

УДК 621.3.048

## Сравнительная оценка различных способов сушки изоляции обмоток электродвигателей

А. Е. Немировский\*, Г. А. Кичигина, И. Ю. Сергиевская,  
О. М. Никифорова, В. А. Соколова

\*Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия;  
e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7205-3580>

Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
10.10.2022;

получена  
после доработки  
26.10.2022

Ключевые слова:

электроосмос,  
сушка,  
изоляция  
обмотки,  
электродвигатель

Для цитирования

Расчеты технико-экономического эффекта от использования тепловых и реализованных на основе электроосмоса способов сушки применительно к сельскохозяйственному производству проводились по разработанным алгоритмам. При этом сравнивались печная сушка (сушильный шкаф СНОЛ 3,5 × 3,5 для ЭД 0,25–2,2 кВт, сушильный шкаф с нагревателями 10 кВ для ЭД 3–55 кВт), токовая сушка (трансформатор трехфазный для питания инструмента ТСИ-2,5, трансформатор ТД-102), электроосмотическая сушка (устройство ЭОС), конвективная сушка (устройство КС), конвективно-электроосмотическая сушка (устройство КЭС). Электроосмотическая сушка лишена недостатков, присущих тепловым методам сушки; так как она не требует разборки и демонтажа ЭД на рабочем месте, повышенного расхода электроэнергии и не способствует термической деструкции изоляции. На основе электроосмотического способа сушки разработаны электроосмотепловая и конвективно-электроосмотическая сушка. Экономический эффект от внедрения разработанных устройств электроосмотической сушки обеспечивается за счет повышения производительности труда в 1,5–11,4 раза, экономии электроэнергии в 80–1 230 раз в зависимости от мощности ЭД, а также повышения долговечности изоляции посредством сведения деструкции к нулю (электроосмотическая сушка и влагозащита) или уменьшения ее в 10 раз (конвективно-электроосмотическая сушка).

Немировский А. Е. и др. Сравнительная оценка различных способов сушки изоляции обмоток электродвигателей. Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 4. С. 354–364. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-354-364>.

## Comparative assessment of different methods of drying electric motors windings insulation

Aleksandr E. Nemirovskiy\*, Galina A. Kichigina, Irina Y. Sergievskaya,  
Olga M. Nikiforova, Veronika A. Sokolova

\*Vologda State University, Vologda, Russia;  
e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7205-3580>

Article info

Received  
10.10.2022;

received  
in revised form  
26.10.2022

Key words:

electroosmosis,  
drying,  
insulation,  
windings,  
electric motor

Abstract

Calculations of the technical and economic effect from the use of thermal and electroosmosis-based drying methods in relation to agricultural production have been carried out according to the developed algorithms. For this purpose, the study compares oven drying (OD) (drying box SNOL 3.5×3.5 for EM 0.25–2.2 kW, drying box with heaters 10 kV for EM 3–55 kW), electrodynamic drying (ED) (three-phase transformer for device power supply TTD-2.5, transformer TD-102), electroosmotic drying (EOD device), convective drying (CD) (CD device), convective-electroosmotic drying (CED) (CED device). EOD is free from shortcomings being characteristic of heat drying methods; since it does not require disassembly and dismantling of the electric motors at the workplace, increased power consumption and does not contribute to thermal degradation of the insulation. Based on the electroosmotic method of drying, electroosmothermal and convective-electroosmotic drying have been developed. The economic effect from the introduction of the developed devices for electroosmotic drying is ensured by increasing labor productivity by 1.5–11.4 times, saving electricity by 80–1,230 times, depending on the power of the ED, and also increasing the durability of insulation by reducing destruction to zero (electroosmotic drying and moisture protection) or reducing it by 10 times (convective-electroosmotic drying).

For citation

Nemirovskiy, A. E. et al. 2022. Comparative assessment of different methods of drying electric motors windings insulation. *Vestnik of MSTU*, 25(4), pp. 354–364. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-354-364>.

## Введение

Увлажнение изоляции обмоток является значимой причиной выхода из строя электродвигателей (ЭД) в промышленном производстве. В сельском хозяйстве по этой причине отказывают до 20 % ЭД (Немировский и др., 2021). Тепловые способы сушки изоляции обмоток имеют характерные недостатки: ЭД нужно разбирать и демонтировать с рабочего места; изоляция обмоток ЭД подвержена термической деструкции; повышенный расход электроэнергии; большие трудозатраты и т. д.

В Вологодском государственном университете на кафедре электрооборудования разработана электроосмотическая сушка (ЭОС), которая основана на электрокинетических явлениях (Немировский и др., 2017а; 2020; 2017б; 2021). ЭОС можно применять совместно с легким токовым подогревом или с тепловой конвекцией обмоток ЭД. Таким образом, на основе ЭОС дополнительно разработаны электроосмотепловая и конвективно-электроосмотическая сушки.

ЭОС лишена недостатков, присущих тепловым методам сушки. Электроосмотическая сушка (без токового подогрева и тепловой конвекции) протекает без повышения температуры и является холодной сушкой. Принцип ЭОС реализован в устройствах УЭСИ-0,4кВ, УЭСИ-3-10кВ, ВУЭСОС-6-10кВ, УЭСТ-0,6 кВ, а также в устройствах влагозащиты электрооборудования УВНЭД-1, УВНЭД-1М, УЭВ-6-10кВ, УВНЭД-2. Устройства сушки (УС) успешно эксплуатируются на многих промышленных и сельскохозяйственных предприятиях Российской Федерации.

## Материалы и методы

Особенности тепловых и разработанных способов сушки изоляции обмоток электродвигателей приводятся на рис. 1, 2. При сравнении этих способов выявляются преимущества новых разработок: энергоэкономичность, снижение трудозатрат и т. д.

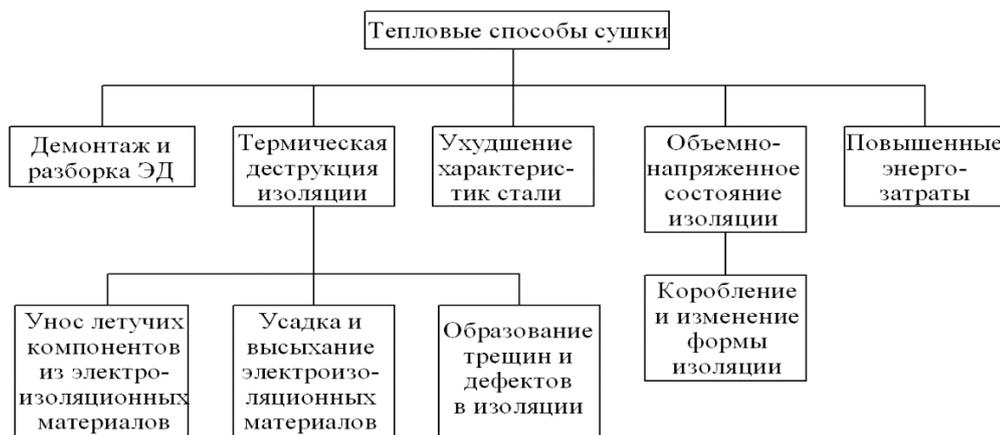


Рис. 1. Особенности тепловых способов сушки

Fig. 1. Features of thermal drying methods

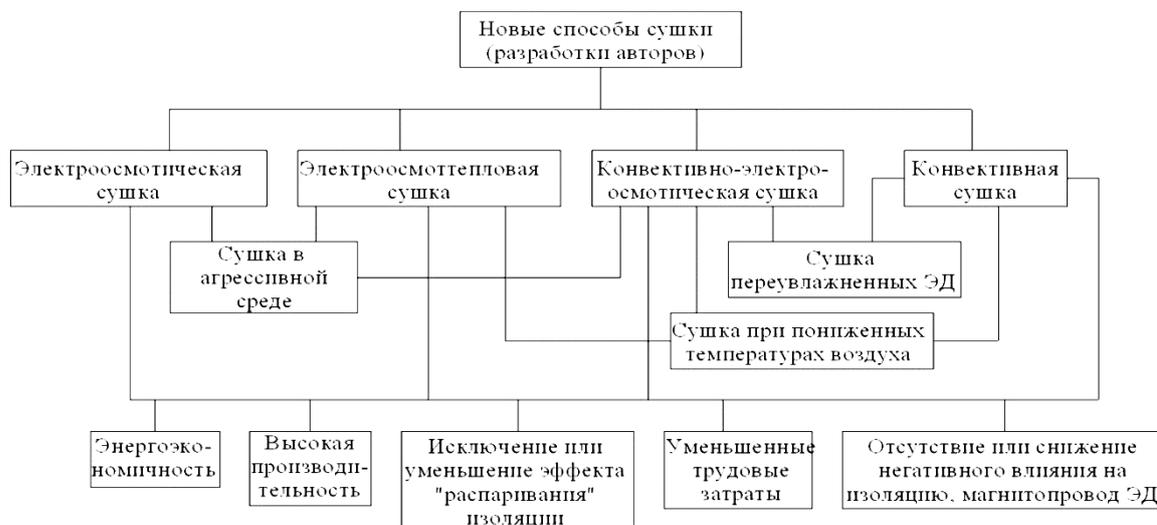


Рис. 2. Особенности разработанных способов сушки

Fig. 2. Features of worked-out drying methods

Расчеты эффекта от использования новых устройств сушки применительно к производству выполнялись по алгоритмам (Немировский и др., 2021). Вычисления осуществлялись для следующих способов и устройств сушки:

- печная сушка (ПС): сушильный шкаф СНОЛ 3,5 × 3,5 для ЭД 0,25–2,2 кВт; сушильный шкаф с нагревателями 10 кВт для ЭД 3–55 кВт;
- токовая сушка (ТС): трансформатор трехфазный для питания инструмента ТСИ-2,5; сварочный трансформатор ТД-102;
- электроосмотическая сушка: устройство ЭОС;
- конвективная сушка (КС): устройство КС (УКС);
- конвективно-электроосмотическая сушка (КЭС): устройство КЭС.

Наиболее распространенные тепловые способы сушки ПС, ТС и КС (Алякритский и др., 1974; Грибанов, 2001; Хомутов, 1990) могут служить базой для сравнения с новыми способами ЭОС и КЭС. Вариант КС, предложенный для расчета, имеет много преимуществ и отличается от известных способов сниженными трудозатратами за счет исключения разборки ЭД.

Эффект от использования нового УС для одной сушки  $i$ -го по мощности ЭД определяется по формулам (Немировский и др., 1988; Перова и др., 2006):

$$\mathcal{E}_i = z_{1i}T_{1i}\alpha - z_{2i}T_{2i} + (I'_{1i} - I'_{2i}), \quad (1)$$

или

$$\mathcal{E}_i = (z_{1i}T_{1i}\alpha + I'_{1i}) - (z_{2i}T_{2i} + I'_{2i}),$$

где  $z_{1i}$ ,  $z_{2i}$  – удельные приведенные затраты на использование соответственно базового и нового УС ЭД в течение часа, руб./ч;  $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$  – длительность одной операции сушки обмоток ЭД  $i$ -й группы соответственно с помощью базового и нового УС, ч;  $I_1$ ,  $I_2$  – дополнительные издержки потребителя сверх расходов, учтенных в приведенных затратах (демонтаж и монтаж ЭД, транспортировка к месту сушки ЭД), в расчете на одну операцию сушки, руб.;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий изменение срока службы нового УС по сравнению с базовым<sup>1</sup>:

$$\alpha = \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}, \quad (2)$$

здесь  $P_1$ ,  $P_2$  – доли отчислений от балансовой стоимости на реновацию базового и нового УС ( $P = I/T_c$ );  $T_c$  – срок службы УС с учетом износа, лет;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности ( $E_n = 0,15$ ).

Выделение длительности сушки обмоток ЭД в качестве отдельного показателя позволяет привести к сопоставимому виду сравниваемые варианты по объему выполняемой работы. Удельные приведенные затраты по каждому варианту сравниваемых устройств равны

$$z = \frac{Z}{T_p}, \quad (3)$$

где  $Z$  – приведенные затраты на изготовление УС, руб.;  $T_p$  – время работы устройств, ч.

Время работы устройств с учетом их постоянной загруженности прием равным годовому фонду рабочего времени при односменной работе рабочих, так как односменная организация труда получила наибольшее распространение среди работников электроэнергетических служб в промышленном и сельскохозяйственном производстве. При наличии двухсменной работы необходимо учесть корректирующий коэффициент  $K_c$ , тогда

$$z = \frac{Z}{T_p K_c}, \quad (4)$$

где  $K_c = 2$ .

Приведенные затраты определяются следующим образом:

$$Z = E_n K + I, \quad (5)$$

где  $K$  – капитальные вложения на изготовление одного устройства, руб.;  $I$  – ежегодные издержки производства, руб.

<sup>1</sup> Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999, № ВК 477). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634>.

Ввиду отсутствия затрат в ходе строительства здания, сооружения, производства оснастки и т. д. в расчет принимаем только прямые капитальные вложения на изготовление УС (*Немировский и др., 1988; Перова и др., 2006*):

$$z = \Pi_0 n (1 + \sigma_r + \sigma_c + \sigma_n), \quad (6)$$

где  $\Pi_0$  – оптовая цена оборудования, для устройств определяется по данным прейскурантов<sup>2</sup>;  $\sigma_r$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, связанные с приобретением оборудования;  $\sigma_c$  – коэффициент, учитывающий затраты на строительные работы;  $\sigma_n$  – коэффициент, учитывающий затраты на монтаж и отладку оборудования.

Значения коэффициентов приняты по данным (*Немировский и др., 1988*).

Оптовая цена для вновь изготавливаемых устройств при отсутствии аналога по главному параметру определяется так:

$$\Pi_0 = Z_n + \Pi, \quad (7)$$

где  $Z_n$  – полные затраты на производство устройства, руб.;  $\Pi$  – плановая прибыль, руб.

На стадии проектных разработок полные затраты на производство устройства определяем приближенным методом по структуре затрат на аналогичную технику:

$$Z_n = \frac{Z_m}{\gamma}, \quad (8)$$

где  $Z_m$  – стоимость основных материалов и полуфабрикатов для изготовления проектируемых устройств с учетом транспортно-заготовительных расходов, руб.;  $\gamma$  – удельный вес этих затрат к полным затратам на производство аналогичного оборудования (для нашего случая принят равным 0,72).

Затраты на материалы вычисляем по формуле

$$Z_m = \sum_{j=1}^n \Pi_{ij} K_{ij}, \quad (9)$$

где  $j=(1, \dots, n)$  – группы материалов и полуфабрикатов;  $\Pi_{ij}$  – оптовая цена материалов и полуфабрикатов  $i$ -й группы, руб.;  $K_{ij}$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы для  $j$ -й группы материалов и полуфабрикатов (примем  $K_{ij} \approx 1,03-1,05$ ).

При отсутствии фактических данных на проектной стадии разработки плановая прибыль в первом приближении определяется как

$$\Pi = \beta (Z_n - Z_m), \quad (10)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий величину плановой прибыли (принимаем среднеотраслевое значение, равное 0,41).

Годовые издержки на эксплуатацию электрооборудования находим по формуле

$$И = И_a + И_{об} + И_з, \quad (11)$$

где  $И_a$  – издержки на амортизацию оборудования (полное восстановление и капитальный ремонт), руб.;  $И_{об}$  – издержки по обслуживанию, руб.;  $И_з$  – стоимость потерь электроэнергии, руб.

Издержки на амортизацию вычисляются так:

$$И_a = \frac{Н_a K}{100}, \quad (12)$$

где  $Н_a$  – норма амортизационных отчислений, % [для различных устройств принята по данным (*Немировский и др., 1988*)];  $K$  – первоначальные капитальные вложения, руб.

Издержки на обслуживание включают в основном затраты на оплату труда обслуживающего персонала и текущий ремонт:

$$И_{об} = \frac{Н_{об} K}{100}, \quad (13)$$

где  $Н_{об}$  – норма ежегодных затрат на текущий ремонт и обслуживание [в случаях, когда необходим их учет, принимается по данным (*Немировский и др., 1988*)].

<sup>2</sup> Пульс цен. URL: [www.pulscen.ru](http://www.pulscen.ru).

Затраты на потери электроэнергии в УС и при нагревании обмоток ЭД  $i$ -й группы рассчитываются по формуле

$$I_{zi} = b_0(\Delta P_{yi} + \Delta P_{gi})T_p, \quad (14)$$

где  $\Delta P_{yi}$  – потери мощности в УС  $i$ -й группы ЭД, кВт;  $\Delta P_{gi}$  – потери мощности при сушке нагревом обмоток ЭД  $i$ -й группы, кВт;  $b_0$  – тариф на электроэнергию для потребителей<sup>3</sup>, руб./кВт.

Потери мощности  $\Delta P_{gi}$  определяются расчетным путем, а  $\Delta P_{yi}$  – по паспортным данным УС.

### Результаты и обсуждение

Энергозатраты различных УС на сушку изоляции ЭД мощностью 3 кВт приведены в табл. 1. Наиболее энергоемкими являются сушки сварочными трансформаторами и в сушильном шкафу, а самыми энергоэкономичными – сушки устройствами ЭОС (УЭОС) и КЭС (УКЭС). Затраты на ЭОС следует отметить особо. Они составляют всего 0,5 % по отношению к энергозатратам в ходе ТС с помощью сварочных трансформаторов. Длительность сушки найдена экспериментально.

Расход электроэнергии на сушку ЭД разных мощностей приводится в табл. 2. Выводы аналогичны пояснению к табл. 1. Отметим, что с увеличением мощности ЭД энергозатраты на сушку УКЭС уменьшаются быстрее, чем для других способов сушки, и для ЭД 55 кВт уступают только УЭОС.

Результаты расчета экономической эффективности сушки ЭД мощностью 3 кВт различными способами представлены в табл. 3. Минимальные удельные приведенные затраты на 1 час работы УС и максимальный эффект на одну сушку с учетом транспортных расходов имеет УЭОС.

Таблица 1. Расход электроэнергии на сушку изоляции электродвигателя мощностью 3 кВт с помощью различных устройств

Table 1. Power consumption for insulation drying of an electric motor with the capacity of 3 kW using different devices

Устройство сушки	Потребляемая мощность, кВт/ЭД	Продолжительность сушки, ч	Расход электроэнергии, кВт·ч	Сравнительная оценка расхода электроэнергии, %
Сушильный шкаф на 10 кВт	2,5	3,67	9,18	155,0
Трансформатор ТСИ-2,5	0,15	0,92	0,14	2,4
Сварочный трансформатор ТД-102	18,0	0,92	5,91	100,0
УЭОС	0,02	1,6	0,03	0,5
УКС	0,77	1,5	1,16	19,6
УКЭС	0,79	0,6	0,47	8,0

Таблица 2. Расход электроэнергии на сушку изоляции электродвигателей с помощью различных устройств

Table 2. Power consumption for drying the insulation of electric motors using various devices

Устройство сушки	Расход электроэнергии, кВт·ч, на сушку ЭД различных мощностей, кВт									
	0,25	1,1	2,2	3,0	5,5	7,5	11,0	18,5	30,0	55,0
Сушильный шкаф СНОЛ 3,5 × 3,5	1,99	4,80	7,61	–	–	–	–	–	–	–
Сушильный шкаф на 10 кВт	–	–	–	9,18	15,6	24,2	26,5	57,0	65,0	85,0
Трансформатор ТСИ-2,5	0,02	0,07	0,11	0,14	0,19	0,22	0,26	0,39	0,74	1,27
Сварочный трансформатор ТД-102	0,83	3,20	4,82	5,91	6,91	7,56	8,23	9,67	11,8	17,2
Сварочный трансформатор ТД-500	2,33	8,97	13,5	16,5	19,3	21,0	22,9	26,8	32,6	46,9
УЭОС	0,025	0,029	0,031	0,032	0,035	0,038	0,042	0,052	0,060	0,069
УКС	0,39	0,71	0,96	1,16	1,41	1,48	0,54	1,67	1,85	2,27
УКЭС	0,13	0,29	0,38	0,47	0,53	0,55	0,59	0,68	0,81	1,08

<sup>3</sup> Северная сбытовая компания. URL: [www.sevesk.ru](http://www.sevesk.ru).

Таблица 3. Расчет экономической эффективности различных способов, применяемых для сушки электродвигателей мощностью 3 кВт  
Table 3. Calculation of the economic efficiency of various methods used for drying electric motors with the power of 3 kW

Экономический показатель	Способ сушки					
	ПС	ТС		УЭОС	УКС	УКЭС
	Устройство сушки					
	Сушильный шкаф на 10 кВт	Трансформатор ТСИ-2,5	Сварочный трансформатор ТД-102	УЭОС	УКС	УКЭС
Капитальные вложения, руб.	19816,16	4999,77	18291,84	5352,54	14938,3	20290,9
Издержки на амортизацию и эксплуатационное обслуживание, руб.	2873,34	469,27	7023,85	572,71	1941,3	2512,95
Стоимость расхода электроэнергии, руб./ч	8513,33	521,54	21884,88	68,59	2621,8	2690,42
Удельные приведенные затраты, руб./ч	6,89	0,84	15,13	0,70	3,26	3,95
Дополнительные затраты потребителя, руб./сушку	721,87	130,66	130,66	–	130,66	130,66
Приведенные затраты на 1 сушку с учетом транспортных расходов, руб.	746,92	131,74	144,81	1,09	135,01	133,92
Приведенные затраты на 1 сушку без учета транспортных расходов, руб.	616,26	0,76	122,82	1,09	4,90	2,40
Эффект от использования УС для 1 сушки с учетом транспортных расходов, руб.	–	615,17	590,13	742,56	611,91	614,08
Эффект от использования УС для 1 сушки без учета транспортных расходов, руб.	–	612,99	590,13	611,91	611,91	614,08

В табл. 3 не учтена длительность сушки, поэтому с коррекцией продолжительности операции сушки определим приведенные затраты на одну сушку для трех случаев:

1. На ремонтной базе предприятия имеется централизованное УС. Влажные ЭД доставляются к месту сушки и поэтому учитываются затраты на транспортировку из предположения среднего расстояния перевозки в 3 км. В этом случае наилучшие показатели будут при сушке УЭОС и худшие – при использовании сушильных шкафов (рис. 3). Остальные варианты практически равнозначны.

2. УС располагаются непосредственно на предприятиях. Для ЭД 4 кВт и выше затраты на сушку устройствами УКЭС, УЭОС, ТСИ-2,5 примерно одинаковы, а применение сушильных шкафов также невыгодно (рис. 4).

3. УС на предприятиях нет, но при необходимости их привозят. Здесь учитываются транспортные расходы по доставке самих УС, если их вес превышает допустимый для ручной переноски. Транспорт необходим для доставки сушильного шкафа и трансформаторов ТСИ-2,5, ТД-102. Из рис. 5 видно, что минимум затрат имеют УЭОС, затем следуют УКЭС, УКС.

Для этих же трех случаев рассчитан экономический эффект от использования УС для одной операции сушки. За базу для сравнения принят вариант сушки ЭД в сушильном шкафу. Анализируя результаты, можно заключить, что УЭОС наиболее эффективно в первом случае (рис. 6). Для второго случая выгоден вариант УКЭС (рис. 7). В третьем случае самой оптимальной является сушка УКС (рис. 8), а УЭОС и УКЭС по эффективности близки к УКС (кривые 3, 4). Рис. 6, б и 7, б позволяют точнее определить эффект для наиболее распространенных в сельском хозяйстве и промышленности ЭД 0,25–7,5 кВт.

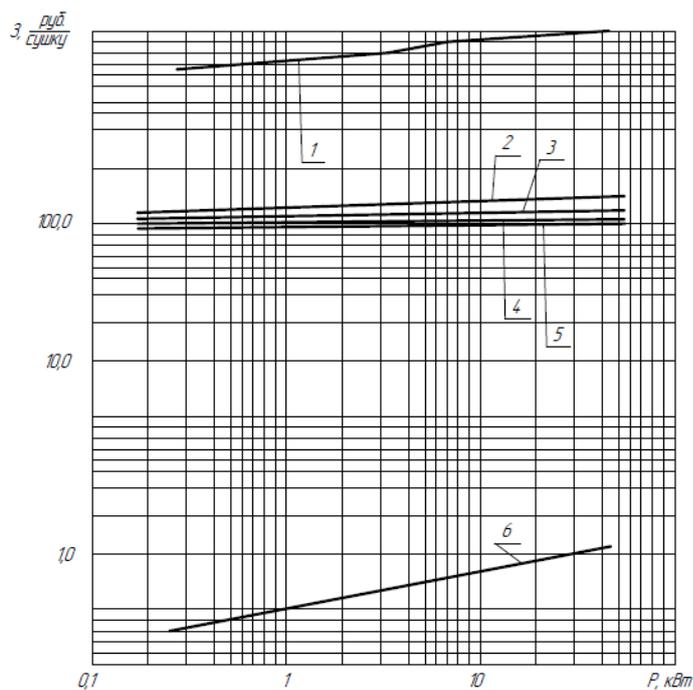


Рис. 3. Зависимости приведенных затрат на одну сушку от мощности электродвигателей с учетом транспортных расходов по их доставке к месту сушки: 1 – сушильный шкаф; 2 – ТД-102; 3 – ТСИ-2,5; 4 – УКС; 5 – УКЭС; 6 – УЭОС

Fig. 3. Dependence of the reduced costs for one drying on the power of electric motors taking into account transportation costs for their delivery to the place of drying: 1 – drying box; 2 – TD-102; 3 – TTD-2,5; 4 – CD device; 5 – CED device; 6 – EOD device

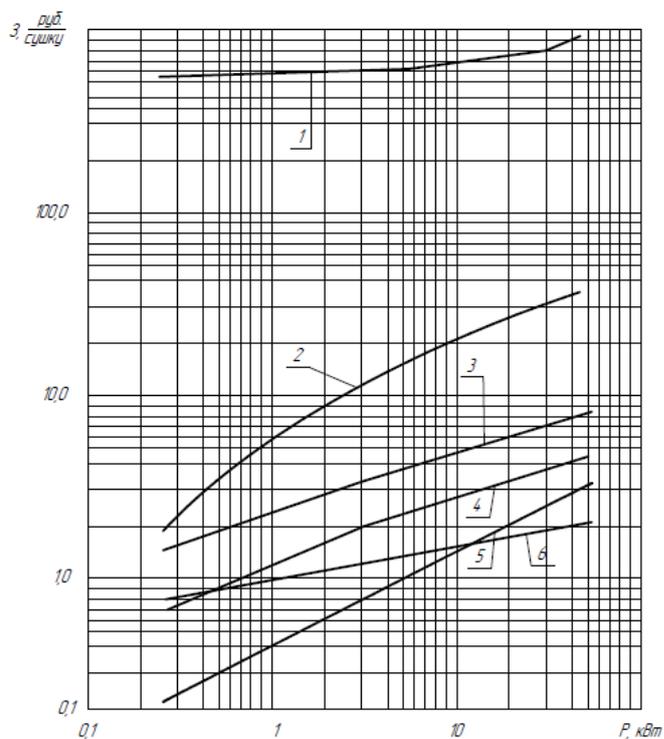


Рис. 4. Зависимости приведенных затрат на одну сушку от мощности электродвигателей при расположении устройств сушки на предприятиях:

1 – сушильный шкаф; 2 – ТД-102; 3 – УКС; 4 – УКЭС; 5 – ТСИ-2,5; 6 – УЭОС

Fig. 4. Dependence of total costs for one drying on the electric motor capacity when locating drying devices on the shop floor: 1 – drying box; 2 – TD-102; 3 – CD device; 4 – CED device; 5 – TTD-2,5; 6 – EOD device

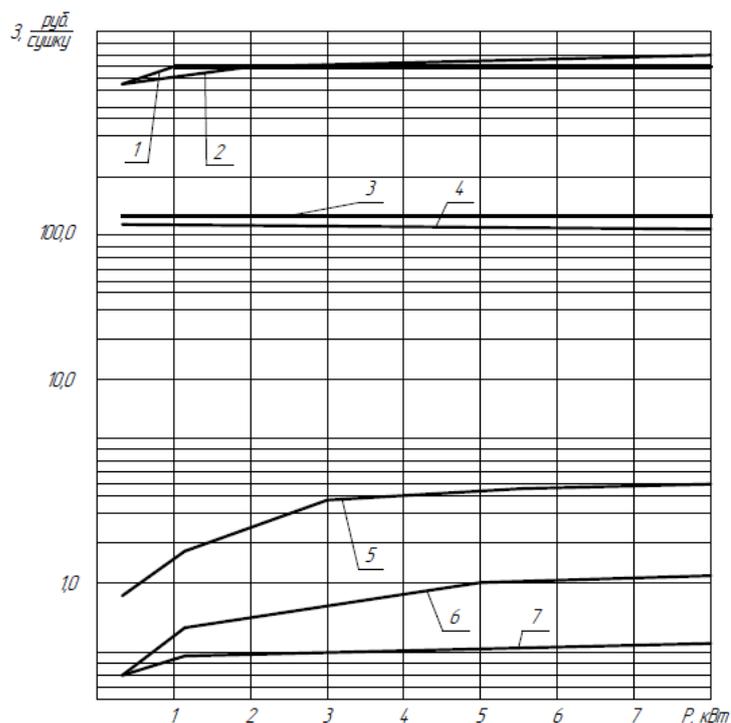


Рис. 5. Зависимости приведенных затрат на одну сушку от мощности электродвигателей при доставке устройств сушки на места эксплуатации: 1 – лампа накаливания; 2 – сушильный шкаф; 3 – трансформатор ТД-102; 4 – трансформатор ТСИ-2,5; 5 – УКС; 6 – УКЭС; 7 – УЭОС

Fig. 5. Dependence of total costs for one drying on the electric motor capacity when delivering drying devices to the operating site: 1 – glow lamp; 2 – drying box; 3 – transformer TD-102; 4 – transformer TTD-2,5; 5 – CD device; 6 – CED device; 7 – EOD device

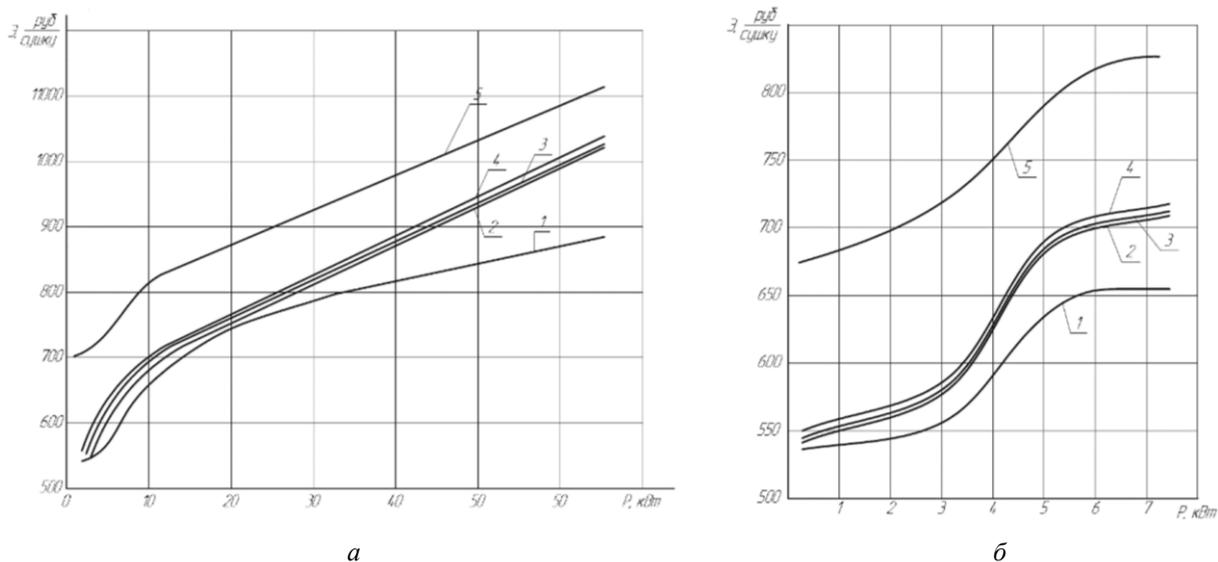


Рис. 6. Зависимости эффекта использования УС для 1 сушки от мощности ЭД с учетом транспортных расходов: а – ЭД 0,25–55 кВт; б – ЭД 0,25–7,5 кВт; 1 – ТД-102; 2 – ТСИ-2,5; 3 – УКС; 4 – УКЭС; 5 – УЭОС

Fig. 6. Dependence of total costs for one drying on the electric motor capacity with regard to transport costs: а – EM 0,25–55 kW; б – EM 0,25–7,5 kW; 1 – TD-102, 2 – TTD-2,5; 3 – CD device; 4 – CED device; 5 – EOD device

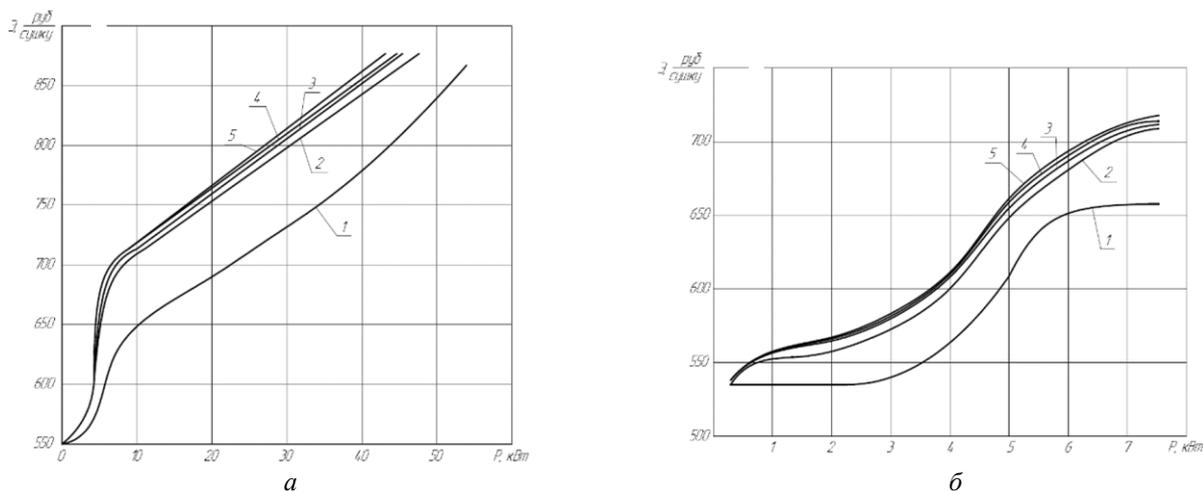


Рис. 7. Зависимости годового эффекта использования УС для одной сушки от мощности электродвигателей при расположении устройств сушки на предприятиях: а – ЭД 0,25–55 кВт; б – ЭД 0,25–7,5 кВт; 1 – ТД-102; 2 – ТСИ-2,5; 3 – УЭОС; 4 – УКС; 5 – УКЭС

Fig. 7. Dependence of annual costs for one drying on the electric motor capacity when locating drying devices on the shop floor: а – EM 0,25–55 kW; б – EM 0,25–7,5 kW; 1 – TD-102; 2 – TTD; 3 – EOD device; 4 – CD device; 5 – CED device

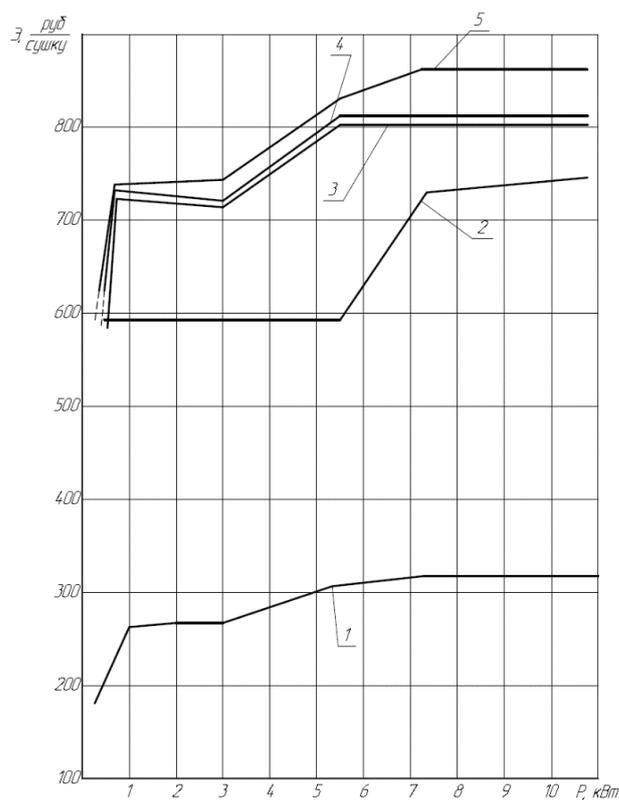


Рис. 8. Зависимости годового эффекта использования УС для 1 сушки от мощности электродвигателей при доставке устройств сушки на места эксплуатации: 1 – ТД-102; 2 – ТСИ-2,5; 3 – УКЭС; 4 – УЭОС; 5 – УКС

Fig. 8. Dependence of annual costs for one drying on the electric motor capacity when delivering drying devices to the operating site: 1 – TD-102; 2 – TTD-2,5; 3 – CED device; 4 – EOD device; 5 – CD device

Для сушки ЭД с переувлажненными обмотками можно использовать сушильный шкаф или УКЭС. Из табл. 4 следует, что сушильные шкафы менее эффективны, причем эффективность УКЭС возрастает с увеличением мощности ЭД.

Таблица 4. Экономические показатели сушки электродвигателей с переувлажненными обмотками  
Table 4. Economic indicators of electric motors drying with saturated windings

Экономический показатель	Мощность электродвигателя, кВт									
	0,37	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	7,5	18,0
Сушильный шкаф										
Удельные приведенные затраты, руб./ч	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,89	9,17	13,7	27,55
Дополнительные затраты на демонтаж и монтаж ЭД, руб./сушку	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	685,94	685,94	685,94
Устройство КЭС										
Удельные приведенные затраты, руб./ч	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Дополнительные затраты на демонтаж и монтаж ЭД, руб./сушку	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Эффект от использования УС для 1 сушки, руб./сушку	597,75	599,93	602,11	606,46	608,64	614,08	624,97	737,12	838,38	1055,05

### Заключение

Итоговые расчеты показали, что экономический эффект от внедрения разработанных устройств электроосмотической сушки обеспечивается за счет повышения производительности труда в 1,5–11,4 раза, экономии электроэнергии в 80–1 230 раз в зависимости от мощности ЭД, а также повышения долговечности изоляции посредством сведения деструкции к нулю (электроосмотическая сушка и влагозащита) или уменьшения ее в 10 раз (конвективно-электроосмотическая сушка).

В случае доставки устройств к месту сушки ЭД наиболее экономичны разработанные устройства электроосмотической и конвективной сушки, установка конвективно-электроосмотической сушки. Для ЭД с переувлажненными обмотками эффект от применения установки конвективно-электроосмотической сушки в процессе одной сушки достигает 1 055 руб. (в ценах на 31.12.20), причем УКЭС целесообразно использовать для сушки изоляции ЭД повышенной мощности. Учитывая резкое удорожание энергоносителей и ЭД, можно сделать вывод о том, что реальный эффект значительно выше.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Алякритский И. П., Мандрыкин С. А. Сушка электрических машин и трансформаторов. М. : Энергия, 1974. 73 с.
- Грибанов А. А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2001. 225 с. EDN: QDNKQL.
- Немировский А. Е., Вязникова Л. А. Эффективность электроосмотической сушки обмоток электродвигателей // Техника в сельском хозяйстве. 1988. № 6. С. 24–26.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Фёдоровские чтения-2017: XLVII Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 15–17 ноября 2017 г. М. : Издательский дом МЭИ, 2017. С. 166–170. EDN: XRDGOD.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю., Мищенко Д. Н. Устройство электроосмотической сушки изоляции обмоток электродвигателей 0,4 кВ для экспериментальных исследований // Фёдоровские чтения-2020: L Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 17–20 ноября 2020 г. М. : Издательский дом МЭИ, 2020. С. 285–290. EDN: SQEHWX.
- Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю., Мищенко Д. Н. Оптимизация выбора устройств сушки изоляции обмоток электродвигателей в сельскохозяйственном и промышленном производствах // Фёдоровские чтения-2021: LI Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 17–19 ноября 2021 г. М. : Издательский дом МЭИ, 2021. С. 118–123.
- Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А. Расчет подогрева обмоток электродвигателей при электроосмотической сушке изоляции и пониженных температурах // Фёдоровские чтения-2017: XLVII Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. школы, Москва, 15–17 ноября 2017 г. М. : Издательский дом МЭИ, 2017. С. 188–194.
- Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А., Ударатин А. В. Эксплуатация электродвигателей во влажной агрессивной среде : монография. Вологда : ВоГУ, 2021. 214 с. EDN: WSJZRZ.

- Перова М. Б., Воропанова Ю. В. Оценка эффективности инвестиционных проектов объектов электроэнергетики. Вологда : ВоГТУ, 2006. 81 с.
- Хомутов О. И. Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве : дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 1990. 450 с.

#### References

- Alyakritskij, I. P., Mandrykin, S. A. 1974. Drying of electrical machines and transformers. Moscow. (In Russ.)
- Gribanov, A. A. 2001. Grounds for process variables of insulation drying and impregnation in asynchronous electric motors being in use in agro-industrial sector. Ph.D. Thesis. Barnaul. EDN: QDNKQL. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Vyaznikova, L. A. 1988. Efficiency of electroosmotic drying of electric motors windings. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*, 6, pp. 24–26. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu. 2017. Electroosmotic drying and moisture protection of the electric equipment. *Proceedings of 47<sup>th</sup> Intern. research and practice conf. Fyodorov readings*. Moscow, pp. 166–170. EDN: XRDGOD. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu., Mishchenko, D. N. 2020. The device for electroosmotic drying of electric motors windings insulation 0,4 kW for experimental survey. *Proceedings of 50<sup>th</sup> Intern. research and practice conf. Fyodorov readings*. Moscow, pp. 285–290. EDN: SQEHWX. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Kichigina, G. A., Sergievskaya, I. Yu., Mishchenko, D. N. 2021. Optimization of selecting drying devices for electric motors windings insulation in agriculture and industry. *Proceedings of 50<sup>th</sup> Intern. research and practice conf. Fyodorov readings*. Moscow, pp. 118–123. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Sergievskaya, I. Yu., Kichigina, G. A. 2017. Calculation of the heating up of electric motors windings during electroosmotic drying of insulation and low temperatures. *Proceedings of 47<sup>th</sup> Intern. research and practice conf. Fyodorov readings*. Moscow, pp. 188–194. (In Russ.)
- Nemirovskiy, A. E., Sergievskaya, I. Yu., Kichigina, G. A., Udaratin, A. V. 2021. Electric motors operations in humidity reactive environments. Monograph. Vologda. EDN: WSJZRZ. (In Russ.)
- Perova, M. B., Voropanova, Yu.V. 2006. The performance assessment of investment projects of electric power facilities. Vologda. (In Russ.)
- Homutov, O. I. 1990. The system of technical tools and actions to improve insulation security in electric motors being in use in the agricultural industry. Ph.D. Thesis. Chelyabinsk. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

**Немировский Александр Емельянович** – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, профессор, д-р техн. наук; e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7205-3580

**Aleksandr E. Nemirovskiy** – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Professor, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: a.e.nemirovsky@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7205-3580

**Кичигина Галина Анатольевна** – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, доцент, канд. экон. наук; e-mail: janedaw@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3448-4341

**Galina A. Kichigina** – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor; e-mail: janedaw@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3448-4341

**Сергиевская Ирина Юрьевна** – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: tanak04@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9896-8551

**Irina Yu. Sergievskaya** – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: tanak04@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9896-8551

**Никифорова Ольга Михайловна** – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, инженер; e-mail: stoushko@yandex.ru

**Olga M. Nikiforova** – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Engineer; e-mail: stoushko@yandex.ru

**Соколова Вероника Александровна** – ул. Ленина, 15, г. Вологда, Россия, 160000; Вологодский государственный университет, канд. психол. наук, доцент; e-mail: valsok77@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8309-9581

**Veronika A. Sokolova** – 15 Lenina Str., Vologda, Russia, 160000; Vologda State University, Cand. Sci. (Psychology), Associate Professor; e-mail: valsok77@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8309-9581