

УДК 621.31, 622.276.054

## ОЦЕНКА СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

Копырин Владимир Анатольевич<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Хамитов Рустам Нуриманович<sup>2,1</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Глазырин Александр Савельевич<sup>3,4</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>3</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Раков Иван Витальевич<sup>5</sup>,  
rakovivan@live.com

Портнягин Алексей Леонидович<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

Маркова Анастасия Алексеевна<sup>1</sup>,  
aamarkova72@gmail.com

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>4</sup> Институт нефти и газа Югорского государственного университета,  
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

<sup>5</sup> ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания»,  
Россия, 634040, г. Томск, ул. Высоцкого, 33.

**Актуальность.** На сегодняшний день добыча нефти, как правило, осуществляется механизированным способом, который является достаточно энергоемким. В структуре себестоимости добычи нефти на стоимость электроэнергии приходится от 30 до 35 % затрат. Если учесть, что добыча нефти погружными установками не обходится без потерь мощности, которые составляют от 20 до 40 % от потребляемой электроэнергии, то технологии повышения энергоэффективности добычи обладают большим потенциалом внедрения. Одним из перспективных направлений уменьшения потребления электроэнергии погружными установками является технология внутрискважинной компенсации реактивной мощности. С одной стороны, внедрение внутрискважинных компенсаторов приводит к увеличению затрат на закупку, обслуживание, мобилизацию или прокат погружной установки. С другой стороны, использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению затрат на электроэнергию и повышению эффективности производства. Применение внутрискважинных компенсаторов позволяет уменьшить потери активной мощности в системе передачи электроэнергии погружной установки за счет снижения реактивной составляющей тока погружного электродвигателя. Тем не менее, при разных технических характеристиках оборудования погружной установки эффект от применения внутрискважинного компенсатора будет отличаться. В связи с этим, следует исключить ситуации, когда затраты на внедрение внутрискважинных компенсаторов будут выше положительного эффекта от внедрения. Возникает необходимость определения совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

**Цель:** провести анализ снижения текущих затрат на электроэнергию при использовании установок электроцентробежных насосов с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

**Объект:** участок системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежного насоса.

**Методы:** законы теоретических основ электротехники, теории электропривода, методы имитационного моделирования и технико-экономического обоснования. Имитационное моделирование участка системы электроснабжения куста скважин выполнено в программном комплексе MatLab Simulink.

**Результаты.** Описана методика расчета совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором. Имитационная модель участка системы электроснабжения куста скважин построена в программном комплексе MatLab Simulink. Установлено, что использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению затрат на электроэнергию при владении погружной установкой. Максимальное снижение затрат на электроэнергию на одной из исследуемых погружных установок составило 303,6 тыс. р. в год.

### Ключевые слова:

Погружной электроцентробежный насос, совокупная стоимость владения, электроэнергия, внутрискважинный компенсатор, имитационная модель, погружной электродвигатель.

### Введение

В настоящее время нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность является одним из

центров по внедрению инновационного оборудования, к которому относятся внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности (ВКРМ). Тем не менее

использование нового оборудования, а также усовершенствование существующего технологического процесса не обходится без изменения схемы электропитания объекта. В свою очередь, изменение схемы электропитания может привести к перераспределению потерь мощности в питающих линиях. Согласно ГОСТ 32144-2013 основными показателями качества электрической энергии являются: отклонение частоты; медленные изменения напряжения; колебания напряжения и фликер; несинусоидальность напряжения; несимметрия напряжений в трехфазных системах; прерывание напряжения; провалы напряжения и перенапряжения и другие факторы [1–3].

Одним из основных факторов наряду с потребляемой активной мощностью и напряжением потребителя электрической энергии является его коэффициент мощности, характеризующий эффективность передачи и потребления электрической энергии [4]. В связи с этим определение оптимальной мощности устройств компенсации реактивной мощности в сопоставлении с их стоимостью, транспортировкой, затратами на обслуживание и положительным эффектом от их применения является важной задачей [5–8].

На сегодняшний день основными потребителями реактивной мощности на нефтедобывающих объектах, использующих механизированный способ добычи, являются асинхронные электродвигатели приводов штанговых, плунжерных, лопастных, винтовых, центробежных и других типов насосов. Известно, что коэффициент мощности данного типа электродвигателей находится в пределах от 0,8 до 0,85 о.е. в номинальном режиме эксплуатации [9–12].

Если коэффициент мощности потребителя электрической энергии (в нашем случае асинхронного электродвигателя) принять равным 0,8 от полной мощности, то доля потребляемой реактивной мощности составит 0,6 от полной мощности, которую необходимо передать от источника питания (автономного или централизованного) до потребителя. Генерация реактивной мощности на электростанциях дешевле, чем ее выработка с помощью компенсирующих устройств непосредственно в узлах нагрузки [6]. Тем не менее из-за отдаленности нефтяных месторождений стоимость ее передачи от электростанции до потребителей может в несколько раз превышать затраты на установку компенсирующих устройств. Кроме того, в большинстве случаев технически невозможно передать реактивную мощность от электростанции до потребителей из-за недопустимого снижения напряжения в электрической сети.

Исследованием проблемы повышения коэффициента мощности систем электропитания нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих объектов занимались многие ученые и промышленные работники, среди которых: Б.Н. Абрамович, В.А. Веников, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Р.С. Камалетдинов, И.Н. Ковалев, А.В. Кузнецов, А.Б. Лоскутов, В.Г. Пекелис, Б.С. Рогальский и многие другие. Однако, несмотря на актуальность проблемы повышения коэффициента мощности нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих объектов, она решается медленно, в связи с

внедрением новых специфических электроприемников с нестандартными электрическими параметрами.

По способу подключения компенсирующих устройств выделяют индивидуальную [9, 13], групповую [14–16] и централизованную компенсацию [17, 18]. На нефтедобывающих месторождениях, как правило, применяется групповая компенсация реактивной мощности. При данном типе компенсации компенсирующее устройство (КУ) подключается к шине комплектной трансформаторной подстанции. Мощность КУ выбирается исходя из мощности группы электроприемников, их группового и требуемого коэффициента мощности. Использование данного способа компенсации реактивной мощности позволяет уменьшить потери в линиях электропередачи от ответвительной электрической подстанции до комплектно-трансформаторной подстанции, расположенной на кусте нефтяных скважин. Однако участок электрической сети от комплектной трансформаторной подстанции до потребителя остается «загруженным» реактивными токами, что приводит к дополнительным потерям мощности в кабельных линиях.

В работах [9, 11, 19] для увеличения передаваемой мощности и снижения потерь в достаточно протяженных кабельных линиях, питающих погружное технологическое оборудование, предлагается использовать индуктивные или емкостные индивидуальные компенсирующие устройства. Индуктивные КУ могут быть выполнены в виде резонансных фильтров, настроенных на основную гармонику и предназначенных для эксплуатации в погружных установках с повышенной частотой напряжения питания [19]. Емкостные КУ, или внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности, конструктивно представляют собой герметичный корпус, внутри которого установлены батареи конденсаторов и устройства защиты. ВКРМ предназначены для компенсации индуктивной составляющей тока погружного электродвигателя. Предложенные авторами методики позволяют определить оптимальные параметры компенсирующего устройства с учетом технических характеристик погружного оборудования, длины и сечения кабельной линии, нормативного коэффициента эффективности капиталовложений и амортизации оборудования [20]. Согласно исследованиям, положительный экономический эффект от внедрения ВКРМ достигается в погружных установках, оснащенных электродвигателями свыше 90 кВт и кабельной линии длиной более 1500 м. Срок окупаемости внутрискважинных компенсаторов варьируется от 6 до 12 месяцев, в зависимости от технических характеристик погружной установки.

Тем не менее вопрос об определении совокупной стоимости владения погружными установками, оснащенными внутрискважинными компенсаторами, остается открытым, что определяет актуальность данного исследования.

#### Теория

На сегодняшний день владение погружным оборудованием для добычи нефти, как правило, осуществляется двумя способами:

- приобретение нефтяной компанией и обслужива- ние сервисным подразделением;
- обслуживание по схеме «сутко-прокат».

В первом случае нефтяная компания приобретает погружную установку. Во втором случае оборудова- ние принадлежит сервисной компании и передается во временное владение и пользование нефтяной ком- пании.

Рассмотрим установку электроцентробежного насоса (УЭЦН) с внутрискважинным компенсатором. Величина совокупной стоимости владения УЭЦН, приобретенной предприятием и обслуживаемой сер- висным подразделением, складывается из затрат на закупку оборудования, обслуживание, мобилизацию и проведение спускоподъемных операций, вызванных отказами оборудования. Также в совокупную стои- мость владения УЭЦН входят затраты на электро- энергию, потребляемую оборудованием. Совокупная стоимость владения УЭЦН за расчетный период в первом случае определяется следующим образом [21]:

$$ССВ_3 = Z_{\text{закуп}} + Z_{\text{обсл}} + Z_{\text{моб}} + Z_{\text{э/э}} + Z_{\text{СПО}}, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{закуп}}$  – стоимость оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{обсл}}$  – за- траты на обслуживание оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{моб}}$  – затраты на мобилизацию оборудования, тыс. р.;  $Z_{\text{э/э}}$  – затраты на электроэнергию, тыс. р.;  $Z_{\text{СПО}}$  – затраты на спускоподъемные операции, тыс. р.

Во втором случае вместо затрат на закупку и об- служивание оборудования учитываются затраты на его прокат:

$$ССВ_п = Z_{\text{прокат}} + Z_{\text{моб}} + Z_{\text{э/э}} + Z_{\text{СПО}}, \quad (2)$$

где  $Z_{\text{прокат}}$  – затраты на прокат оборудования, тыс. р.

Затраты на закупку оборудования, определяются по выражению:

$$Z_{\text{закуп}} = (Z_{\text{УЭЦН}} \cdot N_a + Z_{\text{СУ}} \cdot N'_a) \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{УЭЦН}}$ ,  $Z_{\text{СУ}}$  – стоимость комплекта УЭЦН и стан- ции управления соответственно, тыс. р.;  $N_a$ ,  $N'_a$  – норма амортизации УЭЦН и станции управления со- ответственно, год<sup>-1</sup>;  $t_p$  – расчетный период использо- вания оборудования, лет.

Затраты на обслуживание оборудования опреде- ляются по выражению:

$$Z_{\text{обсл}} = 365 \cdot Z_{\text{обсл.сут}} \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{обсл.сут}}$  – стоимость затрат на промышленное об- служивание за одни сутки, тыс. р./сут.

Затраты на владение УЭЦН по схеме «сутко- прокат» определяются по выражению:

$$Z_{\text{прокат}} = 365 \cdot Z_{\text{прокат.сут}} \cdot t_p,$$

где  $Z_{\text{прокат.сут}}$  – стоимость «сутко-проката» за одни сутки, тыс. р./сут.

Затраты на мобилизацию оборудования определя- ются по выражению:

$$Z_{\text{моб}} = 365 \cdot \frac{Z_{\text{ед.моб}}}{\text{ННО}},$$

где  $Z_{\text{ед.моб}}$  – средняя стоимость мобилизации оборудо- вания конкретного производителя, тыс. р.; ННО – наработка на отказ оборудования, сут.

Если затраты на мобилизацию учтены в стоимости закупки, проката или обслуживания оборудования, то их можно не учитывать в выражениях (1) и (2).

Затраты на электроэнергию за расчетный период определяются по выражению:

$$Z_{\text{э/э}} = P_{\Sigma} \cdot c \cdot N \cdot t_p,$$

где  $P_{\Sigma}$  – активная мощность, потребляемая УЭЦН, кВт;  $c$  – тариф на электроэнергию, р./кВт·ч;  $N$  – коли- чество рабочих часов в году,  $N = 8760$  ч.

Активная мощность, потребляемая УЭЦН, опре- деляется мощностью, потребляемой погружным элек- тродвигателем, и потерями в системе передачи элек- троэнергии погружной установки [22]:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ПЭД}} + \sum \Delta P = P_{\text{ПЭД}} + \Delta P_{\text{ВКРМ}} + \Delta P_{\text{КЛ}} + \Delta P_{\text{ТР}} + \Delta P_{\text{СУ}} + \Delta P_{\text{СФ}} + \Delta P_{\text{ВФ}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ПЭД}}$  – активная мощность, потребляемая погруж- ным электродвигателем, кВт;  $\sum \Delta P$  – сумма потерь ак- тивной мощности в системе передачи электроэнергии погружной установки, кВт;  $\Delta P_{\text{ВКРМ}}$ ,  $\Delta P_{\text{КЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ТР}}$ ,  $\Delta P_{\text{СУ}}$ ,  $\Delta P_{\text{СФ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ВФ}}$  – потери активной мощности во внутрис- кважинном компенсаторе, кабельной линии, питаю- щем трансформаторе, станции управления, сетевом и выходном фильтре, соответственно, кВт.

При отсутствии одного из элементов в электротехни- ческом комплексе УЭЦН величину потерь, соответ- ствующую данному элементу, необходимо исключить из выражения (3). Потери активной мощности во внут- рискважинном компенсаторе, сетевом и выходном фильтрах в основном зависят от потерь мощности в конденсаторных батареях и в антирезонансных дроссе- лях, при их наличии. Потери активной мощности в со- временных косинусных конденсаторах не превышают 0,5 Вт на 1000 ВАр, поэтому их можно не учитывать. Принятое допущение незначительно повлияет на точ- ность определения стоимости владения УЭЦН. Потери активной мощности в кабельной линии определяются ее конструктивными характеристиками, температурой экс- плуатации и током погружного электродвигателя:

$$\Delta P_{\text{КЛ}} = 3 \cdot I_{\text{ПЭД}}^2 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot \frac{L_{\text{КЛ}}}{S_{\text{КЛ}}} \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 20)],$$

где  $I_{\text{ПЭД}}$  – ток погружного электродвигателя, А;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $L_{\text{КЛ}}$  – длина кабельной линии, км;  $S_{\text{КЛ}}$  – сечение токопрово- дящей жилы кабельной линии, мм<sup>2</sup>;  $T$  – температура токопроводящих жил кабеля, °С.

В свою очередь, номинальный ток погружного электродвигателя определяется номинальной мощно- стью и напряжением, коэффициентом полезного дей- ствия и коэффициентом мощности:

$$I_{\text{ПЭД,ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}},$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность на валу погружного электродвигателя, кВт;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение погружного электродвигателя, В;  $\eta_{ном}$ ,  $\cos\varphi_{ном}$  – номинальный коэффициент полезного действия и коэффициент мощности соответственно.

Потери активной мощности в питающем трансформаторе определяются по выражению:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} \cdot \left( \frac{S}{S_{ном}} \right)^2,$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода питающего трансформатора, кВт;  $\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания питающего трансформатора, кВт;  $S$ ,  $S_{ном}$  – полная мощность нагрузки и номинальная мощность питающего трансформатора соответственно, кВА.

Очевидно, что чем выше коэффициент мощности погружного электродвигателя и чем меньше полная мощность нагрузки, тем меньше затраты на электроэнергию. В связи с этим в нефтедобывающей отрасли наблюдается тенденция к использованию оборудования и технологии, позволяющих повысить коэффициент мощности. Одной из таких технологий является внутрискважинная компенсация реактивной мощности.

Затраты на спускоподъемные операции определяются средними затратами данной операции и количеством отказов оборудования:

$$Z_{СПО} = \frac{365 \cdot Z_{раб} \cdot t_{СПО} \cdot t_p}{ННО},$$

где  $Z_{раб}$  – средняя стоимость часа работы бригады текущего и капитального ремонта скважин, тыс. р./ч;  $t_{СПО}$  – продолжительность спускоподъемных операций, час.

Существуют различные методики определения наработки на отказ скважинного насосного оборудования. Согласно рекомендациям Экспертного совета по механизированной добыче нефти расчет наработки на отказ производится за скользящий год, а также за текущий месяц (за 30 или 31 день с начала анализируемого периода) и определяется по выражению:

$$ННО = \frac{T_{ННО}}{n},$$

где  $T_{ННО}$  – суммарное отработанное время скважинного насосного оборудования, сут.;  $n$  – количество отказов скважинного насосного оборудования за отчетный период, ед.

### Результаты моделирования

При использовании внутрискважинных компенсаторов в составе УЭЦН происходит увеличение затрат на закупку оборудования  $Z_{закуп}$  или на его прокат  $Z_{прокат}$ , величина которых зависит от договорных отношений между заказчиком и заводом-изготовителем оборудования для добычи нефти. В то же время оснащение УЭЦН внутрискважинными компенсаторами приводит к снижению затрат на электроэнергию  $Z_{3/3}$  за счет снижения токовой нагрузки электродвигателя. Произведем оценку снижения затрат на электроэнер-

гию  $Z_{3/3}$  при использовании ВКРМ. В качестве расчетного периода использования оборудования прием интервал в 1 год.

Рассмотрим участок системы электроснабжения куста скважин, оборудованных УЭЦН в количестве 4 единиц. Питание отдельной УЭЦН осуществляется от понижающей комплектной трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ посредством кабеля марки КПБП и питающего трансформатора марки ТМПН-100/3 мощностью 100 кВА. Оптимальную мощность внутрискважинного компенсатора предлагается определить по методике, изложенной в [20]. Исходные и расчетные параметры УЭЦН приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры установки электроцентробежного насоса

Table 1. Parameters of electric centrifugal pump

Номер УЭЦН ESP number	Тип двигателя Engine type	Номинальная мощность ВКРМ, кВАР Nominal power SRPC*, kVar	Длина кабельной линии, м Cable line length, m	Сечение кабельной линии, мм <sup>2</sup> Cable section, mm <sup>2</sup>	Активное сопротивление кабельной линии при 70 °С, Ом Active resistance of the cable line at 70 °C, Ohm
1	2ЭД-63-117	41,0	2500	16	3,23
2	2ЭД-63-117	41,0	2600	16	3,35
3	2ЭД-70-117	45,5	2700	16	3,48
4	2ЭД-70-117	45,5	2600	16	3,35

\*SRPC – submersible reactive power compensator.

Таблица 2. Параметры модели погружного асинхронного электродвигателя

Table 2. Parameters of the submersible induction motor model

Параметр Parameter	Значение/Value	
	2ЭД-63-117 2ED-63-117	2ЭД-70-117 2ED-70-117
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	1040	1190
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	88757	103550
Активное сопротивление обмотки статора, Ом Active resistance of the stator winding, Ohm	1,0	1,35
Индуктивность обмотки статора, мГн Inductance of the stator winding, mH	3,17	4,3
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом Reduced active resistance of the rotor winding, Ohm	0,676	1,0
Приведенная индуктивность обмотки ротора, мГн Reduced inductance of the rotor winding, mH	3,17	4,3
Индуктивность контура намагничивания, мГн Inductance of the magnetization circuit, mH	67,0	70,0
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup> Moment of rotor inertia, kg·m <sup>2</sup>	0,46	0,46
Коэффициент трения, Н·м·с Friction coefficient, N·m·s	0,022	0,04

Исследование энергетических и силовых показателей электротехнического комплекса УЭЦН выполнено в программном комплексе *MatLab Simulink*. В качестве модели погружного асинхронного электродвигателя принят блок «*asynchronous machinesquirrel cage*» библиотеки электротехнических устройств *SimPowerSystem*. Параметры модели рассматриваемых погружных электродвигателей 2ЭД-63-117 [23] и 2ЭД-70-117 [24] приведены в табл. 2.

В работах [23, 24] авторами проведена верификация моделей рассматриваемых погружных электродвигателей с результатами стендовых испытаний. Установлено, что относительная погрешность полученных электрохимических характеристик на модели в номинальном режиме не превышает 5 %. Следовательно, принятые модели удовлетворяют требованию адекватности отображаемых характеристик.

В *MatLab Simulink* блок «*three-phase transformer (two windings)*» (трехфазный двух обмоточный трансформатор) описывается классической Т-образной схемой замещения. За базисные величины рассматриваемого трансформатора марки ТМПН-100/3 принимаются номинальные напряжения первичной обмотки 380 В и вторичной обмотки 1250 В, номинальная мощность 100 кВА и частота 50 Гц. Активное сопротивление первичной и приведенное сопротивление вторичной обмоток принимаются 0,00985 о.е. Индуктивность первичной и приведенная индуктивность вторичной обмоток принимаются 0,0255 о.е. Активное сопротивление контура намагничивания – 337 о.е. Индуктивность, учитывающая реактивные потери в сердечнике, – 52 о.е. Выбор отпайки питающего трансформатора (напряжение вторичной обмотки) производился из условия поддержания напряжения на погружном электродвигателе близким к номинальному значению с учетом падения напряжения в кабельной линии и вторичной обмотке трансформатора.

**Таблица 3.** Затраты на электроэнергию

**Table 3.** Electricity costs

Номер УЭЦН ESP number	Активная мощность, кВт Active power, kW		Коэффициент мощности Power factor		Ток, А Current, A		Затраты на электроэнергию $Z_{э/э}$ , тыс. р. Electricity costs $C_{el}$ , thousand rub.	
	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC	ВКРМ SRPC	Без ВКРМ Without SRPC
1	94,3	103,7	0,98	0,88	146,3	178,2	2891,2	3179,4
2	95,5	105,4	0,98	0,89	148,2	180,0	2928,0	3231,6
3	97,8	107,0	0,98	0,87	152,1	186,0	2998,5	3280,6
4	96,2	105,7	0,98	0,87	150,6	184,8	2949,5	3240,8

При определении затрат на электроэнергию  $Z_{э/э}$  принят тариф 3,5 р./кВт·ч.

Анализ данных табл. 3 показал, что при использовании внутрискважинных компенсаторов наблюдается снижение затрат на электроэнергию. Снижение затрат на исследуемой УЭЦН под номером 1 составило 288,2 тыс. р., на УЭЦН под номером 3 – 282,1 тыс. р., на УЭЦН под номером 4 – 291,3 тыс. р. Максимальное снижение затрат на электроэнергию составило 303,6 тыс. р. в год для установки электроцентробежного насоса под номером 2.

Погонная продольная индуктивность кабеля марки КТБП принята 0,24 мГн/км, погонная емкость – 0,1 мкФ/км. Современные кабели для установок погружных электронасосов, выпускаемые отечественными и зарубежными производителями, обладают высоким электрическим сопротивлением изоляции. В зависимости от температурного исполнения пересчитанное на 1 км длины кабеля сопротивление изоляции должно составлять не менее 15 МОм, а ток утечки, замеренный в конце испытания напряжением и пересчитанный на 1 км длины при температуре 20 °С, не должен превышать 50 мА. Так как активное сопротивление токопроводящей жилы 1 км кабеля достаточно мало по сравнению с сопротивлением изоляции, то последнее можно не учитывать. Принятое допущение незначительно повлияет на результаты моделирования.

Имитационная модель рассматриваемого участка системы электроснабжения куста скважин приведена на рис. 1.

Механическая характеристика момента насосной нагрузки на валу погружного электродвигателя описывается выражением [25]:

$$M_c = M_0 + (M_0 - M_{ном}) \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_0 \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - H_c}{H_0 - H_c}},$$

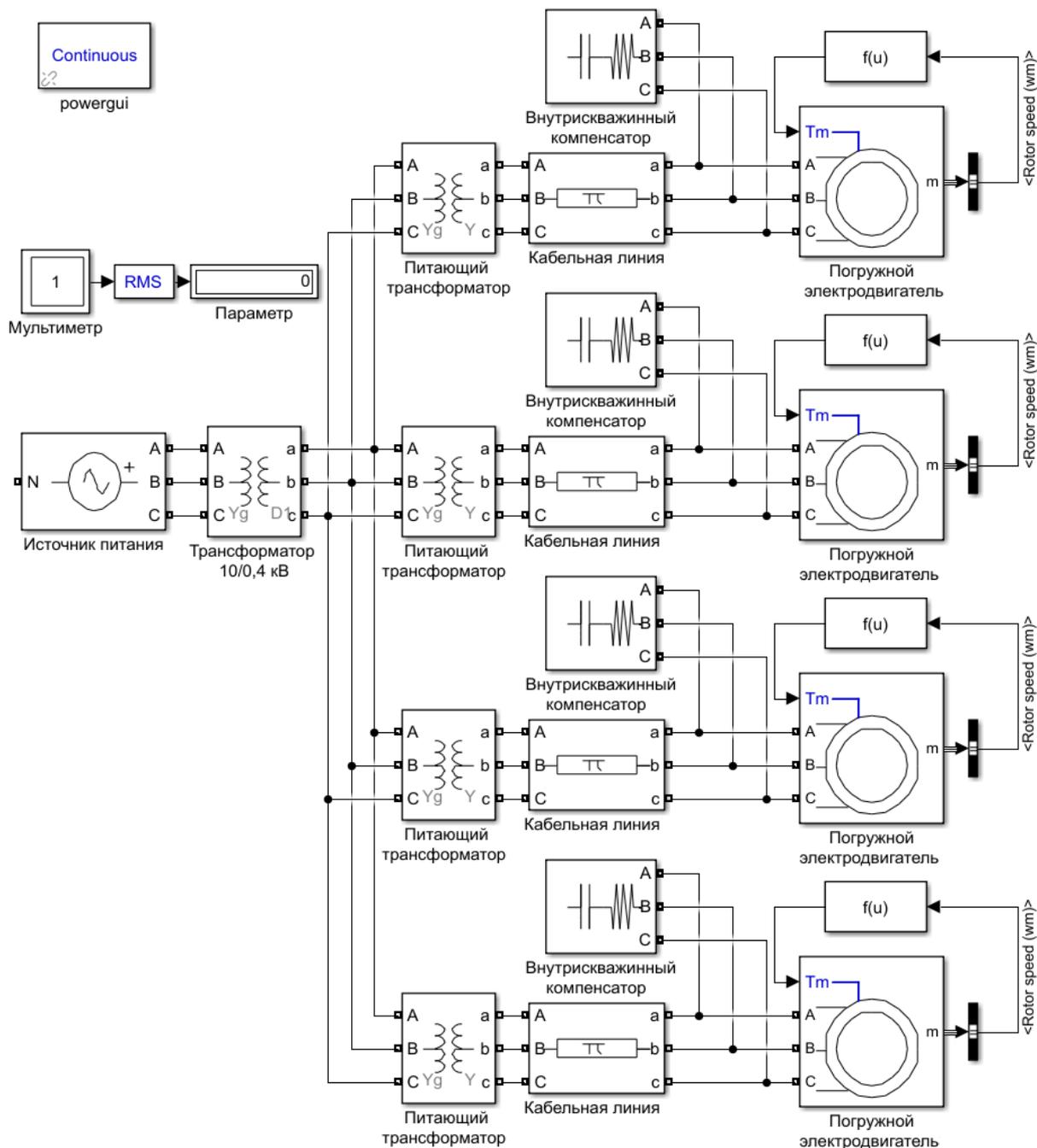
где  $M_0$  – момент холостого хода, Н·м;  $M_{ном}$  – момент сопротивления при номинальной нагрузке, Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вала центробежного насоса, рад/с;  $\omega_{ном}$  – номинальная угловая скорость вала центробежного насоса, рад/с;  $H_0$  – напор насоса при нулевой подаче, м;  $H_c$  – статический напор, м.

Результаты моделирования при коэффициенте загрузки погружных электродвигателей равном 100 % приведены в табл. 3.

Стоит отметить, что при использовании ВКРМ отсутствует необходимость в установке и подключении компенсирующих устройств к шинам комплектной трансформаторной подстанции. Дополнительный экономический эффект определяется по выражению:

$$Z_{КУ} = Z_{КУ.закуп} + Z_{КУ.обсл} + Z_{КУ.моб},$$

где  $Z_{КУ.закуп}$  – затраты на закупку компенсирующих устройств, тыс. р.;  $Z_{КУ.обсл}$  – затраты на обслуживание компенсирующих устройств, тыс. р.;  $Z_{КУ.моб}$  – затраты на мобилизацию компенсирующих устройств, тыс. р.



**Рис. 1.** Имитационная модель участка системы электроснабжения куста скважин:  $f(u)$  – блок задания функции, имитирующий работу электроцентробежного насоса

**Fig. 1.** Simulation model of the section of power supply system cluster of oil wells:  $f(u)$  – function setting block, imitating electrocentrifugal pump operation

### Выводы

1. Обоснована перспективность и экономическая целесообразность внедрения внутрискважинных компенсаторов в составе установок электроцентробежных насосов на нефтедобывающих скважинах.
2. Разработана методика расчета совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором.

3. Разработана в программном комплексе MatLab Simulink имитационная модель участка системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежных насосов с внутрискважинными компенсаторами. В ходе имитационного моделирования определены энергетические и силовые показатели. Максимальное снижение затрат на электроэнергию при использовании внутрискважинных компенсаторов составило 9,4 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
- Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes / V.Z. Kovalev, O.V. Arhipova, S.S. Esin, A.A. Tatevosyan, A.G. Scherbakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1260. – № 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
- Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment / E.A. Godovnikov, E.G. Andreeva, V.Z. Kovalev, R.T. Usmanov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1260. – № 052007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052007.
- Willems J.L. Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal and polyphase situations. – IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – Iss. 2. – P. 835–840. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.823182.
- Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- Кубарьков Ю.П., Голубева К.А., Макаров Я.В. Выбор мощности компенсирующих устройств для оптимизации уровней потерь в электрической сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2016. – № 4 (52). – С. 77–82.
- Kuchanskyy V., Malakhatka D., Ihor B. Application of reactive power compensation devices for increasing efficiency of bulk electrical power systems // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160072.
- Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т.В. Табачникова, Р.И. Гарифуллин, Э.Д. Нурбосынов, А.В. Махт // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 44–46.
- Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features // Electrical Submersible Pumps Manual. – 2018. – P. 55–152. DOI: 10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9.
- Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины / В.А. Копырин, О.В. Смирнов, А.В. Портнягин, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 117–124.
- Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
- Mathematical modeling start-up and steady state modes of asynchronous motors operation with capacitive compensation of reactive power / V. Malyar, O. Namola, V. Maday, I. Vasylychshyn // Przegląd Elektrotechniczny. – 2020. – V. 96. – Iss. 11. – P. 109–114. DOI: 10.15199/48.2020.11.22.
- Large synchronous motors as drivers for centrifugal compressors in lng liquefaction plants / D. Ristanovic, M. Taher, T. Getschmann, N. Bhatia // 2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC). – Vancouver, BC, Canada, 9–12 September 2019. DOI: 10.1109/PCIC30934.2019.9074535.
- Okhrimenko V., Glebova M. Methodology calculation for reactive power compensation in industrial enterprises // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. – 2020. – V. 15. – Iss. 4. – P. 465–471. DOI: 10.18280/ijdne.150402.
- Sayenko Y., Baranenko T., Kalyuzhnyi D. Compensation of reactive power in electrical supply systems of large industrial enterprises // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – V. 91. – Iss. 11. – P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2015.11.22.
- An index for determination and manipulation of steady state voltage stability of transmission and distribution infrastructures / B.A. Bhatti, R. Broadwater, M. Dilek, A. Tbaileh // 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). – Chicago, IL, USA, 12–15 October 2020. DOI: 10.1109/TD39804.2020.9299938.
- Theoretical and practical studies of electrical systems operation modes at reactive power compensation / I. Khomenko, M. Piskurevy, O. Plakhtii, I. Stasiuk, N. Karpenko, V. Nerubatskyi // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263225.
- Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 114–123.
- Determination of the downhole compensator's optimal power considering the cable line's length and cross section / V.A. Kopyrin, M.V. Deneko, E.A. Engel, R.N. Khamitov // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – Omsk, Russia, 10–12 November 2020. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.
- Ganesh K., Mohapatra S. Enterprise resource planning: fundamentals of design and implementation. – Springer, 2014. – 174 p.
- Семисынов Р.А., Киселев Е.С., Хакимянов М.И. Анализ потерь энергии в технологических элементах установок скважинных нефтедобывающих насосов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 6. – С. 179–198.
- Копырин В.А., Смирнов О.В., Денек М.В. Simulation modeling of the submersible asynchronous motor's operation modes // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 3–7 October 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.
- Performance characteristics' study of a submersible electric motor based on the bench tests results / V.A. Kopyrin, R.N. Khamitov, L.V. Shakhova, S.O. Chashchin, M.V. Deneko // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – V. 1546. – № 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012047.
- Ершов М.С., Егоров А.В., Трифионов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. – М.: ИД «Недра», 2010. – 319 с.

Поступила 08.02.2021 г.

## Информация об авторах

**Копырин В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Хамитов Р.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Раков И.В.**, инженер-проектировщик АСУ ТП, ООО Научно-производственное предприятие «Томская электронная компания».

**Портнягин А.Л.**, кандидат технических наук, директор Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

**Маркова А.А.**, магистрант кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.31, 622.276.054

## EVALUATION OF TOTAL COST OF POSSESSING THE ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP WITH SUBMERSIBLE COMPENSATOR

Vladimir A. Kopyrin<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Rustam N. Khamitov<sup>2,1</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Alexander S. Glazyrin<sup>3,4</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Sergey N. Kladiev<sup>3</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Ivan V. Rakov<sup>5</sup>,  
rakovivan@live.com

Aleksei L. Portnyagin<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

Anastasia A. Markova<sup>1</sup>,  
aamarkova72@gmail.com

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>4</sup> Yugra State University,  
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

<sup>5</sup> Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company», Ltd.,  
33, Vysotsky street, Tomsk, 634040.

**The relevance.** Today, the production of oil is generally carried out in a mechanized manner, which is sufficiently energy intensive. In the cost structure of oil production, the value of electric power is from 30 to 35 % of the value. Considering that the submersible plants oil production is impossible without loss of power that is 20 to 40 % power consumption, the technology to increase the energy efficiency oil production has a high potential of embedding. One of the promising directions of electric power consumption reduction by submersible installations is the technology of submersible compensation. On the one hand, the introduction of the submersible compensator results in increase of the cost of purchase, maintenance, mobilization or hire of the submersible plant. On the other hand, the use of submersible compensator reactive power results in reduction of the cost of electric power and increase in production efficiency. The use of submersible compensators makes it possible to reduce the loss of active power in the power transmission system of the submersible installation by reducing the reactive component of the current submersible motor. However, with different technical characteristics of the submersible installation equipment, the effect of the submersible compensator will be different. In this relation, it should be avoided that the cost of introduction of the submersible compensators will be higher than the positive effect of introduction. It is necessary to determine the aggregate cost of possession of an electric centrifugal pump installation with a submersible compensator reactive power.

**The aim** of the research is to analyze the reduction of current electric power consumption with the use of the installations electric centrifugal pumps with the submersible compensator reactive power.

**The object:** portion of the power supply system of a cluster oil producing wells equipped with installations electric centrifugal pump.

**Methods:** laws of electrical engineering theory, electric drive theory, simulation methods and technical-economic rationale. Imitation modeling of a portion of the power supply system of the well cluster is performed in a Software Complex of MatLab Simulink.

**Result.** The paper describes the method of calculation of aggregate cost of possession of electric centrifugal pump with submersible compensator. The software model of the section power supply system of the well cluster is built in the MATLAB Simulink. It was found that the use of submersible compensators results in reduction in power consumption at the ownership of a submerged installation. The maximum reduction in power consumption on one of the test submersible units was 303,6 thousand rubles in year.

### Key words:

Submersible electric centrifugal pump, total cost of ownership, electrical energy, submersible compensator, simulation model, submersible electric motor.

### REFERENCES

1. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [State Standart 32144–2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply system's]. Moscow, StandardInform Publ., 2014. 19 p.
2. Kovalev V.Z., Arhipova O.V., Esin S.S., Tatevosyan A.A., Scherbakov A.G. Identification of mathematical models parameters of electromechanical consumers of regionally isolated electrotechnical complexes. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1260, no. 052014. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052014.
3. Godovnikov E.A., Andreeva E.G., Kovalev V.Z., Usmanov R.T. Identification of parameters of power circuits pulse energy conversion systems of electromechanical equipment. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2019, vol. 1260, no. 052007. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052007.
4. Willems J.L. Reflections on apparent power and power factor in nonsinusoidal and polyphase situations. *IEEE Transactions on*

- Power Delivery*, 2004, vol. 19, Iss. 2, pp. 835–840. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.823182.
5. Zhezhenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol na promyshlennyykh predpriyatiyakh* [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
  6. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
  7. Kubarkov Yu.P., Golubeva K.A., Makarov Ya.V. Vybor moshchnosti kompensiruyushchikh ustroystv dlya optimizatsii urovney poter v elektricheskoy seti [The choice of the power of compensating devices to optimize the levels of losses in the electrical network]. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences*, 2016, no. 4 (52), pp. 77–82.
  8. Kuchanskyy V., Malakhatka D., Ihor B. Application of reactive power compensation devices for increasing efficiency of bulk electrical power systems. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160072.
  9. Tabachnikova T.V., Garifullin R.I., Nurbosynov E.D., Macht A.V. Individualnaya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa dobyvayushchey skvazhiny s elektrosentrobezhnym nasosom [Individual compensation of the reactive power of the electrical complex of a producing well with an electric centrifugal pump]. *Prom energy*, 2015, no. 2, pp. 44–46.
  10. Takacs G. Electrical submersible pump components and their operational features. *Electrical Submersible Pumps Manual*, 2018, pp. 55–152. DOI:10.1016/b978-0-12-814570-8.00003-9.
  11. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.V., Khamitov R.N. The influence of the downhole compensator on the voltage drop in the elements of the production well's electrical system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 117–124. In Rus.
  12. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
  13. Malyar V., Hamola O., Maday V., Vasylyshyn I. Mathematical modeling start-up and steady state modes of asynchronous motors operation with capacitive compensation of reactive power. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2020, vol. 96, Iss. 11, pp. 109–114. DOI: 10.15199/48.2020.11.22.
  14. Ristanovic D., Taher M., Getschmann T., Bhatia N. Large synchronous motors as drivers for centrifugal compressors in lng liquefaction plants. *2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*. Vancouver, BC, Canada, 9–12 September 2019. DOI: 10.1109/PCIC30934.2019.9074535.
  15. Okhrimenko V., Glebova M. Methodology calculation for reactive power compensation in industrial enterprises. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 2020, vol. 15, Iss. 4, pp. 465–471. DOI: 10.18280/ijdne.150402.
  16. Sayenko Y., Baranenko T., Kalyuzhnyi D. Compensation of reactive power in electrical supply systems of large industrial enterprises. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2015, vol. 91, Iss. 11, pp. 77–80. DOI: 10.15199/48.2015.11.22.
  17. Bhatti B.A., Broadwater R., Dilek M., Tbaileh A. An index for determination and manipulation of steady state voltage stability of transmission and distribution infrastructures. *2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. Chicago, IL, USA, 12–15 October 2020. DOI: 10.1109/TD39804.2020.9299938.
  18. Khomenko I., Piskurevy M., Plakhtii O., Stasiuk I., Karpenko N., Nerubatskyi V. Theoretical and practical studies of electrical systems operation modes at reactive power compensation. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263225.
  19. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Nonlinear power supply model of submersible objects based on change in the cable-rope length. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 114–123. In Rus.
  20. Kopyrin V.A., Deneko M.V., Engel E.A., Khamitov R.N. Determination of the downhole compensator's optimal power considering the cable line's length and cross section. *2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk, Russia, 10–12 November 2020. DOI: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.
  21. Ganesh K., Mohapatra S. *Enterprise resource planning: fundamentals of design and implementation*. Springer, 2014. 174 p.
  22. Semisynov R.A., Kiselev E.S., Khakimyanov M.I. Analiz poter energii v tekhnologicheskikh elementakh ustanovok skvazhinnykh nefte dobyvayushchikh nasosov [Analysis of energy losses in technological elements of installations of borehole oil-producing pumps]. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 2015, no. 6, pp. 179–198.
  23. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Deneko M.V. Simulation modeling of the submersible asynchronous motor's operation modes. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, Russia, 3–7 October 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602539.
  24. Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Shakhova L.V., Chashchin S.O., Deneko M.V. Performance characteristics' study of a submersible electric motor based on the bench tests results. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2020, vol. 1546, no. 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012047.
  25. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost promyshlennyykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of industrial electrical systems]. Moscow, Nedra Publishing House LLC Publ., 2010. 319 p.

Received: 8 February 2021.

#### Information about the authors

**Vladimir A. Kopyrin**, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ivan V. Rakov**, design engineer, Scientific Manufacturing Enterprise «Tomsk Electronic Company».

**Aleksei L. Portnyagin**, Cand. Sc., director of the geology and gas-oil production institute of Industrial University of Tyumen.

**Anastasia A. Markova**, master student, Industrial University of Tyumen.