



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПЛАВНОГО ПУСКА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Ш.Т. Дадабаев¹, Е.И. Грачева²

¹Худжандский политехнический институт таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан

²Казанский государственный энергетический Университет, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка методики по проведению технико-экономического обоснования при применении системы плавного пуска на основе инвертора тока для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов оросительных насосных станций первого подъема. *МЕТОДЫ.* Исследования и расчеты проведены в соответствии с алгоритмом составления энергетического баланса насосных установок, а также с применением анализа статистических данных. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Представлено технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения систем плавного пуска для оросительных насосных станций первого подъема, где, как правило, устанавливаются мощные синхронные электродвигатели. Предложена методика определения экономической эффективности систем или устройств плавного пуска для электроприводов насосных станций. Обосновано рациональное применение альтернативного устройства плавного пуска на основе инвертора тока. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определение экономической эффективности внедрения устройств плавного пуска остается сложной задачей, так как условия эксплуатации объектов требуют учета различных воздействующих факторов, не всегда поддающихся точной оценке. Это является проблемой разработки универсальной методики оценки экономической эффективности внедрения устройств плавного пуска. Предложенная методика для определения экономической эффективности таких систем, основанная на известных методах, дополняет и упрощает процесс расчетов и вычислительных алгоритмов.

Ключевые слова: насосная станция; инвертор тока; устройства плавного пуска; синхронный двигатель; технический ресурс; экономический эффект.

Для цитирования: Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И. Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 141-150. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-141-150.

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR APPLICATION OF A SOFT START SYSTEM FOR HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS OF PUMPING UNITS

ST. Dadabaev¹, EI. Gracheva²

¹Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of a methodology for conducting a feasibility study when using a soft start system based on a current inverter for high-voltage electric motors of pumping units of irrigation pumping stations of the first lift. *METHODS.* Research and calculations were carried out in accordance with the algorithm for compiling the energy balance of pumping units, as well as using the analysis of statistical data. *RESULTS.* A feasibility study is presented for the feasibility of introducing soft start systems for irrigation

pumping stations of the first lift, where, as a rule, powerful synchronous electric motors are installed. A method for determining the economic efficiency of systems or soft starters for electric drives of pumping stations is proposed. The rational use of an alternative soft starter based on a current inverter is substantiated. **CONCLUSION.** Determining the economic efficiency of introducing soft starters remains a difficult task, since the operating conditions of facilities require taking into account various influencing factors that are not always amenable to accurate assessment. This is the problem of developing a universal methodology for assessing the economic efficiency of introducing soft starters. The proposed methodology for determining the economic efficiency of such systems, based on known methods, complements and simplifies the process of calculations and computational algorithms.

Keywords: pumping station; current inverter; soft starters; synchronous motor; technical resource; economic effect.

For citation: Dadabaev ST, Gracheva EI. Technical and economic justification for application of a soft start system for high-voltage electric motors of pumping units. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(1): 141-150. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-141-150.

Введение

В настоящее время на рынке электротехнической продукции наблюдается большое разнообразие высоковольтных пусковых устройств. Наиболее известными фирмами, выпускающими высоковольтные системы плавного пуска (СПП), являются: *Siemens, ABB, General Electric*, ИК «Технорос», АОЗТ «Элетекс», ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПИР», компания АБС «Электро» и др. В соответствии с техническими особенностями и ценами на эту продукцию, можно сделать вывод о возможности применения той или иной схемы преобразователей для электроприводов (ЭП) различных мощностей. Так, например, для регулируемого электропривода мощностью до 630 кВт, целесообразно применение низковольтных преобразователей частоты (ПЧ) с понижающим трансформатором. Если мощность регулируемого электропривода достигает 630 – 1000 кВт, то целесообразно применить ПЧ с активными выпрямителями на ГТО или многоуровневых схем на *IGBT* транзисторах. При мощностях более 1 МВт рекомендуется многоуровневые преобразователи с многообмоточными трансформаторами. Сегодня средняя стоимость низковольтных ПЧ составляет от 1500 руб/кВт, однако с учетом трансформатора на входе преобразователя цена увеличится, и будет составлять от 2500 руб/кВт. Цены на высоковольтные преобразователи у разных производителей могут отличаться и определяются только после заказа продукции [1-4]. Тем не менее, средняя стоимость высоковольтных ПЧ на сегодня составляет, примерно, от 2000 до 12000 руб/кВт, а цены на высоковольтные устройства плавного пуска (УПП) составляют от 1200-2500 руб/кВт. Из многочисленных видов оборудования следует выделить преобразователь производства компании ООО НПП «ЭКРА», который основан на работе инвертора тока. Данное устройство - «ШПТУ-ВИ» - представляет собой тиристорный ПЧ с управляемым выпрямителем и зависимым инвертором тока [5-9]. Такой преобразователь является наиболее простым и экономически выгодным схемотехническим решением для пуска мощных электродвигателей [10-14].

Объект исследования

Согдийская область расположена на севере Республики Таджикистан и имеет общую площадь 25,2 тысяч кв. км [2]. Население области составляет более 2,7 млн. человек и средняя плотность населения на 1 кв. км., при этом, 102 человека. Область делится на 10 районов и имеет в своем составе 8 городов. Территорию области, в основном, занимают горные массивы. Главной водной артерией Согдийской области является река Сырдарья. По данным областного комитета по землеустройству, в 2020 году общая площадь орошаемых земель Согдийской области составила 253,4 тысячи гектаров. По данным Управления мелиорации и ирригации (УМИ) Согдийской области в том же году земледельцам области было поставлено 1,5 млрд. м³ воды. Во всех районах области оборудование оросительных насосных станций (ОНС) имеет значительный износ, срок его эксплуатации давно истек и требуют значительных финансовых капиталовложений для модернизации [15-17]. Каждый год в ОНС области фиксируются многочисленные аварии, вызванные отклонениями напряжения в сети и т.д. Анализ проблемы показывает, что отклонения напряжения в энергосистеме Согдийской области возникают при переходных режимах высоковольтных

электродвигателей насосных агрегатов. Мощные агрегаты, в основном, установлены на первом подъеме ОНС Аштского, Зафарабадского и Б. Гафуровского районов. Каждый пуск агрегатов на этих объектах вызывает отклонение напряжения, провалы напряжения, перенапряжение, мигание и т.п. По статистическим данным УМИ в Согдийской области в сезоны орошения 2018 – 2019 г, только в ОНС Б. Гафуровского и Аштского района по причине низкой надежности питающей сети были зафиксированы 27 отключений насосных агрегатов (см. рис. 1).

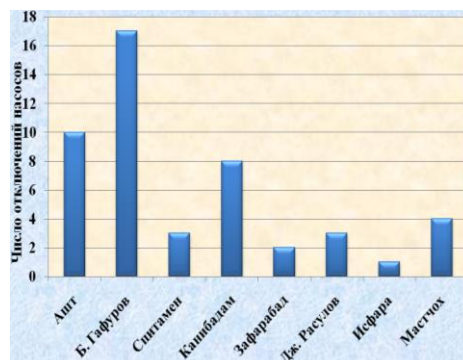


Рис. 1. График отключения насосных агрегатов в НС районов Согдийской области за период 2018 г.

Fig. 1. Schedule of shutdown of pumping units in the NS districts of Sughd region for the period of 2018.

В настоящее время для устранения причин таких негативных явлений предпринимается недостаточно мер и, в результате этого, происходят многочисленные отключения и срабатывания защиты как в системе электроснабжения (СЭС), так и в ЭП ОНС. Самыми неустойчивыми СЭС являются СЭС Б. Гафуровского и Аштского районов Согдийской области, в которых наблюдается 65% отключений из всех зарегистрированных в области за указанный период.

В развитых странах для повышения надежности СЭС насосных станций, применяют СПП для ВЭД [18-20]. Эти системы ограничивают пусковые токи и знакопеременные электромагнитные моменты двигателей, а также минимизируют при пуске отклонения напряжения питающей сети [5, 6, 8]. Примерами СПП для ВЭД являются пуск при помощи УПП или пуск с помощью ПЧ. Стоимость ПЧ, в среднем, в 2-3 раза дороже, чем УПП, поэтому при выборе СПП необходимо учесть и финансовую стоимость оборудования [21-23].

Альтернативным и перспективным способом плавного пуска, предлагаемым в данной работе, является пуск высоковольтных электродвигателей с инвертором тока. Этот тип преобразователя недостаточно изучен в настоящее время и поэтому требует дальнейших исследований [9, 11]. По данным некоторых производителей такой продукции и лабораторным испытаниям в процессе проектирования известно, что пуск с помощью данных преобразователей уменьшает пусковые токи до $1,3 I_{ном}$ и имеет наилучшие показатели отклонения напряжения при пуске. Кроме того, цены на такие устройства ниже, чем на традиционные ПЧ, что дает, кроме технических преимуществ, еще и экономическую эффективность [12, 14]. Для принятия технического решения, как правило, необходимо проводить детальное технико-экономическое обоснование проекта для исследуемого объекта.

В качестве объекта исследования рассматривается ОНС первого подъема АНС-1 Аштского района. Технические данные АНС-1 представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Номинальные данные насосных установок АНС-1

№	Установка	Назначение	H , м	Q , м ³ /час	$n_{ном}$, об/мин	η , %	$P_{ном}$, кВт
1	1200В-6,3/100-А (52В11)	Резерв	88	22680	375	88	8000
2	1200В-6,3/100-А (52В11)	Перекачивание воды	88	22680	375	88	8000
3	1200В-6,3/100-А (52В11)	Перекачивание воды	88	22680	375	88	8000

4	1200В-6,3/100-А (52В11)	Резерв	88	22680	375	88	8000
---	----------------------------	--------	----	-------	-----	----	------

Таблица 2

Номинальные данные электродвигателей насосных агрегатов АНС-1

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Тип электродвигателя	ВДС2-325/69-16 УХЛ4	
2	Количество электродвигателей		4
3	Мощность электродвигателя, МВт	$P_{ном}$	8
4	Ток статора, А	I_1	540
5	Напряжение статора, кВ	U_1	10
6	Ток ротора, А	I_2	400
7	Напряжение ротора, кВ	U_2	0,16
8	Частота вращения, об/мин	$n_{ном}$	375
9	КПД, %	H	95,9
10	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,9
11	Тип возбудителя	ТВУ-8	
12	Год ввода в эксплуатацию		1979

Методика проведения технико-экономического обоснования

Представим последовательность алгоритма технико-экономического обоснования принятия технического решения.

Суммарная мощность, которая необходима для транспортировки продукта без потерь по трубопроводу [24, 25]:

$$\Delta P_{TP} = \gamma \cdot (H_1 - H_C) \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{TP} = \gamma \cdot (H_1 - H_C) \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}$ кВт; H_C – статический напор магистрали, м; γ – удельный вес продукта, кг/м³; Q – подача воды, м³/с; H_1 – выбирается по H - Q характеристике насоса для рабочей точки мощности электродвигателя.

Потери напора на задвижке определяются по формуле

$$\Delta H_3 = H_{BX.3} - H_2 \text{ м}, \quad (2)$$

где $H_{BX.3}$ – манометрический напор на входе задвижки; H_2 – манометрический напор на выходе задвижки.

Гидравлическое сопротивление на задвижке равно

$$S_3 = \frac{\Delta H_3}{Q^2} \text{ с}^2/\text{м}^5, \quad (3)$$

где ΔH_3 – потери напора на задвижке.

Потери мощности на задвижке агрегата

$$\Delta P_{ЗДВ} = \gamma \cdot \Delta H_3 \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}. \quad (4)$$

Напор, создаваемый насосным агрегатом, определяется

$$H_{Н1} = H_{ВЫХ1} - H_{ВХ} \text{ м}, \quad (5)$$

где $H_{ВЫХ1}$ – напор на выходе работающего насосного агрегата, м; $H_{ВХ}$ – напор на входе насосного агрегата, м.

Мощность на валу ЭД, определяемая по характеристике агрегатов с учетом КПД

$$P_{C1} = \frac{P_{Н1}}{\eta_{ДВ}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{Н1} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{\eta_{Н1} \cdot \eta_{ДВ}} \text{ кВт}, \quad (6)$$

где $\eta_{Н1}$ – коэффициент полезного действия насоса;

$\eta_{ДВ}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Потери мощности при работе насосных агрегатов определяется по следующей формуле

$$\Delta P_{\text{НА1}} = \gamma \cdot Q \cdot H_{\text{Н}} \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{1 - \eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}}{\eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}} \right) \text{ кВт.} \quad (7)$$

Общий баланс мощности при работе насосного агрегата [24, 25]:

$$P_{\text{С}} = P_{\text{Т}} + \Delta P_{\text{НА}} + \Delta P_{\text{ЗАДВ}} \text{ кВт,} \quad (8)$$

где $P_{\text{Т}}$ – мощность транспортировки воды без учета потерь, кВт;

$\Delta P_{\text{НА}}$ – мощность потерь в НА, кВт;

$\Delta P_{\text{ЗАДВ}}$ – потери мощности на регулирующих задвижках на входе водовода, кВт.

Электроэнергия на транспортировку продуктов за год, включая расход на регулирование, составит

$$W = P_{\text{С}} \cdot \tau \text{ кВт·ч,} \quad (9)$$

где τ – годовой бюджет времени работы, ч.

Дополнительные потери мощности определяются по формуле

$$\Delta P = P_{\text{С}} - P_{\text{Т}} \text{ кВт.} \quad (10)$$

Дополнительные потери электроэнергии за год

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau \text{ кВт·ч.} \quad (11)$$

Суммарная суточная экономия электроэнергии при использовании ПЧ определяется

$$\Delta W_{\text{СУТ}} = \sum_i^k \Delta P_i \cdot t_i, \quad (12)$$

где $\Delta W_{\text{СУТ}}$ – суточная экономия электроэнергии при применении ПЧ, кВт·ч;

ΔP_i – экономия мощности за i -й период, кВт;

t_i – время, в течение которого привод работает с постоянной нагрузкой, час.

Годовая экономия электроэнергии определяется

$$\Delta W_{\text{ГОД}} = 365 \cdot \Delta W_{\text{СУТ}}. \quad (13)$$

Стоимость сэкономленной электроэнергии по действующему тарифу

$$CT_{\text{ЭЭ}} = T_{\text{Э}} \cdot \Delta W_{\text{ГОД}}, \quad (14)$$

где $CT_{\text{ЭЭ}}$ – стоимость сэкономленной электроэнергии и ресурсов, руб;

$T_{\text{Э}}$ – тариф на электроэнергию в энергосистеме, руб./кВт·ч.

Срок окупаемости ПЧ можно определить по формуле

$$T_{\text{ОК}} = \frac{CT_{\text{ПЧ}}}{CT_{\text{ЭЭ}}}, \quad (15)$$

где $T_{\text{ОК}}$ – срок окупаемости ПЧ, год;

$CT_{\text{ПЧ}}$ – стоимость ПЧ, руб.

Результаты расчетов

В настоящее время в ОНС АНС-1 используется дискретный способ регулирования производительности насосных агрегатов, который не требует использования регулируемого электропривода. Поэтому при расчете экономии электроэнергии с ПЧ по формуле (12) для АНС-1, значение экономии энергии будет равно нулю или будет иметь очень малое значение. Следовательно, срок окупаемости ПЧ, определяемый по формуле (15), для АНС-1 будет очень большим, а внедрение экономически нецелесообразным. Цель использования УПП в насосных станциях обычно является не экономия потребляемой энергии, а увеличение технического ресурса электрооборудования, что в итоге приведет к положительному экономическому эффекту. В таблице 3 приведены экономические и технические параметры различных СПП для плавного пуска мощных двигателей.

Данные таблицы 3 показывают большую эффективность использования инвертора тока, чем УПП и ПЧ. Технические характеристики инвертора тока и УПП близки, но параметр ограничения пускового тока лучше у инвертора тока. Для электродвигателя

мощностью 8 МВт стоимость ПЧ, ориентировочно, в 2-4 раза выше, чем УПП и инвертора тока. Также КПД инвертора тока выше на 2-5%, чем КПД ПЧ. С учетом цены (16 млн. рублей) на инверторы тока мощностью 8 МВт, и затраты на ежегодные плановые и внеплановые ремонты в АНС-1, которые за последние пять лет составили более 33 млн. рублей, предложенный вариант модернизации НС является целесообразным.

Таблица 3.

Экономические и технические показатели систем для плавного пуска

№	Наименование параметра	Системы для плавного пуска		
		ПЧ	УПП	Инвертор тока
1	Мощность двигателя, кВт	8000	8000	8000
2	Стоимость устройства, млн. рублей.	30 - 50	15 - 16	15 - 16
3	Возможность пуска группы двигателей с одним устройством	нет	да	да
4	Ограничения пускового тока	до $3I_{ном}$	до $3I_{ном}$	до $1,3I_{ном}$
5	Возможность регулирования скорости двигателей	да	нет	нет
6	Экономия электроэнергии (для станции АНС-1)	0	0	0
7	КПД устройства, %	95 - 98	99,5 - 99,9	99,5 - 99,9

Согласно статистическим данным, в 2018 и 2019 годах в АНС-1 было зафиксировано более 8 аварий. Крупная авария 2020 года повлекла за собой двухнедельную остановку водоснабжения аграрной отрасли всего района и ее последствия негативно сказались на качестве и количестве сельхозпродукции района. В результате произошедшей аварии, в Аштском районе в 2020 году было собрано хлопка на 2,1 тысяч тонн меньше, чем в 2019 году. Кроме того, из-за остановки подачи воды качество фруктов оказалось на низком уровне, в результате чего, экспортная цена было существенно занижена и земледельцы района понесли значительные финансовые убытки. В таблице 4 приведены данные о затратах на ремонтные работы в ОНС района, и объем сбора сельхозпродукции за последние 5 лет.

Приведенные в таблице 4 данные получены из докладов и отчетов Управления мелиорации и ирригации Согдийской области. Данные таблицы 4 показывают, что в период за 2017-2022 годы, для насосных станций Аштского района были затрачены на ремонт оборудования и другие профилактические работы значительные средства, однако технический ресурс оборудования НС района так и остался на критическом уровне. Для решения данной проблемы требуется комплексный подход и, в первую очередь, модернизация электропривода ОНС. Крупная авария 2020 года показала, что технический ресурс электрооборудования имеет важное значение для функционирования таких объектов, а недостаточный технический ресурс приводит к значительным финансовым издержкам.

Таблица 4

Затраты на ремонтные работы в насосных станциях Аштского района

Год	Затраты на ремонт ОНС и др. проф. работ, млн. рублей	Площадь орошаемых земель, га	Объем сбора сельхозпродукции, тысяч тонн
2022	9,67		
2021	4	17134	19,2 (хлопок)
2020	6,69	16750	20 (фрукты), 13,8 (хлопок)
2019	2		20 (фрукты) 15,9 (хлопок)
2018	4	16743	14,5 (хлопок)
2017	7,12	16740	14,9 (хлопок)

Согласно предложенной методики для проведения технико-экономического обоснования СПП (формулы 1-15) и данным таблиц 1-4, для ОНС АНС-1 выполним расчеты для определения экономической эффективности внедрения СПП.

Общий баланс мощности при работе одного насоса в АНС-1

$$P_C = P_T + \Delta P_{з\Delta ДВ} + \Delta P_{НА} = 4506 + 462,25 + 887 = 5855 \approx 5860 \text{ кВт.}$$

Расход электроэнергии на транспортировку воды за сезон орошения (с апреля по сентябрь, 6 месяцев, $\tau = 4400$ часов) составит:

$$W = P_c \cdot \tau = 5860 \cdot 4400 = 25784000 \text{ кВт.ч.}$$

Тариф на электроэнергию в энергосистеме, согласно данным Министерства энергетики и промышленности Республики Таджикистан, на 2021 год для сферы мелиорации составляет 7,87 дирамов (с апреля по сентябрь), что эквивалентно 0,5264 рублям РФ (по курсу ЦБ РТ, 1 рубль - 0,1495 сомони на 8.02.2022 г) [26, 27].

Тогда, стоимость электроэнергии по действующему тарифу составит

$$CT_{\tau} = 0,5264 \cdot 25784000 = 13572697,6 \text{ рублей.}$$

В соответствии с типовыми методиками, средняя экономия при применении СПП достигает 15-20 %, тогда стоимость сэкономленной электроэнергии по действующему тарифу составит

$$CT_{\tau\tau} = 0,2 \cdot 13572698 = 2714540 \text{ рублей.}$$

Срок окупаемости СПП с инвертором тока необходимо определить для двух насосных агрегатов АНС-1 (обычный режим работы станции АНС-1), так как данная система может поочередно запускать до четырех агрегатов.

Тогда, с учетом цены СПП, срок окупаемости составит

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{16000000}{2 \times 2714539,5} \approx 2,95 \text{ год.}$$

Срок окупаемости СПП с учетом затрат на монтаж системы (15% от общей цены СПП)

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{1,15 \times 16000000}{2 \times 2714539,5} \approx 3,39 \text{ год.}$$

При проведении вычислений с учетом затрат на ремонты и профилактические работы, которые за последние три года составили 20,4 млн. рублей, (согласно данным таблицы 4), получим

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{16000000}{6800000} = 2,35 \text{ год,}$$

где $CT_{\tau\tau}$ – средняя стоимость затрат на ремонты, обслуживание и др. работы (за последние 3 года), $20,4/3=6,8$ млн. рублей.

Срок окупаемости СПП по проведенным расчетам и с учетом основных определяющих факторов составил от 2,35 до 3,39 года, что является показателем эффективного внедрения СПП. Для СПП больших мощностей, в нашем случае 8 МВт, рекомендуемый срок окупаемости составляет от 2 до 4 лет. Ожидаемая экономия финансовых средств от внедрения инвертора тока в АНС-1 по проведенным расчетам, может составлять от 1 до 3 млн. рублей в год.

Выводы

Результаты расчетов показали, что при использовании СПП на основе инвертора тока в ОНС достигается оптимальный режим работы объекта, как в технических, так и экономических аспектах. На конкретном примере показана рациональность применения СПП, при этом увеличивается технический ресурс оборудования и срок его службы в ОНС. Каждый прямой пуск электродвигателя приводит к износу и старению частей всего оборудования ОНС. При этом техническое обслуживание и ремонты могут обеспечить только устранение результатов аварий, но не устраняют причины их возникновения. Поэтому при отсутствии принятия технических решений, для оборудования ОНС, будут нужны частые профилактические ремонты, а также значительно возрастут затраты для стационарного функционирования объекта. Проведенные исследования аналогичных объектов в России и других странах доказывают эффективность применения СПП, однако, экономическая составляющая использования СПП является предметом обсуждения. Спор и недооценка СПП обычно возникает в случае неверного анализа ее применения. Например, на объектах, где необходимо использовать регулируемый электропривод, - применение УПП, как правило, неэффективно. В случае же ЭП с постоянными нагрузками – целесообразность применения СПП очевидна. Поэтому для каждого объекта необходимо проводить детальную процедуру обоснования применения СПП. Предложенная методика с

учетом других известных алгоритмов будет способствовать уточнению результатов технико-экономического обоснования СПП в ЭП насосных станций и подобных системах в целом.

Литература

1. Крысанов В.Н., Гамбург К.С., Руцков А.Л. Оценка экономического эффекта от применения устройств плавного пуска с использованием принципов нейросетевого управления. Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. № 5 (53) 2013. С. 21-25.
2. Статистический ежегодник Согдийской области. Таджикистан: 30 лет государственной независимости. Главное управление Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан в Согдийской области, 2021 г.
3. Инвестиционная программа «Развитие систем водоснабжения и водоотведения города Альметьевск на 2012-2014 годы» (с изменениями на 2013-2014 годы).
4. Krause, P. C. et al., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 3rd edition, 2013.
5. Дадабаев Ш.Т. Моделирование режимов пуска высоковольтного синхронного электропривода с устройством плавного пуска. В сборнике: САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов 1 Международной научно-практической конференции. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2017. С. 91-94.
6. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска. В сборнике: Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017). Труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 76-80.
7. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллаев Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ 2018. № 4 (40). С. 53-65.
8. Дадабаев Ш.Т. Обзор и оценка способов управления насосными установками. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 28-30.
9. Khasanov S.R., Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I., et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. E3S Web Conf., 178 (2020) 01051. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801051>.
10. Sen P.C. Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.
11. Tolibjonovich D.S., Islomovna T.M., Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. European Journal of Electrical Engineering, V. 22, No. 1, pp. 23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>
12. Дадабаев Ш.Т. Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 11. С. 29-34.
13. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375.
14. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 172 с.
15. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.
16. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). P. 6.
17. Дадабаев Ш.Т. Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 618-621.
18. Bruce F.M., Graefe R.J., Lutz A. & Panlener M.D. Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, V. IA- 20, No. 1, pp. 46-55, January/February 1984.
19. Nevelsteen J. & Aragon H., Starting of Large Motors -Methods and Economics, IEEE Transactions on Industry Applications, V. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.
20. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Математическая модель влияния природных и эксплуатационных факторов на надёжность влэп-110 кв в условиях резко континентального климата. Вестник КГЭУ 2020. № 1 (45). С. 71-81.

21. Гизатуллин Р.М., Павлова Э.И., Мухаммадиев А.А. Помехоустойчивость вычислительной техники при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания. Вестник КГЭУ 2019. № 3 (43). С. 87-98.

23. Wu B. and Narimani M. High-Power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2017.

23. Chapman S. Electric Machinery Fundamentals, Mcgraw Hill Higher Education; 5th Edition, 2011.

24. Калинин А.Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары 2011.

25. Ларионов В.Н., Калинин А.Г. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. Чебоксары: Изд-во. Чуваш. Ун-та, 2012. 146 с.

26. Электронный ресурс. Доклад управлению мелиорации и ирригации Республики Таджикистан. <https://sadoimardum.tj/nishast-oi-matbuot/agentii-be-doshti-zamin-va-obyor-az-bar-i-to-ik-321-9-million-somon-arzdor-ast/>. Ссылка активна на : 8.02.2022 г.

27. Электронный ресурс. Тарифы электричество в Таджикистане. https://halva.tj/news/v_tadzhikistane_povysyat_tarify_na_elektrichestvo. Ссылка активна на: 8.02.2022 г.

Авторы публикации

Дадабаев Шахбоз Толибджонович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и Автоматика» Худжандского политехнического института таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Krysanov VN, Gamburg KS, Rutskov AL. Otsenka ekonomicheskogo effekta ot primeneniya ustroystv plavnogo pushka s ispol'zovaniyem printsipov neyrosetevogo upravleniya. *Energoresursosberezheniye i energoeffektivnost'*. 2013;5 (53):21-25.

2. Statisticheskiy yezhegodnik Sogdiyskoy oblasti. Tadjhikistan: 30 let gosudarstvennoy nezavisimosti. Glavnoye upravleniye Agenstva po statistike pri Prezidente Respubliki Tadjhikistan v Sogdiyskoy oblasti, 2021.

3. Investitsionnaya programma «Razvitiye sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya goroda Al'met'yevsk na 2012-2014 gody» (s izmeneniyami na 2013-2014.).

4. Krause PC, et al. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press, 3rd edition, 2013.

5. Dadabaev ST. Modelirovaniye rezhimov pushka vysokovol'tnogo sinkhronnogo elektroprivoda s ustroystvom plavnogo pushka. V sbornike: SAPR i modelirovaniye v sovremennoy elektronike. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Pod red. Potapova LA., Drakina AYU. 2017. pp. 91-94.

6. Dadabaev ST. Komp'yuternoye modelirovaniye nagreva sinkhronnykh elektroprivodov nasosnykh agregatov pri razlichnykh sposobakh pushka. *Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii* (PIT 2017). Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2017. pp. 76-80.

7. Gracheva EI, Alimova AN, Abdullazyanov RE. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoy moshchnosti i elektroenergii v nizkovol'tnykh tsekhovykh setyakh. *Vestnik KGEU*. 2018;4 (40):53-65.

8. Dadabaev ST. Obzor i otsenka sposobov upravleniya nasosnymi ustanovkami. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont*. 2013;12:28-30.

9. Khasanov SR, Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI, et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. E3S Web Conf., 178 (2020) 01051. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801051>.

10. Sen PC. Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.

11. Tolibjonovich DS, Islomovna TM, Saidulloevna MD. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network.

European Journal of Electrical Engineering. 2020;22(1):23-28.
<https://doi.org/10.18280/ejee.220103>.

12. Dadabaev S.T. Osobennosti mekhanicheskikh kharakteristik elektroprivodov s ventilyatornym kharakterom nagruzki. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont.* 2013. № 11. S. 29-34.

13. Dadabaev ST. Komp'yuternoye modelirovaniye invertora toka ispol'zuyemoye dlya puska vysokovol'tnykh elektrodvigately. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.* 2019;2:370-375.

14. Pozdeyev AD. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh.* Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 1998. 172 p.

15. Kovach KP, Rats I. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka.* M. L.: Gosenergoizdat. 1963. 735 p.

16. Gracheva EI, Naumov OV. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM),* (2019). P. 6.

17. Dadabaev ST. Issledovaniye effektivnosti puska vysokovol'tnykh sinkhronnykh elektrodvigately pri pomoshchi invertora toka. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.* 2018;10:618-621.

18. Bruce FM, Graefe RJ, Lutz A. & Panlener MD. Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 1984;IA-20:1:46-55, January/February 1984.

19. Nevelsteen J. & Aragon H, Starting of Large Motors - Methods and Economics. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 1989;25(6):1012-1018, November/December.

20. Toshkhodzhaeva MI, Khodzhiyev AA. Matematicheskaya model' vliyaniya prirodnykh i ekspluatatsionnykh faktorov na nadozhnost' vlep-110 kv v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata. *Vestnik KGEU.* 2020;1 (45):71-81.

21. Gizatullin RM, Pavlova EI, Mukhammadiyev AA. Pomekhoustoychivost' vychislitel'noy tekhniki pri vozdeystvii elektromagnitnykh pomekh po seti elektropitaniya. *Vestnik KGEU.* 2019;3 (43):87-98.

22. Wu B. and Narimani M. *High-Power converters and AC drives.* Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2017.

23. Chapman S. *Electric Machinery Fundamentals.* Mcgraw Hill Higher Education; 5th Edition, 2011.

24. Larionov VN, Kalinin AG. *Energoeffektivnost' i energosberezheniye v elektroprivodakh s ventilyatornoy nagruzkoy.* Cheboksary: Izd-vo. Chuvash. Un-ta, 2012. 146 p.

26. Electronic resource. *Report of the Department of Melioration and Irrigation of the Republic of Tajikistan.* <https://sadoimardum.tj/nishast-oi-matbuot/agentii-be-doshti-zamin-va-obyor-az-bar-i-to-ik-321-9-million-somon-arzdor-ast/> Accessed to: 02/08/2022.

27. Electronic resource. Electricity tariffs in Tajikistan. https://halva.tj/news/v_tadzhikistane_povysyat_tarify_na_elektrichestvo/ Accessed to: 02/08/2022.

Authors of the publication

Shakhboz T. Dadabaev – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Automation of the Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan.

Elena I. Gracheva – Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Doctor of Technical Sciences.

Получено 09.03.2022г.

Отредактировано 18.03.2022г.

Принято 22.03.2022г.