses. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva [Mechanization and Electrification of Agriculture]*, 2008, no. 6, pp. 21-22 (in Russian).
9. Kharchenko D. P. Multi-speed electric house fan with stator winding switch based on non-contact switching keys. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva [Mechanization and Electrification of Agriculture]*, 2015, no. 10, pp. 18-20 (in Russian).
10. Masandilov L. B., Moskalenko V. V. *Adjusting the rotation speed of asynchronous motors*. 2nd ed. Moscow, Energiya Publ., 1978. 96 p. (in Russian).
11. Daineko V. A., Kovalinskii A. I. *Electrical equipment of agricultural enterprises*. Minsk, Novoe znanie Publ., 2008. 319 p. (in Russian).
12. Vorob'ev V. A. *An electric drive of agricultural machinery*. Moscow, BIBKOM, TRANSLOG Publ., 2016. 299 p. (in Russian).
13. Kalinin I. F., Panteleev V. I., Soustin B. P. The study of rational methods of frequency regulation of the speed of asynchronous motors. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute]*, 1972, vol. 225, pp. 136-140 (in Russian).
14. Grinshtein B. I., Kolokolkin A. M., Tarasov A. N. Experience in the development and implementation of thyristor frequency converters for starting and controlling the speed of powerful synchronous machines. *Elektricheskie stantsii = Electrical Stations*, 2005, no. 8, pp. 45-53 (in Russian).
15. Braslavskii I. Ya., Zyuzev A. M., Koksharov L. P. Linearization of automatic control systems of speed of asynchronous electric drive with a thyristor phase control. *Elektrichestvo*, 1981, no. 12, pp. 42-46 (in Russian).
16. Kopylov I. P. *Electrical machinery*. 2nd ed. Moscow, Yurait Publ., 2012. 675 p. (in Russian).
17. Fomenkov A. P. *Electric drive of agricultural machinery, units and production lines*. 2nd ed. Moscow, Kolos Publ., 1984. 288 p. (in Russian).

18. Aliev I. I. *Asynchronous motors in three-phase and single-phase modes*. Moscow, RadioSoft Publ., 2004. 125 p. (in Russian).
19. Chupeikina N. N., Udodova E. O. Types of failures of asynchronous motors, their signs, causes and methods of elimination. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2006, spec. iss. 3, pp. 221–248 (in Russian).
20. Danilov V. N., Papin B. D., Sineva G. N. Fan-driven electric drive for obtaining low speeds. *Vestnik Chelyabinskogo agroinzhenernogo universiteta* [Bulletin of the Chelyabinsk Agroengineering University], 1996, vol. 14, pp. 114–121 (in Russian).
21. Vanurin V. N., Ponomarenko K. B., Kreimer A. S. Reduction of inrush current for induction motors with changing parameters of a stator winding. *Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2013, no. 87 (03), pp. 226–239 (in Russian).
22. Makovskii A. L. *Power converters of electric energy in technical control systems*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2018. 250 p. (in Russian).
23. Prokhorov S. G., Khusnutdinov R. A. *Electrical machinery*. Kazan, Publishing House of Kazan State Technical University, 2002. 162 p. (in Russian).
24. Dement'ev Yu. N., Chernyshev A. Yu., Chernyshev I. A. *An electric drive*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2010. 223 p. (in Russian).

Информация об авторе

Липницький Леонід Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергоэффективных технологий, Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет (ул. Долгобродская, 23/1, 220070 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: leonid-l@tut.by

Information about author

Leonid A. Lipnitski – Ph. D. (Engineering). International Sakharov Environmental Institute, of Belarusian State University (23/1 Dolgobrodskaya Str., 220070 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leonid-l@tut.by