

Научная статья

УДК 621.311:622.3

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>

**Моделирование режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти
с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности**

**Дмитрий Павлович Антипин^{1✉}, Максим Евгеньевич Овчаренко²,
Александр Алексеевич Заруднев³**

^{1, 2, 3}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹antipin_dp@surgu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0003-1580-8520>

²ovcharenko_me@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9160-1855>

³zarudnev_aa@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1150-964X>

Аннотация. В результате моделирования режима работы системы электроснабжения установки электроцентробежного насоса куста нефтедобычи в условиях несинусоидальности питающего напряжения представлена сравнительная оценка показателей качества электрической энергии – суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I (коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока). Оценены потери активной мощности в сети при использовании устройства внутрискважинной компенсации реактивной мощности и без него. Данные моделирования дают хорошее согласие с экспериментальными данными и характеристиками используемых аппаратов, заявленными производителями. Установка компенсатора реактивной мощности не вносит заметных искажений питающего напряжения в системе, создаваемых станцией управления, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U компенсатора не превышает допустимых уровней и составляет менее 5 %. Установка внутрискважинного компенсирующего устройства (неуправляемого) в условиях несинусоидальности питающего напряжения уменьшает потери активной мощности, тем самым снижая потребление электроэнергии внутрискважинным оборудованием.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, энергоэффективность, несинусоидальность, потери мощности и энергии, внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, высшие гармоники

Для цитирования: Антипин Д. П., Овчаренко М. Е., Заруднев А. А. Моделирование режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 4. С. 6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>.

Original article

**Operating modes modeling for electrotechnical complex of oil production
with downhole reactive power compensator**

Dmitry P. Antipin^{1✉}, Maksim E. Ovcharenko², Aleksandr A. Zarudnev³

^{1, 2, 3}Surgut State University, Surgut, Russia

¹antipin_dp@surgu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0003-1580-8520>

²ovcharenko_me@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9160-1855>

³zarudnev_aa@edu.surgu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1150-964X>

Abstract. Operation mode modeling of the power supply system for an electric centrifugal pump plant of an oil well cluster under conditions of power supply voltage unsinusoidality provided a comparative evaluation of electric power quality indicators: the total coefficient of harmonic components of voltage K_U and cur-

rent K_f (coefficients of sinusoidality curve voltage distortion and current). Active power losses in the grid with and without downhole reactive power compensator are evaluated. The modelling data agrees closely with the experimental data and characteristics of the used devices declared by the manufacturers. Installation of the reactive power compensator does not cause noticeable distortions of the supply voltage in the system created by the control station. The value of the total coefficient of voltage harmonic components of K_v compensator does not exceed the acceptable levels and makes less than 5%. Installation of downhole compensating device (uncontrolled) in conditions of supply voltage unsinusoidality cuts down active power losses, thus reducing power consumption by downhole equipment.

Keywords: electrical submersible motor, energy efficiency, unsinusoidality, power and energy loss, downhole reactive power compensator, higher harmonics

For citation: Antipin D. P., Ovcharenko M. E., Zarudnev A. A. Operating modes modeling for electro-technical complex of oil production with downhole reactive power compensator. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(4):6–17. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-4-1>.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из задач развития нефтяных компаний – это энергосбережение и повышение энергетической эффективности. В частности, уменьшение потребления электроэнергии при добыче с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Ими добывается, как известно, порядка 60–70% нефти, и в дальнейшем доля будет только возрастать. Погружной электродвигатель (ПЭД) является приводом для установок ЭЦН, а управление, защита ПЭД производится в станции управления.

Сокращение потребления электроэнергии и потерь от общего энергопотребления при добыче с УЭЦН достигается путем увеличения КПД ЭЦН, увеличения сечения жил питающей кабельной линии (КЛ), применения ПЭД с повышенным напряжением [1–3]. Задачами повышения коэффициента мощности систем электроснабжения нефтедобывающих установок и снижения потерь мощности занимались многие ученые, как российские, так и зарубежные: Ю. С. Железко, L. S. Czarnecki и др. [4, 5]. В работах предложены способы повышения продуктивности использования ПЭД установки ЭЦН за счет применения внутрискважинного компенсатора реактивной мощности [6–9]. Для предложенных технических устройств в работе получены результаты по определению оптимальных параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности (ВКРМ) для обеспечения минимального потребления мощно-

сти, а в работах [10–12] проведена оценка падений напряжения в системе «промысловый трансформатор – КЛ – ПЭД» с ВКРМ с целью недопущения перенапряжения на вводах конденсаторов и предотвращения аварий, исследована устойчивость погружного двигателя и дана оценка стоимости владения УЭЦН внутрискважинным компенсатором [13]. Также в ходе эксплуатации УЭЦН коэффициент мощности, определяемый ПЭД, может снижаться до 0,6–0,75 при недогрузках, что увеличивает потребление реактивной мощности и потери активной.

Автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН ШИМ) в составе СУ является источником несинусоидального напряжения в системе «промысловый трансформатор – КЛ – ПЭД» электроснабжения куста нефтедобычи. Искажения формы кривой напряжения и тока приводит, как известно, к различным отрицательным последствиям. Увеличиваются потери мощности в двигателях, что приводит к снижению его КПД, к уточнению методик расчета двигателей из условия теплового перегрева [14, 15]. Увеличение потерь мощности в питающих кабельных линиях увеличивает нагрев жил и изоляции. Это приводит к уменьшению срока службы изоляции проводов и кабелей, диэлектриков конденсаторных установок. Несинусоидальность напряжения нарушает нормальную работу защиты, автоматики и связи, а также возможны появления резонансных явлений [16, 17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В программном комплексе Matlab/Simulink создана имитационная модель электро-снабжения куста нефтедобычи, показанная на рис. 1, для исследования различных режимов работы электротехнического комплекса добычи нефти при использовании устройства ВКРМ [18]:

На рис. 2 представлена блок-схема станции управления, являющаяся источником несинусоидальности напряжения.

Блок-схема состоит из выпрямителя, инвертора и системы управления инвертором

для необходимого изменения напряжения на выходе СУ [19].

Погружной асинхронный двигатель с параметрами, рассчитанными для модуля Asynchronous Machine при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,84$: номинальная полная мощность $P_n = 107143$ ВА; номинальное линейное напряжение $U_n = 1800$ В; номинальная частота $f_n = 50$ Гц; активное сопротивление статора $R_s = 0,061$ о.е.; индуктивность рассеяния статора $LI_s = 0,0319$ о.е.; активное сопротивление ротора $R_r = 0,0275$ о.е.; индуктивность рассеяния ротора $LI_r = 0,0319$ о.е.; индуктивность

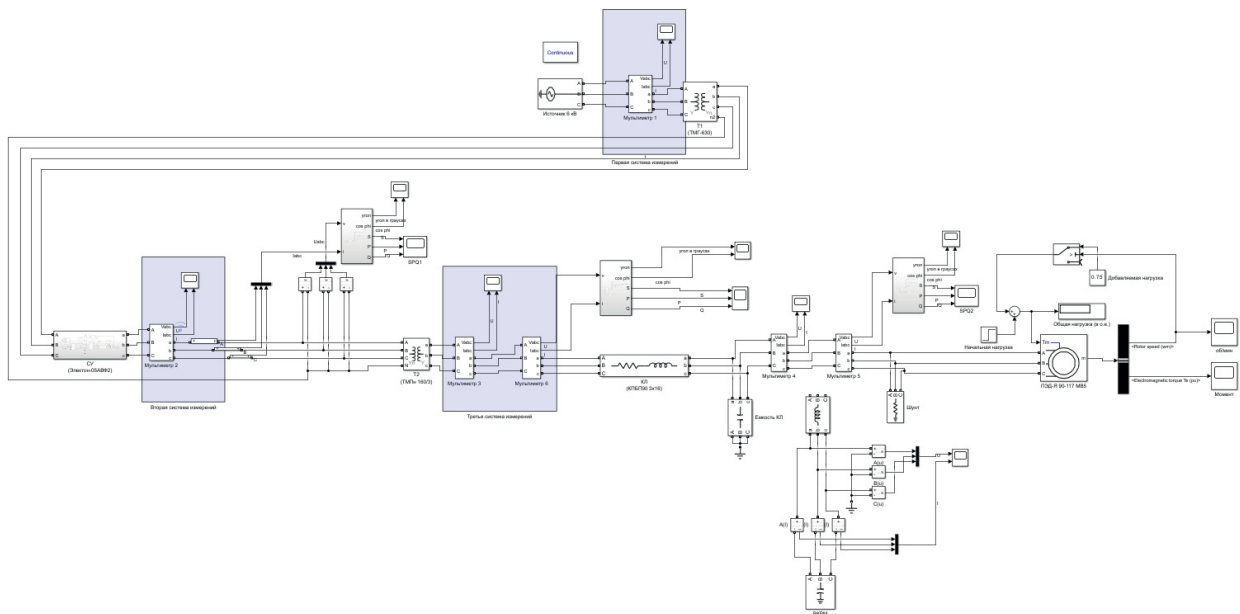


Рис. 1. Модель электроснабжения куста нефтедобычи

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

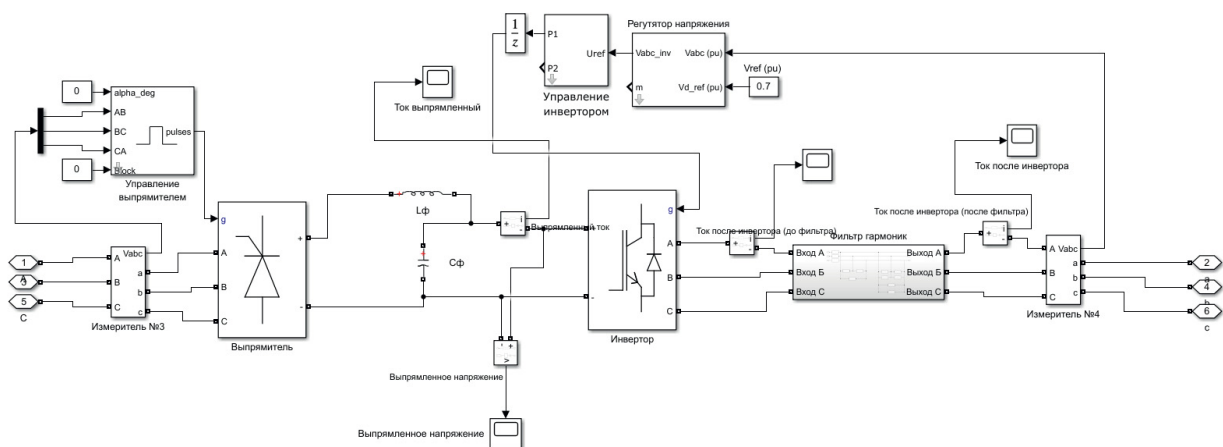


Рис. 2. Блок станции управления

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

цепи намагничивания $L_m = 1,4154$ о.е.; постоянная инерции $H = 0,2119$ с; коэффициент трения ротора $F = 0,05479$; число пар полюсов $p = 1$ – подключен к шинам промышленного трансформатора (Т2), параметры которых указаны в табл. 1. Для кабельной линии типа КПБП90 3х16 с погонным активным сопротивлением при 20 °С $r_0 = 1,15$ Ом/км; погонным индуктивным сопротивлением при 20 °С $x_0 = 0,0757$ Ом/км; погонной емкостью кабеля $c_0 = 0,1$ мкФ/км, длиной кабеля $l = 2,5$ км определены: $R = 2,875$ Ом; $L = 0,6024$ мГн; $C = 0,25$ мкФ – для заполнения модулей Three-Phase Transformer (Two Windings) и Three-Phase Series RLC Branch соответственно.

Коэффициенты трансформации ТМПн 160/3 (Т2) подбирались согласно номинальным ступеням трансформатора. При заполнении табл. 1 использовались каталожные данные и программа вычисления (Live Script) некоторых параметров в именованных и относительных единицах.

Для блока Asynchronous Machine при коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,72$ параметры рассчитаны аналогично: номинальная полная мощность $P_n = 125000$ ВА; номинальное линейное напряжение $U_n = 1800$ В; номинальная частота $f_n = 50$ Гц; активное сопротивление статора $R_s = 0,0537$ о.е.; индуктивность рассеяния статора $LI_s = 0,0372$ о.е.; активное сопротивление ротора $R_r = 0,0321$ о.е.; индуктивность рассеяния ротора

$LI_r = 0,0372$ о.е.; индуктивность цепи намагничивания $L_m = 1,2814$ о.е.; постоянная инерции $H = 0,2119$ с; коэффициент трения ротора $F = 0,05479$; число пар полюсов $p = 1$.

Управление погружным двигателем осуществляется станцией управления, состоящей из модулей, показанных на рис. 2. Блок-выпрямитель – Universal Bridge (Thyristors) с характеристиками: сопротивление снаббера (Snubber resistance, Ohm) $R_s = 10000$ Ом; емкость снаббера (Snubber capacitance, F) $C_s = \text{inf}$; активное сопротивление (Active resistance, Ohm) $R_{on} = 0,001$ Ом; индуктивность (Inductance, H) $L_{on} = 0$ Гн; падение напряжения (Forward voltage, V_f) $V_f = 0$ В. Блок-инвертор Universal Bridge (IGBT/Diodes) с характеристиками: сопротивление снаббера (Snubber resistance, Ohm) $R_s = 10000$ Ом; емкость снаббера (Snubber capacitance, F) $C_s = \text{inf}$; активное сопротивление (Active resistance, Ohm) $R_{on} = 0,001$ Ом; индуктивность (Inductance, H) $L_{on} = 0$ Гн; падение напряжения (Forward voltage, V_f и V_{fd}) $V_f = 0$ В, $V_{fd} = 0$ В. Также используются блоки управления выпрямителем и инвертором, которые настраиваются с помощью программы.

Объектом моделирования является сеть электроснабжения куста нефтедобычи, состоящая из источника питания 6 кВ частотой 50 Гц, понижающего трансформатора 6/0,4 кВ, СУ «Электрон-05АВФ2» с частотой ШИМ 2,5 кГц, технические характеристики которой представлены в табл. 2, кабельной линии, промыс-

Таблица 1

Значения параметров трансформаторов

Параметр		Ед. изм.	Значение	
			Т1 (ТМГ-630)	Т2 (ТМПн-160/3)
Номинальная полная мощность	P_n	ВА	630000	160000
Напряжение первичной обмотки	V_1	В	6000	270
Напряжение вторичной обмотки	V_2	В	380	2100
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток	R_1, R_2	Ом/о.е.	0,3447/0,006	0,1869/0,00825
Индуктивность первичной и вторичной обмоток	L_1, L_2	мГн/о.е.	4,8826/0,0268	1,885/0,025
Активное сопротивление ветви намагничивания	R_m	кОм/о.е.	29,032/508,0645	8,2045/362,48
Индуктивность ветви намагничивания	L_m	Гн/о.е.	10,777/59,2218	5,2344/56,2155

Примечание: составлено авторами по источнику [20].

Таблица 2

Технические характеристики СУ серии «Электрон-05АВФ2»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Напряжение питающей сети	В	$380 \pm 15 \%$
Частота тока питающей сети	Гц	50
Выходное напряжение	В	0–380
Выходная частота	Гц	$3,5-5 \pm 0,1 \%$
Ток перегрузки (в течение 5 минут)	%	125
КПД при номинальном токе	–	$\geq 0,95$
Коэффициент мощности сети	–	$\geq 0,95$
Коэффициент нелинейных искажений выходных токов	%	≤ 5
Коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения	%	≤ 5
Индуктивность дросселей фильтра гармоник	мГн	0,119
Емкость конденсаторов фильтра гармоник	мкФ	50; 100

Примечание: составлено авторами по источнику [21].

лового трансформатора (повышающего с несколькими ступенями трансформации) и ПЭД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При моделировании установившегося режима работы участка сети «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» без ВКРМ установлено, что полученные модельные токи и напряжения находятся в хорошем приближении к параметрам, полученным в работе [7]. В ходе моделирования без СУ получено:

- линейное напряжение на ПЭД – $U_{\text{ПЭД}} = 1633 \text{ В}$; – фазный ток $I_{\text{ф}} = 45,3 \text{ А}$.

Расчеты режима с СУ показали следующие результаты:

- линейное напряжение на ПЭД – $U_{\text{АВ}} = 1770 \text{ В}$, $U_{\text{ВС}} = 1770 \text{ В}$, $U_{\text{СА}} = 1771 \text{ В}$;

- фазный ток $I_{\text{фА}} = 46,9 \text{ А}$, $I_{\text{фВ}} = 46,8 \text{ А}$, $I_{\text{фС}} = 46,9 \text{ А}$.

Станция управления является источником несинусоидальности и, как следствие, дополнительных гармонических составляющих напряжения и тока, что приводит к завышению их действующих значений, появлению мощности искажения, на которую затрачивается часть активной мощности, что является дополнительными потерями активной мощности.

Спектральный анализ на выходе СУ (второй системе измерений на рис. 1) проведен с 5-й по 9-ю секунду, а параметр Number of cycles в окне FFT Analyzer выставлен в 200 у.е. для всех систем (точек) измерения.

В ходе моделирования получен суммарный коэффициент гармонических составляющих

напряжения и тока (коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока) по каждой фазе: $K_{\text{УА}} = 4,58\%$, $K_{\text{УВ}} = 4,63\%$, $K_{\text{УС}} = 4,59\%$; $K_{\text{ИА}} = 2,93\%$, $K_{\text{ИБ}} = 2,99\%$, $K_{\text{ИС}} = 3,07\%$, что не превышает коэффициента нелинейных искажений выходных напряжений и токов, указанный в табл. 2 – технические характеристики СУ. Спектральный состав, полученный в ходе моделирования, не приводится, так как производитель подтверждает требования только на суммарные коэффициенты нелинейных искажений выходных токов и напряжений.

С целью повышения энергоэффективности сети электроснабжения куста нефтедобычи предлагается при установке ПЭД сразу подключать ВКРМ, а не только при снижении коэффициента мощности до уровня 0,72 и ниже. Такой способ установки повышает коэффициент мощности асинхронного двигателя с 0,84 до 0,95 в номинальном режиме эксплуатации и с 0,72 до 0,84 в режиме с низким коэффициентом мощности.

Необходимая реактивная мощность ВКРМ может быть найдена по известному выражению (1):

$$Q_{\text{ВКРМ}} = P_{\text{ПЭД}_{\text{ном}}} \cdot (\text{tg } \varphi_{\text{ПЭД}} - \text{tg } \varphi_{\text{тр}}) =$$

$$= P_{\text{ПЭД}_{\text{ном}}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{ПЭД}}} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_{\text{тр}}} - 1} \right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ВКРМ}}$ – реактивная мощность внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, кВар; $\text{tg } \varphi_{\text{ПЭД}}$, $\text{tg } \varphi_{\text{тр}}$ – исходный коэффициент

реактивной мощности ПЭДа и требуемый коэффициент реактивной мощности сети соответственно; $\cos\varphi_{\text{тр}}$ – требуемый коэффициент мощности сети в месте подключения компенсирующего устройства.

Результаты моделирования установившегося режима работы участка сети «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» с установленным ВКРМ (неуправляемый) и коэффициентом мощности 0,84 показали, что суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения во 2-й системе измерений (на выходе станции управления) не превышают 5 %

и при этом уменьшились – рис. 3, а тока в той же системе измерений также не превышают 5 %, при этом увеличились – рис. 4 [8].

Результаты моделирования суммарных коэффициентов, гармонических составляющих напряжения и тока по каждой фазе при коэффициенте мощности 0,84:

- на ПЭД: $K_{UA} = 2,92\%$, $K_{UB} = 2,90\%$, $K_{UC} = 2,84\%$; $K_{IA} = 3,57\%$, $K_{IB} = 3,78\%$, $K_{IC} = 3,53\%$, с ВКРМ;

- на ВКРМ: $K_{UA} = 3,01\%$, $K_{UB} = 3,37\%$, $K_{UC} = 3,01\%$; $K_{IA} = 14,08\%$, $K_{IB} = 15,64\%$, $K_{IC} = 14,22\%$.

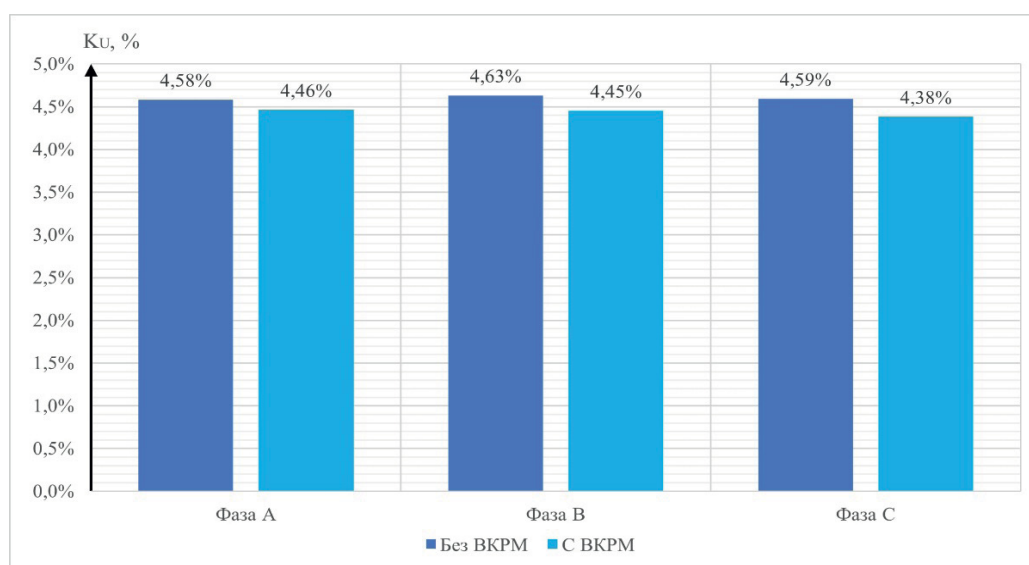


Рис. 3. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения на фазах 2-й системы измерений

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

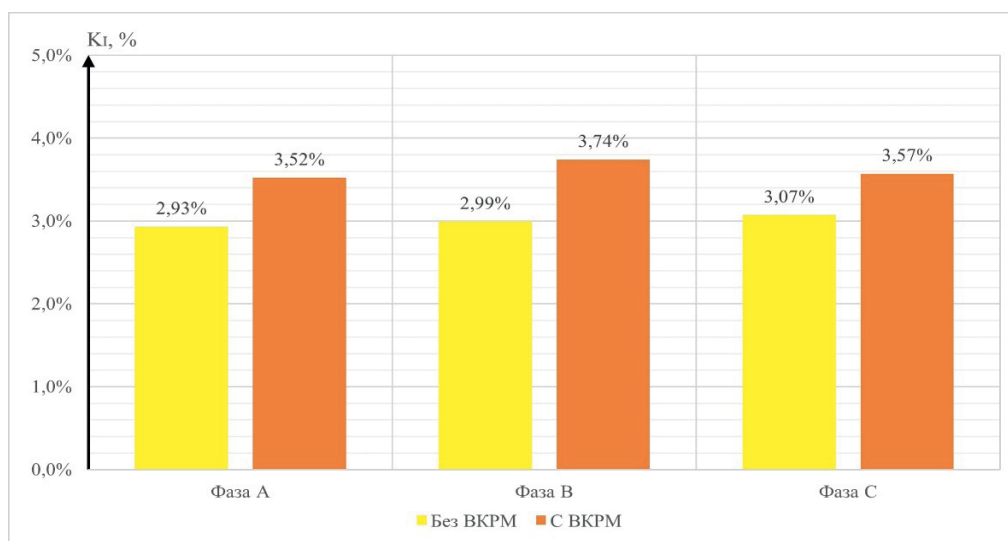


Рис. 4. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на фазах 2-й системы измерений

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Значения рассчитанных показателей показывают, что на погружном электродвигателе и установке ВКРМ K_U не превышают 5 %, что соответствует допустимым значениям, определенным ГОСТ 32144-2013.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока по каждой фазе K_I погружного электродвигателя также не превышает 5 %.

Значения показателя K_I на компенсаторе превышают 10 %, но российский стандарт не накладывает ограничений на данный параметр. Обратим внимание, что американский стандарт IEEE Std 519 определяет предельные значения показателя K_I (TDD – total demand distortion – общее искажение по току) и 5 % – одно из определяющих значений [22]. Поэтому следует обратить внимание на снижение показателя K_I на самом компенсаторе, так как загрузка высшими гармониками отрицательно влияет на изоляцию конденсатора, увеличивая $\tan \delta$ – тангенс диэлектрических потерь и, следовательно, потери активной мощности.

Следующим шагом проведено моделирование установившегося режима работы того же участка сети с установленным ВКРМ и коэффициентом мощности 0,72 и проведен аналогичный анализ гармонических составляющих тока и напряжения. В результате получено, что суммарные коэффициенты гармониче-

ских составляющих напряжения на фазах во 2-й системе измерений уменьшились – рис. 5, а тока в той же системе измерений увеличились – рис. 6.

Коэффициенты гармонических составляющих по напряжению на фазах внутрисквжинного компенсатора реактивной мощности увеличились: $K_{UA} = 3,84\%$; $K_{UB} = 4,48\%$; $K_{UC} = 4,01\%$ и току ($K_{IA} = 17,84\%$; $K_{IB} = 21,13\%$; $K_{IC} = 19,05\%$ – при снижении коэффициента мощности погружного электродвигателя. Также наблюдается небольшое увеличение гармонических составляющих напряжения ($K_{UA} = 3,12\%$; $K_{UB} = 3,15\%$; $K_{UC} = 3,03\%$) на фазах погружного электродвигателя. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на погружном электродвигателе изменились (уменьшились) незначительно при снижении коэффициента мощности: при $\cos \varphi = 0,84$ $K_{IA} = 3,57\%$; $K_{IB} = 3,78\%$; $K_{IC} = 3,53\%$; при $\cos \varphi = 0,72$ $K_{IA} = 3,25\%$; $K_{IB} = 3,71\%$; $K_{IC} = 3,53\%$. При этом все значения показателей в исследуемых точках электрической сети не превышают 5 %.

Программный комплекс Matlab/Simulink позволяет произвести расчет потерь активной мощности в кабельной линии при различных коэффициентах мощности с наличием ВКРМ и без него.

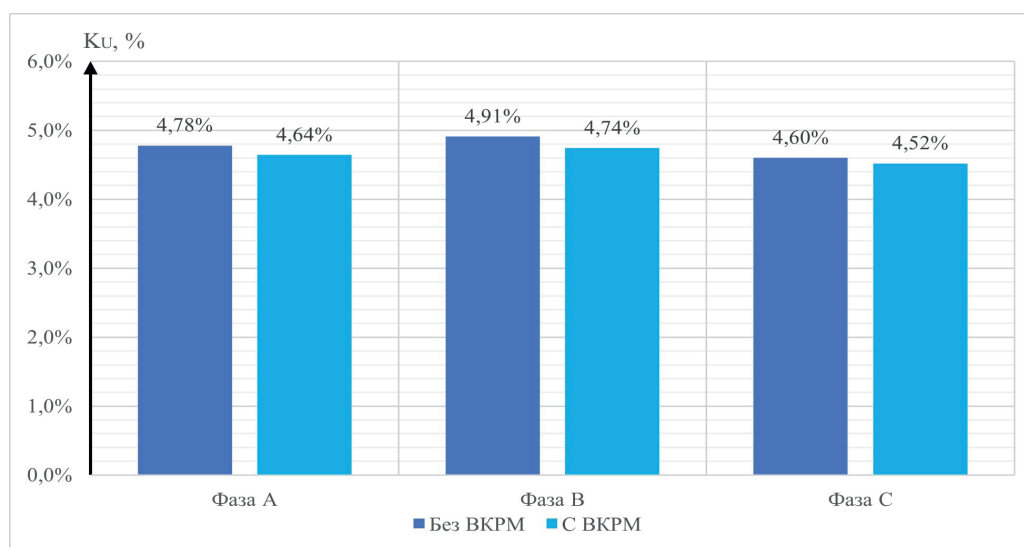


Рис. 5. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения на фазах 2-й системы измерений при коэффициенте мощности 0,72

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

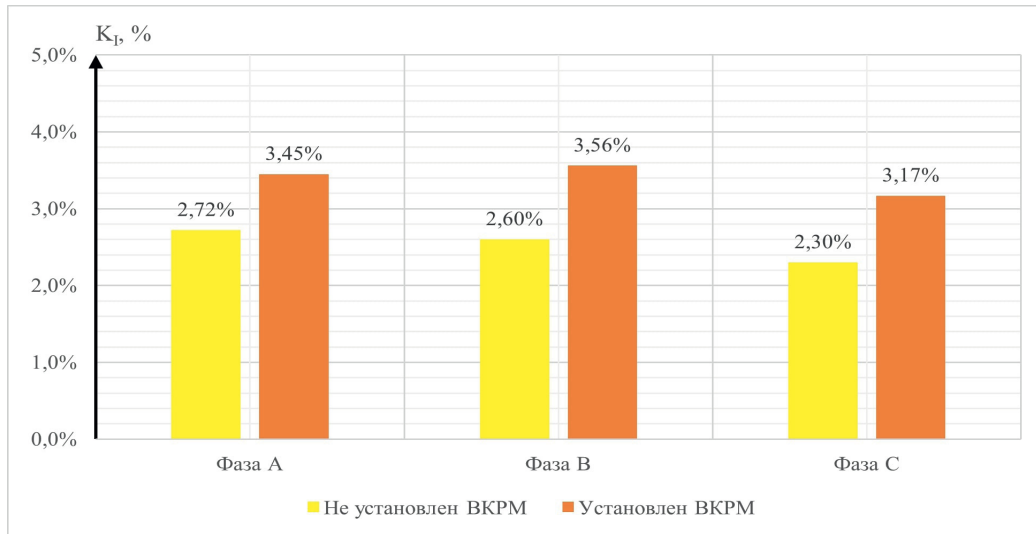


Рис. 6. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока на фазах 2-й системы измерений при коэффициенте мощности 0,72

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Используя блок Power Measurement (Three-Phase) для определения мощности, найдем значения потерь мощности в кабельной линии с учетом n -х гармонических составляющих с номерами 2–18 и (2):

$$\Delta P_n = \sum I_n^2 \cdot \sqrt{n} \cdot R, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление жилы КЛ, Ом;

$\sum I_n^2$ – сумма квадратов действующего значения фазного тока n -й гармонической составляющей, А;

n – номер гармонической составляющей тока.

Результаты расчетов активной мощности в точках и потерь на участке «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД» для различных коэффициентов мощности:

Для коэффициента мощности 0,84:

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора на основной гармонике: $P_{1(тр)} = 144300 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(тр)} = 140600 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора от кратных гармоник: $P_{n(тр)} = 23 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(тр)} = 25 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя на основной гармонике: $P_{1(ПЭД)} = 125100 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(ПЭД)} = 124800 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя от кратных гармоник: $P_{n(ПЭД)} = 4,9 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(ПЭД)} = 4,5 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности на основной гармонике 50 Гц: $\Delta P_1 = 19200 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_1 = 15800 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности от кратных гармоник: $\Delta P_n = 19 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_n = 20 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- полные потери активной мощности: $\Delta P_{\text{полн}} = 19219 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_{\text{полн}} = 15820 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной мощности ПЭД: $\delta P_n = 18\%$ – без ВКРМ, $\delta P_n = 15\%$ – с ВКРМ.

Для коэффициента мощности 0,72:

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора на основной гармонике: $P_{1(тр)} = 174400 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(тр)} = 169500 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на выходе промышленного трансформатора от кратных гармоник: $P_{n(тр)} = 26 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(тр)} = 32 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя на основной гармонике: $P_{1(ПЭД)} = 145500 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{1(ПЭД)} = 145200 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- активная мощность на зажимах погружного электродвигателя от кратных гармоник:

$P_{n(ПЭД)} = 5,3 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $P_{n(ПЭД)} = 4,8 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности на основной гармонике 50 Гц: $\Delta P_1 = 28900 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_1 = 24300 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- потери активной мощности от кратных гармоник: $\Delta P_n = 21 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_n = 27 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- полные потери активной мощности: $\Delta P_{\text{полн}} = 28921 \text{ Вт}$ – без ВКРМ, $\Delta P_{\text{полн}} = 24327 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной мощности ПЭД: $\delta P_n = 23\%$ – без ВКРМ, $\delta P_n = 20\%$ – с ВКРМ.

Для уточнения потерь активной мощности в кабельной линии скважинного ПЭД воспользуемся (3), представляющей связь активного сопротивления с температурой окружающей среды:

$$R = R_0[1 + \alpha(t(l) - 20)] , \quad (3)$$

где R – активное сопротивление жилы КЛ, Ом; R_0 – активное сопротивление жилы КЛ при 20°C , Ом; $t(l)$ – температура окружающей среды как функция длины КЛ, $^\circ\text{C}$; $\alpha = 0,0041$ – температурный коэффициент меди, $^\circ\text{C}^{-1}$.

Экспериментальные измерения температуры вдоль ствола скважины показали, что на глубине ПЭД она может достигать 90°C , интерполирование данных дает с хорошей точностью линейную зависимость $t(l) = A \cdot l$, где l – длина кабельной линии, м; A – геотермический градиент, значения которых для разных регионов добычи также приведены в [23]. Поэтому распределенную по длине температуру в первом приближении можно заменить средней арифметической температурой между температурами устья скважины – t_y и на глубине ПЭД – $t_{нэд}$ [23]:

$$t(l) \approx t_{cp} = \frac{t_y + t_{нэд}}{2}.$$

Таким образом в условиях данных по Тюменской области можно принять $t_y = 20^\circ\text{C}$, $t_{нэд} = 70^\circ\text{C}$ и $t_{cp} = 45^\circ\text{C}$, а пересчитанное по формуле (3) сопротивление имеет значение

$$R = 3,1625 \text{ Ом}.$$

Результаты расчетов суммарных коэффициентов, гармонических составляющих на-

пряжения и тока по каждой фазе на ПЭД при коэффициенте мощности 0,84:

$K_{UA} = 3,70\%$, $K_{UB} = 3,75\%$, $K_{UC} = 3,71\%$; $K_{IA} = 2,89\%$, $K_{IB} = 2,96\%$, $K_{IC} = 2,88\%$, без ВКРМ; $K_{UA} = 2,93\%$, $K_{UB} = 2,92\%$, $K_{UC} = 2,87\%$; $K_{IA} = 2,77\%$, $K_{IB} = 2,94\%$, $K_{IC} = 2,55\%$, с ВКРМ; $K_{UA} = 3\%$, $K_{UB} = 3,26\%$, $K_{UC} = 3,01\%$; $K_{IA} = 13,99\%$, $K_{IB} = 15,18\%$, $K_{IC} = 14,29\%$ – на компенсаторе реактивной мощности.

Для коэффициента мощности 0,72:

$K_{UA} = 3,96\%$, $K_{UB} = 4,06\%$, $K_{UC} = 3,87\%$; $K_{IA} = 2,75\%$, $K_{IB} = 2,92\%$, $K_{IC} = 2,65\%$, без ВКРМ; $K_{UA} = 3,17\%$, $K_{UB} = 3,18\%$, $K_{UC} = 3,08\%$; $K_{IA} = 2,69\%$, $K_{IB} = 2,66\%$, $K_{IC} = 2,53\%$, с ВКРМ; $K_{UA} = 4\%$, $K_{UB} = 4,2\%$, $K_{UC} = 4,14\%$; $K_{IA} = 18,55\%$, $K_{IB} = 19,97\%$, $K_{IC} = 19,73\%$, на ВКРМ. Значения коэффициентов, измеренных на выходе СУ и промышленного трансформатора, не изменяются.

Уточненные потери активной мощности составляют для коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,84$:

- на основной гармонике $\Delta P_1 = 21400 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_1 = 17700 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- кратные гармоники $\Delta P_n = 13 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_n = 16 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 24\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 20\%$ – с ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,06\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,09\%$ – с ВКРМ;

$\cos\varphi = 0,72$:

- на основной гармонике $\Delta P_1 = 32600 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_1 = 27500 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- кратные гармоники $\Delta P_n = 18 \text{ Вт}$ – без ВКРМ; $\Delta P_n = 22 \text{ Вт}$ – с ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 36\%$ – без ВКРМ;

- доля потерь от активной (номинальной) мощности ПЭД, $\delta P_n = 31\%$ – с ВКРМ;

- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,05\%$ – без ВКРМ;
- доля потерь мощности кратных гармоник к общим потерям, $\delta P_n = 0,07\%$ – с ВКРМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная модель электроснабжения куста нефтедобычи с хорошей точностью определяет значения параметров электрического режима и, в частности, на участке «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД», что хорошо согласуется с экспериментальными данными и техническими характеристиками используемых устройств.

Проведенное моделирование в цифровой среде Matlab/Simulink установившихся режимов работы погружных электродвигателей для различных коэффициентов мощности показало, что коэффициенты нелинейных искажений выходного напряжения K_U и тока K_I моделируемой СУ согласуются с техническими данными станций управления, представленных на рынке, в частности рассмотренной «Электрон-05 АВФ2» с частотой ШИМ 2,5 кГц.

Установка ВКРМ не вносит заметных искажений питающего напряжения в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД», а именно: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U и тока K_I остается ниже 5%, который определяется техническими условиями СУ. А значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U ВКРМ не превышает допустимых уровней, определенных ГОСТ 32144-2013.

При моделировании режима работы погружного электродвигателя с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,72$ сравнение результатов для $\cos\varphi = 0,84$ показывает, что установка ВКРМ незначительно изменяет коэффициенты искажения напряжения и тока, но их уровни не превышают 5%. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U на компенсаторе незначительно увеличивается, не превышая 5%, а коэффициент искажения синусоидальности кривой тока K_I увеличивается значительно – порядка 50%.

Также показано (без учета распределения температуры по длине КЛ), что на рассматриваемом участке установка внутрискважинного компенсирующего устройства (неуправляемого) снижает потери активной мощности на основной гармонике тока. Потери активной мощности от кратных гармоник (до 18-й гармоники включительно) незначительно увеличиваются, при этом доля потерь от кратных гармоник пренебрежимо мала (сотые доли процента от суммарных потерь) как при использовании компенсатора, так и без него.

Таким образом, устройство ВКРМ не ухудшает в целом показатели качества электроэнергии, связанные с несинусоидальностью питающего напряжения, в системе «промышленный трансформатор – КЛ – ПЭД»; наблюдается снижение потерь активной мощности как в случае с низким коэффициентом мощности, так и с номинальным значением, повышает энергоэффективность работы внутрискважинного электрооборудования.

Список источников

1. Невоструев В. А. Опыт эксплуатации энергоэффективных УЭЦН «Новомет» // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28–32.
2. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features // Electrical Submersible Pumps Manual. 2018. P. 55–152. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9>.
3. Якимов С. Б. Когда ПЭД с повышенным напряжением – основа стратегии. Нефтегазовая вертикаль. 2015. № 9. С. 19–22.
4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2016. 456 с.

References

1. Nevostruyev V. A. Opyt ekspluatatsii energoeffektivnykh UETSN “Novomet”. *Inzhenernaya praktika*. 2017;(8):28–32. (In Russ.).
2. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features. *Electrical Submersible Pumps Manual*. 2018:55–152. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9>.
3. Yakimov S. B. Kogda PED с povyshennym napryazheniem – osnova strategii. *Neftegazovaya vertical*. 2015;(9):19–22. (In Russ.).
4. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. *Kachestvo elektroenergii: Guidelines for Calculations*. Moscow: ENAS; 2016. 456 p. (In Russ.).

5. Czarnecki L. S., Bhattarai P. D. A Method of calculating LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017. Vol. 32, no. 2. P. 688–695. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2536681>.
6. Смирнов О. В., Копырин В. А. К вопросу об использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2015. № 2. С. 68–70.
7. Копырин В. А., Иордан В. А., Смирнов О. В. Внутрискважинная компенсация реактивной мощности // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2015. № 1. С. 29–32.
8. Копырин В. А., Гара Н. В., Портнягин А. Л. и др. Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности: патент 145053 Рос. Федерация № 2014116437; заявл. 23.04.2014; опубл. 10.09.2014. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38363331_65216958.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
9. Копырин В. А. Погружной компенсатор реактивной мощности: патент 159860 Рос. Федерация № 2015140690; заявл. 23.09.2015; опубл. 20.02.2016. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37564046_33904549.pdf (дата обращения: 10.10.2024).
10. Копырин В. А., Смирнов О. В. Оптимизация режимов потребления реактивной мощности установками электроцентробежных насосов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 4. С. 450–458.
11. Копырин В. А., Смирнов О. В., Портнягин А. Л. и др. Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 9. С. 117–124.
12. Копырин В. А., Лосев Ф. А. Исследование устойчивости погружного асинхронного электродвигателя при использовании внутрискважинного компенсатора // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 1. С. 390–398.
13. Копырин В. А., Хамитов Р. Н., Глазырин А. С. и др. Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 2. С. 166–175.
14. Karimjonov D. D. Research of asymmetrical and nonsinusoidal currents of asynchronous motor reactive power // *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023. Vol. 126. P. 345–351. <https://doi.org/10.15863/TAS>.
15. Majumder R., Saha D., Biswas P. et al. Modeling, simulation and FFT based dynamic performance analysis of three phase asynchronous // *International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering*. 2022. Vol. 9, no. 6. P. 7–11.
5. Czarnecki L. S., Bhattarai P. D. A Method of calculating LC parameters of balancing compensators for AC arc furnaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2017;32(2):688–695. <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2536681>.
6. Smirnov O. V., Kopyrin V. A. On the issue of using downhole reactive power compensators. *Oil and Gas Studies*. 2015;(2):68–70. (In Russ.).
7. Kopyrin V. A., Iordan V. A., Smirnov O. V. Downhole reactive power compensation. *Oil and Gas Studies*. 2015;(1):29–32. (In Russ.).
8. Kopyrin V. A., Gara N. V., Portnyagin A. L. et al. Downhole reactive power compensator: RU patent 145053 No. 2014116437; filed April 23, 2014; issued September 10, 2014. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_38363331_65216958.pdf (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
9. Kopyrin V. A. Submersible reactive power compensator: RU patent 159860 No. 2015140690; filed September 23, 2015; issued February 20, 2016. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_37564046_33904549.pdf (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
10. Kopyrin V. A., Smirnov O. V. Optimisation of reactive power consumption regimes by the electric centrifugal pumps installations. *Izvestiya Tula State University*. 2018;(4):450–458. (In Russ.).
11. Kopyrin V. A., Smirnov O. V., Portnyagin A. L. et al. Influence of downhole compensator on voltage drop in elements of a production well electrical system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):117–124. (In Russ.).
12. Kopyrin, V. A., Losev F. A. The stability research of the submersible asynchronous electric motor with downhole compensator. *Izvestiya Tula State University*. 2018;(1):390–398. (In Russ.).
13. Kopyrin V. A., Khamitov R. N., Glazyrin A. S. et al. Evaluation of total cost of possessing the electric centrifugal pump with submersible compensator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(2):166–175. (In Russ.).
14. Karimjonov D. D. Research of asymmetrical and nonsinusoidal currents of asynchronous motor reactive power. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023;126:345–351. <http://doi.org/10.15863/TAS>.
15. Majumder R., Saha D., Biswas P. et al. Modeling, simulation and FFT based dynamic performance analysis of three phase asynchronous machine. *International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering*. 2022;9(6):7–11.
16. Abdullaev A., Nasretdinova F., Yoldoshova M. et al. Power loss due to the effect of high harmonics in asynchronous engines. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2022;(12):1–5. <http://doi.org/10.32743/Uni-Tech.2022.105.12.14732>. (In Russ.).
17. Kumar S. J., Sreenivas G. N. Reduction of current harmonics using active power filters by instantaneous reactive power theory. *International Advanced Re-*

16. Abdullaev A., Nasretdinova F., Yoldoshova M. et al. Power loss due to the effect of high harmonics in asynchronous engines // *Universum: технические науки*. 2022. No. 12. P. 1–5. <http://doi.org/10.32743/Uni-Tech.2022.105.12.14732>.
17. Kumar S. J., Sreenivas G. N. Reduction of current harmonics using active power filters by instantaneous reactive power theory // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2022. Vol. 9, no. 2. P. 638–644. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2022.9296>.
18. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М. : ДМК Пресс, 2007. 288 с.
19. Ankit K. J., Gutta K. C., Vaddi A. K. Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013. Vol. 3, no. 4. P. 1–6.
20. Трансформаторы ТМГ 630 10(6)/0,4 кВ. Эл-кабтранс. URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tmg/tmg-630-10-6-0-4-kv/?oid=555> (дата обращения: 22.10.2024).
21. Станция управления Электон – 05. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.petromarkt.ru/userfls/files/elekton-05.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
22. IEEE Std 519 – 2014 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf (дата обращения: 22.10.2024).
23. Хакимьянов М. И. Исследование потерь мощности в кабеле скважинного погружного электродвигателя // *Электротехника*. 2018. № 2. С. 36–39.
- search *Journal in Science, Engineering and Technology*. 2022;9(2):638–644. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2022.9296>.
18. Chernykh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink. Moscow: DMKPress; 2007. 288 p. (In Russ.).
19. Ankit K. J., Gutta K. C., Vaddi A. K. Modeling and simulation of frequency converter used in speed control of asynchronous motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2013;3(4):1–6.
20. Transformatory TMG 630 10(6)/0,4 kV. Elkabtrans. URL: <https://elkabtrans.ru/catalog/tmg/tmg-630-10-6-0-4-kv/?oid=555> (accessed: 22.10.2024). (In Russ.).
21. Stantsiya upravleniya Elekton – 95. Manual, 2004. URL: <https://www.petromarkt.ru/userfls/files/elekton-05.pdf> (accessed: 10.10.2024). (In Russ.).
22. IEEE Std 519 – 2014 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf (accessed: 22.10.2024).
23. Khakimyanov M. I. Issledovanie poter moshchnosti v kabele skvazhinного погружного электродвигателя. *Elektrotehnika*. 2018;(2):36–39. (In Russ.).

Информация об авторах

Д. П. Антипин – старший преподаватель.
М. Е. Овчаренко – студент.
А. А. Заруднев – студент.

About the authors

D. P. Antipin – Senior Lecturer.
M. E. Ovcharenko – Student.
A. A. Zarudnev – Student.