

УДК 621.31

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Копырин Владимир Анатольевич¹,
kopyrinva@gmail.com

Портнягин Алексей Леонидович¹,
pal1979@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{2,1},
apple_27@mail.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Актуальность работы обусловлена необходимостью верификации данных узла «погружной электродвигатель – внутрискважинный компенсатор», полученных на имитационной модели с результатами стендовых испытаний. Внутрискважинная компенсация реактивной мощности является относительно новой технологией повышения энергетической эффективности нефтедобывающих объектов по сравнению с существующими способами. Ввиду технических особенностей размещения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности в эксплуатационной колонне нефтедобывающей скважины, в некоторых случаях, экономически не целесообразно исследование установки электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором, с целью определения оптимальных параметров работы установки на реальном объекте. Поэтому разработка адекватной имитационной модели узла «погружной электродвигатель – внутрискважинный компенсатор» является важной задачей, позволяющей при минимальных материальных затратах решить проблемы построения, функционирования и модернизации установок электроцентробежных насосов.

Цель: исследование внутрискважинного компенсатора реактивной мощности в программной среде Matlab Simulink и экспериментальные исследования погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором на лабораторном стенде.

Объект: погружной асинхронный электродвигатель с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

Методы. При разработке имитационной модели погружного асинхронного электродвигателя использованы готовые блоки библиотеки SimPowerSystem программного комплекса MATLAB Simulink. Для проверки адекватности имитационной модели изготовлен погружной асинхронный электродвигатель и опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности. Стендовые испытания проведены на заводе ООО «Алмаз», имеющем лицензированные лаборатории и аттестованных специалистов.

Результаты. Разработана имитационная модель узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» для моделирования электромеханических процессов узла. Разработан опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности. По результатам стендовых испытаний получены рабочие характеристики погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором. Проведена верификация данных, полученных на имитационной модели, с результатами эксперимента. Расхождения между расчетными и экспериментальными данными составили менее 10 %. Таким образом, разработанная имитационная модель узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» адекватно отображает электромеханические процессы узла. Определены перспективы проведения опытно-промышленных испытаний погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности.

Ключевые слова:

Внутрискважинный компенсатор, имитационная модель, погружной электродвигатель, реактивная мощность, стендовые испытания.

Введение

Известно, что одним из эффективных способов снизить потери мощности в воздушных и кабельных линиях электропередачи при активно-индуктивной нагрузке является компенсация индуктивной составляющей реактивной мощности [1–4]. В зависимости от способа подключения компенсирующего устройства различают индивидуальную [5, 6], групповую [7–9] и централизованную компенсацию [7, 10]. В нефтедобывающей отрасли в системах электроснабжения нефтедобывающих кустов скважин в основном используется групповая компенсация реактивной мощности (рис. 1, а). При данном виде компенсации компенсирующее

устройство устанавливается на шины комплектной трансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ и позволяет уменьшить индуктивную составляющую тока и потери мощности в подводящей линии электропередачи [11]. Мощность компенсирующего устройства выбирается исходя из поддержания требуемого коэффициента реактивной мощности в точке подключения не ниже $\text{tg } \varphi \leq 0,1$.

Однако использование групповой компенсации реактивной мощности не позволяет уменьшить индуктивную составляющую тока в отходящих кабелях, питающих погружные асинхронные электродвигатели (ПЭД). С увеличением мощности ПЭД и длины кабелей возрастают потери активной

мощности в электротехническом комплексе установки для добычи нефти, что приводит к дополнительным финансовым затратам на добычу нефти. На некоторых месторождениях длина кабелей, питающих ПЭД, достигает 3500 м.

Под электротехническим комплексом установки для добычи нефти понимается совокупность наземного и погружного электрооборудования, скомпанованного для приема, трансформации электрической энергии, управления ее потоком, преобразования электрической энергии в механическую и передачи её погружному насосу.

Существуют два вида компенсации реактивной мощности по способу подключения компенсирующего устройства: продольная и поперечная. В данной статье рассматривается поперечная компенсация реактивной мощности.

В работах [12–15] для повышения энергоэффективности электротехнического комплекса установки для добычи нефти предложено использовать внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности (ВКРМ) [16, 17] или погружные асинхронные электродвигатели с повышенным коэффициентом мощности [18]. То есть реализовать концепцию индивидуальной компенсации реактивной мощности. В этом случае компенсирующее устройство устанавливается непосредственно в нефтяную скважину и подключается параллельно погружному асинхронному электродвигателю (рис. 1, б) или другому потребителю электроэнер-

гии [5]. Количество и мощность ВКРМ (рис. 1, б) выбирается исходя из количества и мощности ПЭД. Предложенные авторами математические и имитационные модели позволяют оценить целесообразность внедрения внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности на нефтяных месторождениях.

Целью статьи являются теоретические исследования внутрискважинного компенсатора реактивной мощности в программной среде Matlab Simulink и экспериментальные исследования погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором на лабораторном стенде.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран узел нагрузки «ПЭД-ВКРМ» электротехнического комплекса УЭЦН, оснащенный погружным электродвигателем марки ПЭД-Я 63–117 М5В5 и внутрискважинным компенсатором мощностью 30 квар. Предметом исследования являются электрохимические характеристики исследуемого узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ».

Технические характеристики погружного асинхронного электродвигателя ПЭД-Я 63–117 М5В5 приведены в табл. 1 [15]. Выбор мощности внутрискважинного компенсатора производился исходя из поддержания требуемого коэффициента мощности узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» на уровне 0,95 о.е.

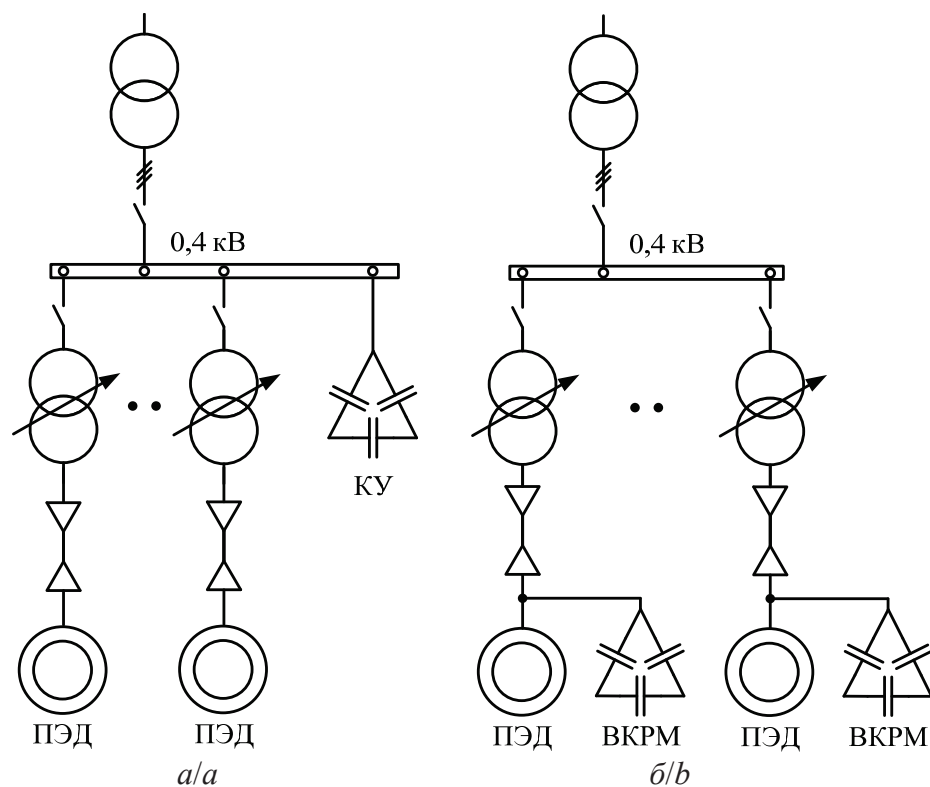


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения УЭЦН: а) с групповой компенсацией; б) с индивидуальной компенсацией

Fig. 1. Single-line power supply system of (ESP): а) group compensation; б) individual compensation

Таблица 1. Технические характеристики погружного электродвигателя ПЭД-Я 63–117 М5В5

Table 1. Technical characteristics of submersible motor SEM-Y 63–117 М5В5

Характеристика/Characteristic	Значение/Value
Номинальное напряжение $U_{д,ном}$, В Rated voltage $U_{m, nom}$, V	1040
Номинальная мощность на валу $P_{д,ном}$, кВт Rated active power $P_{m, nom}$, kW	63
Номинальная частота вращения $n_{ном}$, об/мин Rated rotation speed $n_{m, nom}$, rpm	2910
Номинальный КПД $\eta_{ном}$, % Rated coefficient of efficiency $\eta_{m, nom}$, %	84,5
Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{д,ном}$ Rated power factor $\cos\varphi_{m, nom}$	0,84
Номинальный ток $I_{д,ном}$, А Rated current $I_{m, nom}$, A	51
Номинальный момент $M_{д,ном}$, Н·м Nominal moment $M_{m, nom}$, N·m	212
Кратность пускового тока k_I Frequency of starting current	5,1
Кратность пускового момента m_{II} Frequency of starting moment	1,5
Кратность максимального момента m_{max} Frequency of maximum moment	2,3
Момент инерции J , кг·м ² Moment of inertia J , kg·m ²	0,46
Номинальное скольжение $s_{ном}$, % Nominal slip $s_{m, nom}$, %	3,0
Критическое скольжение $s_{кр}$, % Critical slip s_c , %	23,8

Для построения имитационной модели погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности использованы готовые блоки электротехнических устройств, входящих в библиотеку Matlab/Simulink SimPowerSystem: three-phase programmable voltage source; asynchronous machine squirrel cage and three-Phase Series RLC Load. Мгновенные значения напряжений и токов определены с помощью блока three-phase U-1.

Согласно рекомендациям [19], имитационная модель строится на следующих общих требованиях:

- 1) выбор модели производится исходя из полноты получаемых характеристик технического объекта и их точности, в совокупности с минимизацией затрат на вычислительные ресурсы;
- 2) адекватность математической модели – способность описывать параметры технического объекта с относительной погрешностью не более некоторого заданного значения, принятого в инженерной практике (не более 10 %);
- 3) работоспособность математической модели – способность нивелировать погрешности и не допускать их чрезмерного влияния на результат вычислительного эксперимента по отношению к погрешностям исходных данных;
- 4) продуктивность – необходимость выбора достаточно достоверных исходных данных, точность определения которых выше, чем требуемая точность расчета.

Начальные условия и рассчитанные параметры погружного асинхронного электродвигателя приведены в [20] или могут быть определены с помощью метода идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей [21–23] или по каталожным данным [24]. Разработанная имитационная модель погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности приведена на рис. 2.

Для оценки адекватности данных, полученных на имитационной модели, в ООО «Алмаз» (г. Радужный) совместно с ООО «Научно-производственная компания «Техойл» (г. Тюмень) был изготовлен опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности (рис. 3).

Электрические параметры опытного образца внутрискважинного компенсатора реактивной мощности приведены в табл. 2.

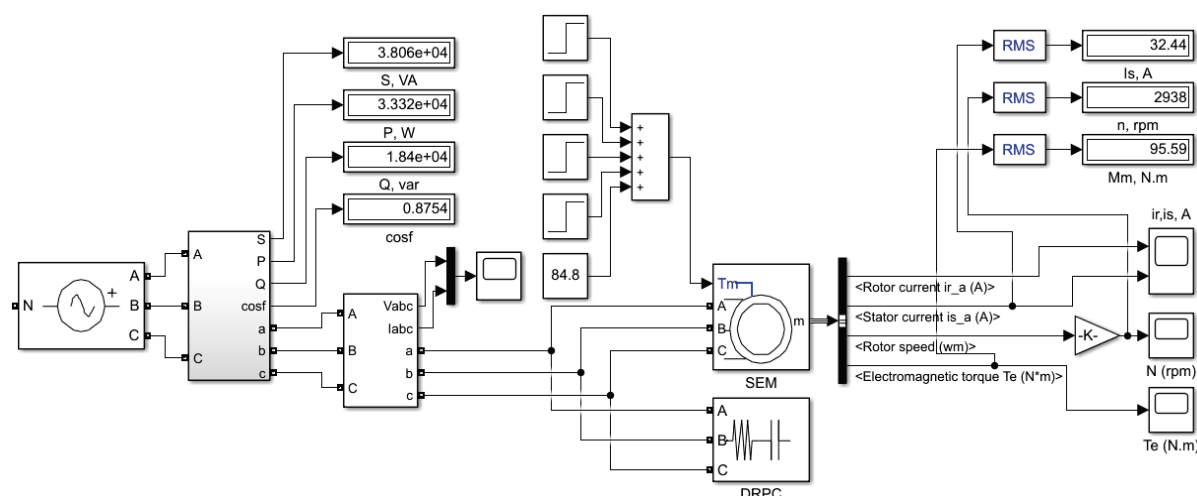


Рис. 2. Имитационная модель узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ»

Fig. 2. Simulation model of the load node «SEM-DRPC»

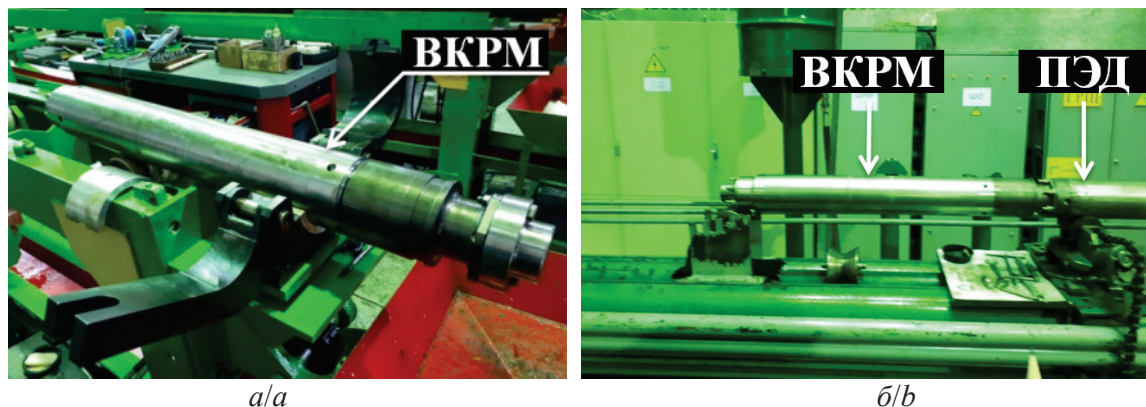


Рис. 3. Внешний вид опытного образца внутрискважинного компенсатора реактивной мощности: а) на сборочном стенде; б) на стендовых испытаниях

Fig. 3. Appearance of test prototype of downhole reactive power compensator: a) on the assembly stand; b) on bench tests

Таблица 2. Технические характеристики внутрискважинного компенсатора реактивной мощности

Table 2. Technical characteristics of downhole compensator of reactive power

Характеристика/Characteristic	Значение/Value
Номинальное напряжение $U_{\text{ВКРМ.ном}}$, В (50 Гц) Nominal voltage $U_{\text{DRPC.ном}}$, В (50 Hz)	1040
Номинальная мощность $Q_{\text{ВКРМ.ном}}$, кВар Nominal power $Q_{\text{DRPC.ном}}$, kvar	30,0
Номинальный ток $I_{\text{ВКРМ.ном}}$, А Nominal current $I_{\text{DRPC.ном}}$, А	16,7

Конструктивно внутрискважинный компенсатор состоит из прочного герметичного корпуса, внутри которого расположены высокотемпературные конденсаторы. Во избежание сдавливания конденсаторов внутри корпуса поддерживается атмосферное давление при максимальном наружном давлении 40 МПа. Напряжение от электрической сети на конденсаторы подается с помощью герметичных кабельных вводов, которые расположены на узле токоввода. Соединение внутрискважинного компенсатора с погружным электродвигателем осуществляется посредством соединительной муфты.

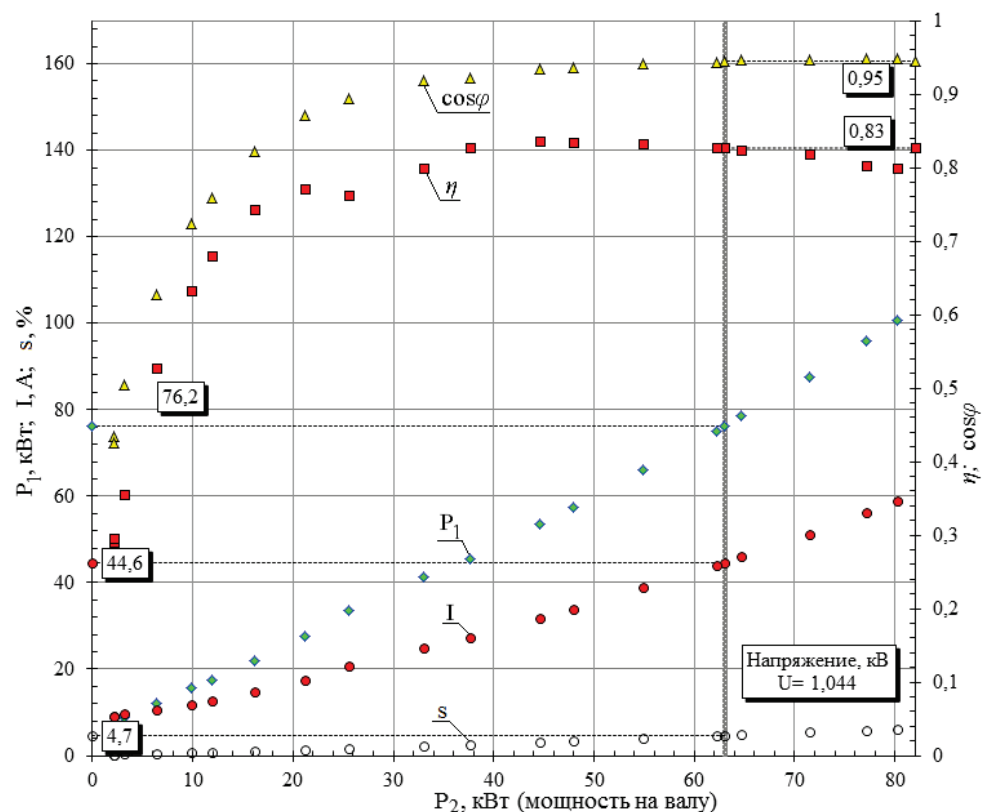


Рис. 4. Рабочие характеристики узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ»

Fig. 4. Performance of the load unit «SEM-DRPC»

Таблица 3. Сравнение экспериментальных рабочих характеристик

Table 3. Comparison of experimental performance

Mc, %	Скорость, об/мин Speed, rpm			Ток Current, A			Потребляемая активная мощность, кВт Active power consumption, kW			Коэффициент мощности Power factor, cosφ		
	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %
40	2950	2944	0,20	20,8	20,2	2,88	33,6	31,3	6,85	0,89	0,86	3,37
60	2924	2914	0,34	27,7	27,1	2,17	45,5	44,9	1,32	0,922	0,918	0,43
80	2890	2876	0,48	36,4	35,9	1,37	61,7	61,3	0,65	0,938	0,945	-0,75
100	2858	2838	0,70	45,0	44,6	0,89	76,8	76,9	-0,13	0,945	0,954	-0,95
120	2831	2801	1,06	53,6	52,9	1,31	91,7	91,5	0,22	0,948	0,957	-0,95

Результаты моделирования и стендовых испытаний

По результатам стендовых испытаний (Протокол испытаний № 19038-П-П от 29.08.2018 г. ООО «Алмаз») получены рабочие характеристики узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» (рис. 4).

В табл. 3 приведено сравнение экспериментальных рабочих характеристик (данные – 1) с полученными на имитационной модели характеристиками (данные – 2). Исследование проводилось в установившемся режиме работы ПЭД при приложении статического момента (M_c) на уровне 40; 60; 80; 100; 120 % от номинального момента.

В ходе верификации имитационной модели погружного асинхронного электродвигателя ПЭД-Я 63–117 М5В5 с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности установлено, что модель адекватно воспроизводит электромеханические процессы реальных устройств. В номинальном режиме отклонение расчетных значений потребляемого тока от экспериментальных данных составляет 0,89 %, для потребляемой активной мощности минус 0,13 %. Максимальная относительная погрешность, соответствующая области малых нагрузок, составляет для тока 2,88 % и уменьшается с увеличением нагрузки до 0,89 %.

Таким образом, полученные отклонения меньше допустимых, принятых в инженерной практике, следовательно, разработанная имитационная модель адекватно отображает электромеханические процессы узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ».

В ходе анализа рабочих характеристик (рис. 4) зафиксировано повышение коэффициента мощности узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ» с 0,84 до 0,95 при приложении номинального момента 212 Н·м. Снижение потребляемого тока относительно номиналь-

ного тока погружного электродвигателя составило 13 %. Коэффициент полезного действия остался без изменения на уровне 0,84. Это связано с тем, что внутрискважинный компенсатор реактивной мощности не влияет существенно на электромеханические процессы в погружном электродвигателе.

По результатам стендовых испытаний все заявленные характеристики достигнуты и принято решение о проведении опытно-промышленных испытаний.

Выводы

1. Разработана имитационная модель погружного асинхронного электродвигателя с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности. Расхождения между экспериментальными данными и данными, полученными на имитационной модели, менее 10 %, следовательно, имитационная модель адекватно отображает электромеханические процессы узла нагрузки «ПЭД-ВКРМ».
2. В ходе стендовых испытаний погружного асинхронного электродвигателя ПЭД-Я 63–117 М5В5 с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности зафиксировано повышение коэффициента мощности с 0,84 до 0,95 при номинальной нагрузке и снижение тока на 13 %.
3. Целесообразно провести дальнейшие исследования устройств внутрискважинной компенсации реактивной мощности в реальной скважине с оценкой экономической эффективности их внедрения и оценкой режимов их работы.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (СП-1082.2019.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1860–2014 – IEEE Guide for voltage regulation and reactive power compensation at 1000 kV AC and above. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6861419.
2. Bakshaeva N.S., Suvorova I.A., Cherepanov V.V. Voltage quality improving in power distribution networks with abruptly variable load by application of reactive power series compensation devices // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076281.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
5. 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.
6. Reactive power compensation in motor / X. Zhou, Y. Ma, Z. Gao, S. Zhang // 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). – Takamatsu, Japan, 6–9 August 2017. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015831.
7. Matanov N., Dimitrova S. Operating modes optimization of the capacitor banks in electrical power systems // 2018 10th Electrical

- Engineering Faculty Conference (BULEF). – Sozopol, Bulgaria, 11–14 September 2018. DOI: 10.1109/BULEF.2018.8646938
8. Rekha S., Keshava Murthy V. Dynamic power factor regulation using thyristor switched capacitor for industrial loads // 2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon). – Bangalore, India, 17–19 August 2017. DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358632.
9. Konovalov Y.V., Nurbosynov D.N. Optimization of power supply system reactive power compensation at the oil field electrical substation // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076228.
10. Miller T.J.E. Reactive power control in electric systems. – CIPA: Wiley-Interscience, 1989. – 381 p.
11. New method of reactive power compensation for oilfield distribution network / T. Wang, J. Zheng, S. Wang, C. Zhao, X. Shi, H. Chen // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). – Tianjin, China, 17–19 September 2018. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592471.
12. 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.
13. 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.
14. Kopyrin V.A. The dynamics of the active power consumption by the production well with the use of a downhole compensator // IEEE Conference 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, Russia, 13–15 November 2018. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601439.
15. Энергетические показатели электротехнического комплекса для добычи нефти при изменении частоты и напряжения источника питания / В.А. Копырин, О.В. Смирнов, А.Л. Портнягин, Р.Н. Хамитов // Промышленная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 18–25.
16. Внутрискважинное компенсирующее устройство: пат. 189025 Рос. Федерация № 2018143555; заявл. 10.12.2018; опубл. 07.05.2019, Бюл. № 13. – 6 с.
17. Погружная насосная установка с повышенным коэффициентом мощности: пат. 159811 Рос. Федерация № 2015140165/03; заявл. 21.09.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5. – 2 с.
18. Погружной электродвигатель с повышенным коэффициентом мощности: пат. 2485660 Рос. Федерация № 2011138868/07; заявл. 22.09.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 5 с.
19. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
20. 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.
21. 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.
22. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения / В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин, В.О. Бессонов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 36–40.
23. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). – Tomsk, Russia, 18–21 September 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357819.
24. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 269–272.

Поступила 15.10.2019 г.

Информация об авторах

Копырин В.А., ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

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

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

UDC 621.31

WAYS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMP UNITS FOR OIL PRODUCTION

Vladimir A. Kopyrin¹,
kopyrinva@gmail.com

Aleksey L. Portnyagin¹,
pal1979@mail.ru

Rustam N. Khamitov^{2,1},
apple_27@mail.ru

¹ Industrial University of Tyumen,
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

² Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

The relevance of the research is conditioned by the need to verify the data of «submersible motor – downhole compensator» node obtained on the simulation model with the results of bench tests. The downhole compensation of reactive power is a relatively new technology to improve the energy efficiency of oil production facilities compared to the existing methods. Due to the technical features of placement of reactive power compensators in the production string of an oil well, in some cases, it is not economically feasible to study the installation of an electric centrifugal pump with a downhole compensator to determine the optimal parameters of the installation at the real site. Therefore, the development of an adequate simulation model of the «submersible electric motor – downhole compensator» node is an important task, which allows solving the problems of construction, operation and modernization of electric submersible pumps at minimum material costs.

The aim of the research is to study the downhole reactive power compensator in a Matlab Simulink software environment and experimental studies of an submersible asynchronous electric motor with an downhole compensator on a laboratory bench.

Object: a submersible asynchronous electric motor with an intra-well reactive power compensator.

Methods. SimPowerSystem library blocks of MATLAB Simulink software complex were used for development of the imitation model of submersible asynchronous electric motor. To check the adequacy of the simulation model, a submersible asynchronous electric motor and a prototype of an intra-well reactive power compensator were manufactured. Bench tests were carried out at the plant of Almaz LLC, which has licensed laboratories and certified specialists.

Result. Simulation model of the load node «SEM-DRPC» (submersible electric motor-wellbore reactive power compensators) was developed to simulate electromechanical processes of the node. A prototype of an intra-well reactive power compensator was developed. Based on the results of bench tests of a submersible asynchronous electric motor with intra-well compensator, the operating characteristics were obtained. Verification of the data obtained on the simulation model with the results of the experiment is carried out. It is established that the developed simulation model of the load node «SEM-DRPC» adequately reflects the electromechanical processes of the node. Discrepancies between the calculated and the experimental data were less than 10 %. Prospects of experimental-industrial tests of the submersible asynchronous electric motor with intra-well reactive power compensator are determined.

Key words:

Downhole compensator, simulation model, submersible electric motor, reactive power, bench tests.

The study was carried out as part of a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists (SP-1082.2019.1).

REFERENCES

- 1860–2014 – IEEE Guide for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation at 1000 kV AC and Above. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6861419.
- Bakshaeva N.S., Suvorova I.A., Cherepanov V.V. Voltage quality improving in power distribution networks with abruptly variable load by application of reactive power series compensation devices. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076281.
- Zhezhenlenko I.V., Saenko Yu.L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh control na promyshlennykh predpriyatiyakh [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
- 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.
- 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.
- Zhou X., Ma Y., Gao Z., Zhang S. Reactive power compensation in motor. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan, 6–9 August 2017. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015831.
- Matanov N., Dimitrova S. Operating modes optimization of the capacitor banks in electrical power systems. 2018 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF). Sozopol, Bulgaria, 11–14 September 2018. DOI: 10.1109/BULEF.2018.8646938

8. Rekha S., Keshava Murthy V. Dynamic power factor regulation using thyristor switched capacitor for industrial loads. *2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon)*. Bangalore, India, 17–19 August 2017. DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358632.
9. Konovalov Y.V., Nurbosynov D.N. Optimization of power supply system reactive power compensation at the oil field electrical substation. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. St. Petersburg, Russia, 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076228.
10. Miller T.J.E. Reactive Power Control in Electric Systems. USA, Wiley-Interscience, 1989. 381 p.
11. Wang T., Zheng J., Wang S., Zhao C., Shi X., Chen H. New Method of Reactive Power Compensation for Oilfield Distribution Network. *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Tianjin, China, 17–19 September 2018. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592471.
12. Tabachnikova T.V., Garifullin R.I., Nurbosynov E.D., Makht A.V. 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. In Rus.
13. 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.
14. Kopyrin V.A. The dynamics of the active power consumption by the production well with the use of a downhole compensator. *IEEE Conference 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. Omsk, Russia, 13–15 November 2018. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601439.
15. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.V., Khamitov R.N. Energy indices of the electrical engineering complex for oil production when changing the frequency and voltage of the power source. *Prom energy*, 2019, no. 3, pp. 18–25. In Rus.
16. Kopyrin V.A., Bucher Y.E., Portnyagin A.V. *Vnutriskvazhinnoe kompensiruyushchee ustroystvo* [Downhole compensating device]. Patent RF, no. 189025, 2018.
17. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.V. *Pogruzhnaya nasosnaya ustanovka s povyshennym koeffitsiyentom moshchnosti* [The submersible pump unit with high power factor]. Patent RF, no. 159811, 2016.
18. Ibragimov N.G., Zabbarov R.G., Fatkullin I.D., Garifullin R.I., Grabovetsky D.S. *Pogruzhnoy elektrodvigatel s povyshennym koeffitsiyentom moshchnosti* [Submersible motor with a high power factor]. Patent RF, no. 2485660, 2013.
19. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1994. 318 p.
20. 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.
21. 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.
22. Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kuznetsov E.M., Anikin V.V., Bessonov V.O. Equation schemes for determining the parameters of the T-shaped scheme. *Omskiy nauchny vestnik*, 2018, no. 6, pp. 36–40. In Rus.
23. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*. Tomsk, Russia, 18–21 September 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357819.
24. Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. *Opreделение parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po katalognym dannym* [Determination of parameters for replacement of an asynchronous motor using catalog data]. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electromechanical energy converters. Materials of the International Scientific and Technical Conference]. Tomsk, TPU Publ. house, 2007. pp. 269–272.

Received: 15 October 2019.

Information about the authors

Vladimir A. Kopyrin, assistant, Industrial University of Tyumen.

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

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