

ПОСТРОЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.Г. Городнов

Казанский национальный исследовательский технологический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия
gorodnov_kai@mail.ru

Резюме: Повышение энергоэффективности и снижение затрат на создание электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия является актуальной проблемой и требует рационального решения. На каждом этапе развития электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия имеет место задача повышения энергоэффективности с целью сокращения удельных затрат электроэнергии на единицу объема добываемой скважинной жидкости. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия может определяться по классической методике согласования энергетического баланса. Задача повышения энергоэффективности электротехнического комплекса с автономной системой электроснабжения сводится к обеспечению минимума затрат на топливо при сохранении текущих объемов добычи нефти. Предложены два вида моделей электротехнического комплекса: с индивидуальным источником электроэнергии и центром генерации на базе отдельных дизель-генераторов. Представлена методика расчета энергетических параметров элементов электротехнического комплекса с установками электроцентробежных насосов и скважинных штанговых насосов, при которой повышение энергоэффективности осуществляется за счет совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности путем снижения гармонических составляющих тока. Произведено моделирование электротехнического комплекса погружного электродвигателя с целью определения величин напряжения и тока при коммутационных процессах. Проведено моделирование автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия на потери напряжения и моделирование дизель-генераторов на отклонение частоты вырабатываемого напряжения при набросе и сбросе нагрузки.

Ключевые слова: нефтедобывающее предприятие, электротехнический комплекс, автономная система электроснабжения, энергоэффективность, согласование параметров.

Для цитирования: Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 4. С. 64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.

DESIGN OF ENERGY EFFICIENT ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH AN AUTONOMOUS ELECTRIC SUPPLY SYSTEM

AG. Gorodnov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan,
Russia
gorodnov_kai@mail.ru

Abstract: Improving energy efficiency and reducing the costs of creating an autonomous power supply complex for an oil production enterprise is an urgent problem and requires a rational solution. At each stage of the electrical complex development of the oil production enterprise,

the purpose is to increase energy efficiency in order to reduce the unit cost of electricity per unit of produced well fluid volume. The electrical complex energy efficiency assessment of the oil production enterprise can be determined by the classical methodology of the energy balance. The task of increasing the energy efficiency of the electrical complex with an autonomous power supply system is to ensure a minimum of fuel costs while maintaining current oil production. Two types of the electrical complex models are proposed: with an individual electricity source and a generation center based on individual diesel generators. A method for calculating the energy parameters of the electrical complex components with installations of different types of pumps is presented. In this case, the energy efficiency is improved due to joint deep and group reactive power compensation and power factor correction by reducing the harmonic components of the current. The electrical complex simulation of a submersible electric motor has been carried out in order to determine the values of voltage and current during switching processes. The autonomous power supply system modeling of an oil production enterprise in case of voltage losses and the simulation of diesel generators with a frequency deviation of the generated voltage during load surges was carried out.

Keywords: oil production enterprise, electrotechnical complex, autonomous power supply system, energy efficiency, parameters matching.

For citation: Gorodnov AG. Design of energy efficient electrotechnical complexes with an autonomous electric supply system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(4):64-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78.

Введение

Стоимость электроэнергии составляет примерно 50% от себестоимости добычи нефти. Более половины всей потребляемой электроэнергии приходится на установки скважинных насосов. Средний расход электроэнергии на одну тонну добываемой нефти составляет примерно 80-120 кВт·ч, что в переводе на удельные затраты топлива, потребляемого генераторными установками электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения (АСЭС), в зависимости от их режима работы, составляет 20-30 л.

Нестабильность на рынке энергоресурсов, а именно: низкая цена на нефть и высокая её волатильность, сопровождающаяся ростом тарифов на электроэнергию, вынуждает нефтедобывающие предприятия искать способы снижения своих расходов за счёт повышения энергоэффективности и снижения затрат на создание электротехнического комплекса системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, что имеет более выраженный характер в труднодоступных местах, где электроснабжение от централизованной системы проблематично.

Автономная система электроснабжения нефтедобывающих предприятий в качестве электрогенераторов использует газопоршневые либо дизель-генераторные установки. Удельный расход топлива генераторных установок сильно зависит от режима работы элементов электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, а также от показателей качества электроэнергии. Затраты на сооружение автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия зависят от протяженности линий электропередач, количества элементов сети (генераторов, трансформаторов, выключателей) и их номиналов. От конфигурации сети зависит надёжность электроснабжения электродвигателей скважинных насосов, а, следовательно, длительность простоев основного оборудования добывающих скважин, ведущая к недоотпуску нефти и уменьшению прибыли.

Таким образом, повышение энергоэффективности и снижение затрат на создание электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия является актуальной проблемой и требует рационального решения.

На начальном этапе эксплуатации нефтяного месторождения нефть добывается фонтанирующим способом. Со временем давление в скважине падает и объем добываемой нефти снижается. Для того, чтобы объем извлекаемой нефти из скважины увеличить применяют механизированные способы добычи нефти. Одним из таких способов является технология ESP (*Electric Submersible Pump*) [1-3], которая заключается в том, что в скважину погружается центробежный насос, приводимый в движение погружным электрическим двигателем [4-6].

На отдаленных и труднодоступных для централизованного электроснабжения

месторождениях питание электродвигателей осуществляется от дизель-генераторных установок по схеме «один дизель-генератор – одна скважина», если установлены мощные (100–700 кВт) погружные электродвигатели [7-8]. Также применяется схема «один дизель-генератор – несколько скважин», где установлены погружные электродвигатели малой и средней мощности (50-100 кВт) [9]. Электротехнические комплексы (ЭТК), построенные по схеме питания основного электрооборудования скважин от одного дизель-генератора обозначим как ЭТК-1.

По мере освоения месторождения число скважин с дизель-генераторами и установками электроцентробежных насосов (УЭЦН) растет, а число фонтанирующих скважин уменьшается [10-11]. Для данного этапа характерны: низкий (менее 60%) коэффициент загрузки дизель-генераторов; высокие затраты на расход дизельного топлива и его доставку; затраты на расходные материалы и запасные части для дизель-генераторных установок и другие. Эти особенности вынуждают перейти ко второму этапу эксплуатации нефтяного месторождения, на котором осуществляется построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономным электроснабжением от групповых центров генерации (ЭТК-2), что позволяет уменьшить удельные затраты электроэнергии на единицу добываемой продукции [12]. Нефтяное месторождение при этом делится на зоны. В каждой зоне создается центр генерации, на котором устанавливаются группы дизель-генераторных установок, что приводит к сокращению их общего числа и увеличению коэффициента загрузки. От центра генерации по создаваемой линии электропередач осуществляется питание всех погружных электродвигателей на кустовых площадках данной зоны. При завершении строительства воздушных высоковольтных линий электропередачи централизованной системы электроснабжения эксплуатация нефтяного месторождения переходит на третий этап, на котором питание погружных электродвигателей по зонам переводится на централизованную систему электроснабжения. Понижительные трансформаторные подстанции централизованной системы электроснабжения устанавливаются на площадках центров генерации. Дизель-генераторные установки выводят в режим резервного питания.

Таким образом, на каждом этапе развития электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия имеет место актуальная задача повышения энергоэффективности с целью сокращения удельных затрат электроэнергии на единицу объема добываемой скважинной жидкости

Материалы и методы

Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия может определяться по классической методике согласования энергетического баланса [13]. Коэффициент энергоэффективности как для ЭТК-1, так и для ЭТК-2 выражается формулой:

$$K_{\text{эф.ЭТК}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{после}} P_{\text{послеЭТК}}}{\gamma_{\text{до}} P_{\text{доЭТК}}}$$

где $K_{\text{эф.ЭТК}}$ – коэффициент энергоэффективности ЭТК; $\gamma_{\text{до}}, \gamma_{\text{после}}$ – удельный расход топлива дизель-генераторной установки на единицу вырабатываемой активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности; $P_{\text{доЭТК}}, P_{\text{послеЭТК}}$ – суммарные потери активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК.

Суммарные потери активной мощности до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК-1:

$$P_{\text{до ЭТК1}}^{\Sigma} = \Delta P_{\text{до ЭТКООСj}} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}$$

$$P_{\text{послеЭТК1}}^{\Sigma} = \Delta P_{\text{послеЭТКООСj}} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}$$

$$\Delta P_{\text{до ЭТКООСj}} = \Delta P_{\text{до СФ}} + \Delta P_{\text{до ПЧ}} + \Delta P_{\text{до С-Ф}} + \Delta P_{\text{до Тр}} + \Delta P_{\text{до КЛ}}$$

$$\Delta P_{\text{после ЭТКООС}j} = \Delta P_{\text{после СФ}} + \Delta P_{\text{после ПЧ}} + \Delta P_{\text{после С-Ф}} + \Delta P_{\text{после Тр}} + \Delta P_{\text{после КЛ}}$$

где $\Delta P_{\text{до ЭТКООС}j}$, $\Delta P_{\text{после ЭТКООС}j}$ – суммарная потребляемая мощность электротехническим комплексом основного оборудования скважины (ЭТК ООС) от генератора до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности ЭТК; $\Delta P_{\text{до СФ}}$, $\Delta P_{\text{после СФ}}$ – потери мощности в сетевом фильтре до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до ПЧ}}$, $\Delta P_{\text{после ПЧ}}$ – потери мощности в преобразователе частоты до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до С-Ф}}$, $\Delta P_{\text{после С-Ф}}$ – потери мощности в синус-фильтре до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до Тр}}$, $\Delta P_{\text{после Тр}}$ – потери мощности в трансформаторе до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до КЛ}}$, $\Delta P_{\text{после КЛ}}$ – потери мощности в кабельной линии до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{эдж}}$ – потери активной мощности в электродвигателе; $P_{\text{эдж}}$ – активная мощность электродвигателя.

Суммарная потребляемая активная мощность от автономного центра генерации до и после мероприятий по совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности:

$$P_{\text{до ЦГ}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k P_i = \Delta P_{\text{до тр1}} + \Delta P_{\text{до ВЛ}} + \sum_{j=1}^N [\Delta P_{\text{до тр2}j} + \Delta P_{\text{до ЭТКООС}j} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}]$$

$$P_{\text{после ЦГ}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^k P_i = \Delta P_{\text{после тр1}} + \Delta P_{\text{после ВЛ}} + \sum_{j=1}^N [\Delta P_{\text{после тр2}j} + \Delta P_{\text{после ЭТКООС}j} + P_{\text{эдж}} + \Delta P_{\text{эдж}}]$$

где $\Delta P_{\text{до тр1}}$, $\Delta P_{\text{после тр1}}$ – потери мощности в повышающем трансформаторе центра генерации до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до тр2}}$, $\Delta P_{\text{после тр2}}$ – потери мощности в понижающем трансформаторе до и после мероприятий; $\Delta P_{\text{до ВЛ}}$, $\Delta P_{\text{после ВЛ}}$ – потери мощности в воздушных линиях электропередачи до и после мероприятий.

Задача повышения энергоэффективности ЭТК-1 с автономной системой электроснабжения сводится к обеспечению минимума затрат на топливо при сохранении текущих объемов добычи нефти. Этого можно добиться за счет повышения коэффициента полезного действия (КПД) кабельной линии электротехнического комплекса. Основным способом повышения КПД элементов электротехнического комплекса является снижение реактивной мощности, а, следовательно, и снижение полной мощности.

Для установившихся условий синусоидальности токов и напряжения, когда в цепи кроме основной гармонической составляющей присутствуют другие гармоники, активная мощность P и реактивная мощность Q принимают вид [14]:

$$P = 3 \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k$$

$$Q = 3 \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$$

где k – номер гармоники.

Полная мощность основной гармоники A через эти мощности выражается:

$$A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2}$$

где P_A – активная мощность основной гармоники; Q_A – реактивная мощность основной гармоники.

Полная мощность в условиях длительного искажения синусоидальности формы тока и напряжения отличается от полной мощности основной гармоники, её можно представить в виде:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

где D – мощность искажений, которая учитывает искажения формы напряжения и тока.

Разность между квадратами полной мощности S и активной мощности P обозначают термином «неактивная мощность»:

$$N^2 = S^2 - P^2$$

На рис. 1 представлен ЭТК-1 с автономной системой электроснабжения основного оборудования добывающей скважины. На рис. 1 представлен преобразователь частоты, который, с одной стороны, позволяет осуществлять плавный пуск и регулировку скорости вращения погружного электродвигателя. С другой стороны, преобразователь частоты генерирует в сеть высшие гармонические составляющие, что приводит к снижению коэффициента мощности. Для подавления высших гармонических составляющих используют фильтрокомпенсирующие устройства (активные, пассивные и гибридные фильтры), тем самым повышая $\cos\phi$. Для понижающего трансформатора погружной электродвигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку, кроме того от понижающего трансформатора питается дополнительно линейная нагрузка (система обогрева, система кондиционирования, освещение, двигатели насосов внутрипромысловой парекачки), поэтому потребляемую реактивную мощность с помощью устройств глубинной компенсации и фильтра высших гармоник невозможно полностью скомпенсировать. В работах [11,12] предлагается более эффективный способ коррекции $\cos\phi$, который заключается в совместной компенсации реактивной мощности и подавлении гармонических составляющих за счет применения фильтров гармоник и конденсаторных батарей. Но при таком подходе КПД кабельной линии, питающей погружной электродвигатель, имеет низкое значение 0,75-0,85 (в зависимости от длины кабельной линии и мощности погружного электродвигателя). В данной работе предлагается увеличить КПД кабельной линии, питающей погружной электродвигатель, за счет применения глубинной компенсации реактивной мощности, которая заключается в непосредственном подключении конденсаторных батарей к питающим клеммам погружного электродвигателя (рис. 2).

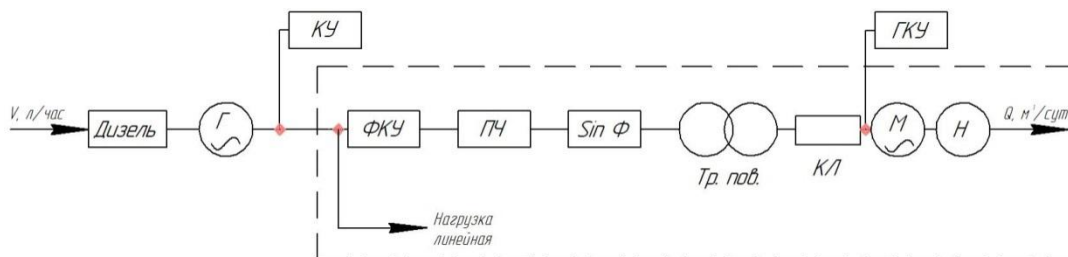


Рис. 1. Модель ЭТК-1 НДП с АСЭС

На рис. 1 и рис. 2 обозначены: ЭТК ООДС – электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины; Г – генератор; Тр. пов. – повышающий трансформатор; Сква.1 – нефтяная скважина; ВЛ – воздушная линия электропередачи; Тр. пон. – понижающий трансформатор; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство; ПЧ – преобразователь частоты; Sin Ф – синус-фильтр; КЛ – кабельная линия; М – погружной электродвигатель; КУ – компенсирующее устройство; ГКУ – глубинное компенсирующее устройство; Н – насос.

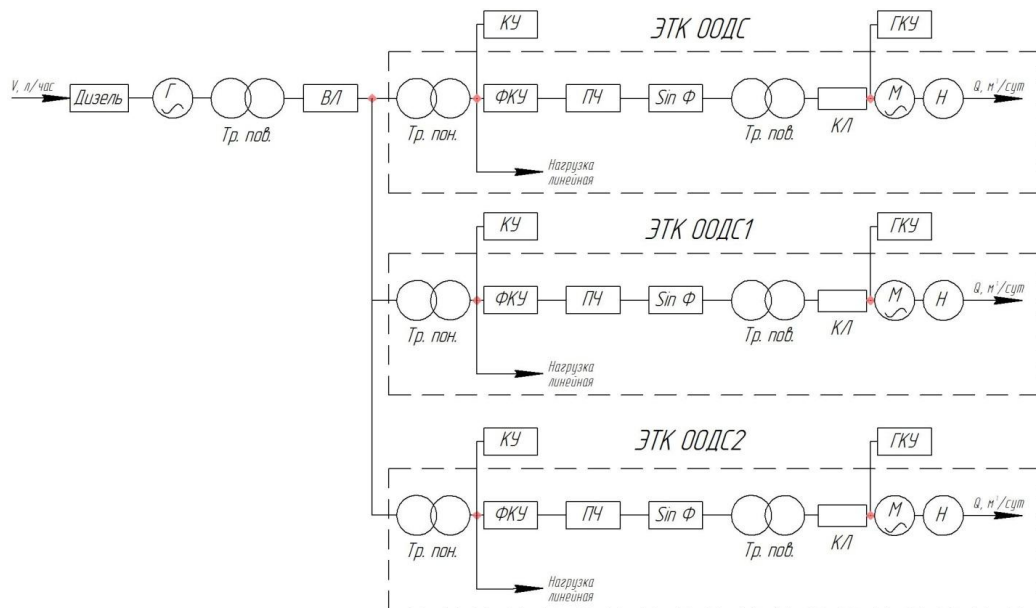


Рис. 2. Модель ЭТК-2 НДП с АСЭС

Глубинное компенсирующее устройство (ГКУ) – установка, предназначенная для компенсации ёмкостной составляющей переменного тока погружного электродвигателя внутри нефтяной скважины. Глубинное компенсирующее устройство является нерегулируемым устройством (конденсаторные батареи) и жестко присоединено к электродвигателю погружной насосной установки добычи нефти. Коррекция коэффициента мощности за счет совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности за счет снижения гармонических составляющих тока дает следующие положительные эффекты. Первый заключается в том, что снижается потребляемая полная мощность, что в конечном итоге ведет к уменьшению удельного расхода топлива дизель-генераторных установок. Второй эффект заключается в том, что с уменьшением реактивной мощности уменьшается полный ток, протекающий через элементы электротехнического комплекса. Это позволяет выбрать элементы и соединительные проводники электротехнического комплекса меньшего номинала.

Дизель-генераторные установки выбираются по полной мощности [15]. Удельный расход топлива дизель-генераторных установок зависит от загрузки дизель-генераторов активной мощностью. Чем больше дизель-генератор загружен по активной мощности, тем меньше удельный расход дизельного топлива на единицу вырабатываемой электроэнергии [16]. Снижение реактивной мощности позволяет выбрать меньшее число дизель-генераторных установок, тем самым увеличить их загрузку по активной мощности.

При выборе дизель-генераторной установки важным моментом является стабилизация частоты и напряжения в автономной электрической сети при набросе и сбросе нагрузки [17-19]. Существует максимальная величина наброса/сброса нагрузки при заданной величине базовой мощности при условии соблюдения стандарта *ISO 8528-5*, согласно которому для класса генераторов *G1* допускается диапазон отклонения частоты $\pm 18\%$ (время восстановления частоты 10 с), а для класса генераторов *G3* допускается диапазон $\pm 10\%$ (время восстановления частоты 3 с). Это означает, что при подключении (отключении) соответствующей максимальной нагрузки частота не выйдет за указанные пределы. Сертификация *Grid Codes BDEW* (*German Association of Energy and Water Industries*) более жесткая: она не допускает отклонения напряжения при набросе и сбросе нагрузки, тогда как по *ISO 8528-5* для класса *G3* допускаются отклонения напряжения в пределах $\pm 20\%$ в пределах 4 с.

Отечественные требования в отношении стабилизации частоты регламентируются согласно ГОСТ 32144-2013: отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Изменение частоты $\pm 10\%$ соответствует в абсолютных значениях $\pm 5/-7,5$ Гц, что соответствует международным требованиям к

генераторам класса G3.

Расчет энергетических параметров элементов электротехнического комплекса с установками электроцентробежных насосов предлагается производить по следующей методике:

1. Выбор и расчет параметров конкретного погружного электродвигателя, исходя из характеристик центробежного насоса.
2. Выбор и расчет мощности компенсирующего устройства для индивидуальной глубинной компенсации реактивной мощности погружного электродвигателя (ПЭД).
3. Выбор и расчет параметров кабеля, питающего погружной электрический двигатель. Сечение кабеля выбирается исходя из экономической целесообразности (потребляемой мощности и мощности потерь) [20].
4. Выбор и расчет параметров синус-фильтра.
5. Выбор и расчет параметров повышающего трансформатора.
6. Выбор и расчет преобразователя частоты.
7. Выбор и расчет фильтрокомпенсирующего устройства.
8. Выбор и расчет мощности компенсирующего устройства, устанавливаемого на шинах 0,4 кВ понижающего трансформатора.
9. Выбор и расчет параметров понижающего трансформатора.
10. Построение системы электроснабжения нефтедобывающего комплекса, оптимальной по критерию минимума протяженности и числу центров генерации, в том числе выбором дизель-генераторов. Установленная полная мощность дизель-генераторов должна быть больше суммарной полной потребляемой мощности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия (включая потери мощности в элементах системы электроснабжения).
11. Проверка работоспособности спроектированной автономной системы электроснабжения электротехнических комплексов механизированной добычи нефти. Данная проверка осуществляется в программном комплексе *RTDS* и заключается в проверке системы электроснабжения на длительные допустимые токи в линиях и потери напряжения.

Расчет энергетических параметров электротехнического комплекса на основе штанговых скважинных насосных установок скважинных штанговых насосов (СШН) предлагается производить по следующей методике:

1. Определение коэффициента использования двигателей станков-качалок СШН в зависимости от длины хода штока и частоты качания.
2. Расчет средней активной мощности за сутки каждого двигателя станка-качалки СШН:

$$P_{\text{ср}} = k_u P_{\text{ном}}$$

3. Расчет средней реактивной мощности за сутки каждого двигателя станка-качалки СШН:

$$Q_{\text{ср}} = P_{\text{ном}} \operatorname{tg} \varphi k_u$$

4. Расчет суммарной средней активной мощности за сутки всех двигателей:

$$P_{\text{ср}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ср}i}$$

5. Расчет суммарной средней реактивной мощности за сутки всех двигателей:

$$Q_{\text{ср}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{ср}i}$$

6. рассчитывается средневзвешенный коэффициент использования:

$$k_{\text{и.ср}} = \frac{P_{\text{ср}}^{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном}i}}$$

7. Расчет максимальной активной мощности за сутки всех двигателей:

$$P_M = [1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_3}} \sqrt{\frac{1 - k_{и.ср}}{k_{и.ср}}}] P_{ср}$$

8. Расчет максимальной реактивной мощности за сутки всех двигателей:

$$Q_M = 1.1 Q_{ср}$$

9. Выбор и расчет реактивной мощности компенсирующего устройства для групповой компенсации на шинах понижающего трансформатора.

10. Расчет полной мощности трансформаторной подстанции:

$$S_{max} = \sqrt{P_M^2 + (Q_M - Q_{кв})^2}$$

При использовании однотрансформаторной подстанции $S_{mp} \geq S_{max}$. При двухтрансформаторной подстанции мощность одного трансформатора $S_{mp} \geq \frac{S_{max}}{1,4}$.

Далее выполняются пункты 10-11, как при согласовании энергетических параметров элементов электротехнического комплекса УЭЦН.

При создании ЭТК-2 для питания групп трансформаторных подстанций скважин в отдельных зонах нефтяного месторождения возникают следующие проблемы:

1. Определение числа центров генерации и координат привязки на местности.
2. Определение конфигурации линий электропередачи системы электроснабжения трансформаторных подстанций скважин от одного центра генерации.

Для решения этих проблем предложена методика проектирования ЭТК нефтедобывающего предприятия с АСЭС, оптимальной по критерию минимума протяжённости линий электропередач и числу центров генерации.

Основные положения методики:

1. Формирование системы исходных данных: координаты кустовых площадок, мощность и коэффициенты использования генерирующего и основного электрооборудования, параметры электрических линий.
2. Определение минимальных расстояний между соседними скважинами с учетом ограничений (рельеф местности, сооружения) с помощью модифицированного алгоритма Ли.
3. Построение конфигурации системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия.
 - 3.1. Построение минимального остова графа, сумма весов ребер которого минимальна с помощью модифицированного алгоритма Прима.
 - 3.2. Определение местоположения центра генерации.
 - 3.3. Проверка участков электрической сети по величине длительно допустимых токов (если электрическая сеть не соответствует по проверяемому параметру, то зона делится на два участка и повторяются пункты 3.1-3.3).
4. Построение конфигурации линии электропередачи АСЭС участка по трем вариантам и выбор варианта с наименьшими затратами:
 - минимальное дерево графа с точками Ферми-Торичелли-Штейнера;
 - наикратчайший Гамильтонов цикл при одноцепной воздушной линии электропередачи;
 - наикратчайший Гамильтонов цикл при двухцепной воздушной линии электропередачи.

Результаты и обсуждение

Модели электротехнических комплексов ЭТК-1 и ЭТК-2 разработаны в среде RSCAD 5.0007.2 (рис. 3, рис. 4) для месторождения Южная Румайла скважины Ru-203, Ru-065, Ru-064, Ru-050, Ru-269, Ru-262.

Цель эксперимента – определение соответствия установленным требованиям значений напряжений, токов и частоты питающей сети электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения при набросе и сбросе нагрузки в зависимости от наличия или отсутствия глубинной компенсации реактивной мощности.

План эксперимента:

1. Получить значения напряжений и токов электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения в нормальном режиме работы.
2. Получить уровни отклонения частоты напряжения автономной системы

электропитания при набросе и сбросе нагрузки.

3. Получить уровни перенапряжений при пуске ПЭД от дизель-генератора при постоянной нагрузке на валу для двух режимов: первый режим – глубинная компенсация реактивной мощности отключена; второй режим – глубинная компенсация реактивной мощности подключена к клеммам питания ПЭД.

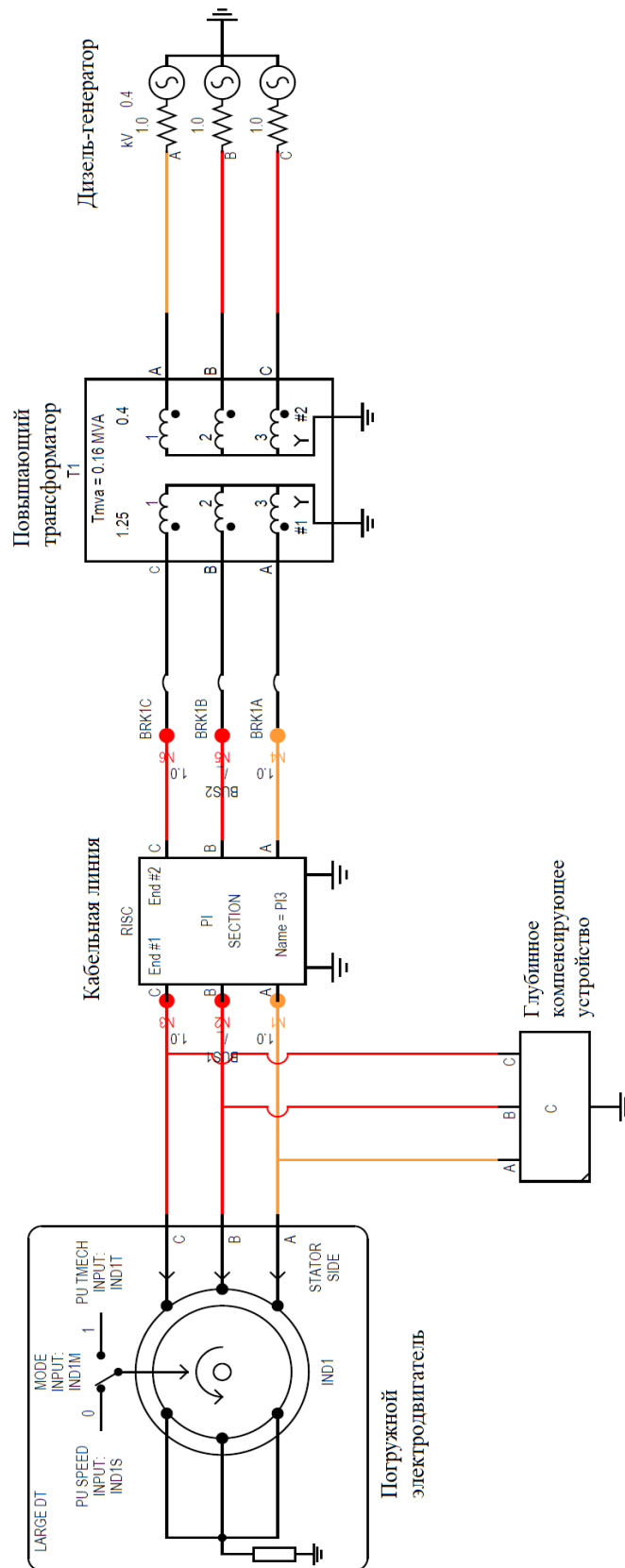


Рис. 3. Модель ЭТК-1 в среде RSCAD комплекса RTDS

Работа по моделированию в программной среде *RSCAD* условно разделена на этапы с последовательным получением модели электрической сети и выполнением проверки статической и динамической устойчивости. Этап 1:

- создание общих моделей источников электроэнергии на основе модели синхронного генератора (дизель-генераторная установка), первичного двигателя, системы автоматического регулирования тока возбуждения и стабилизатора напряжения генератора;
- подготовка схем управления выключателями в различных узлах сети;
- подготовка вспомогательных измерительных элементов для вывода вычисляемых программным обеспечением *RSCAD* параметров на мнемосхему для удобного считывания пользователем;
- первоначальная подготовка и отладка модели источника электроэнергии.

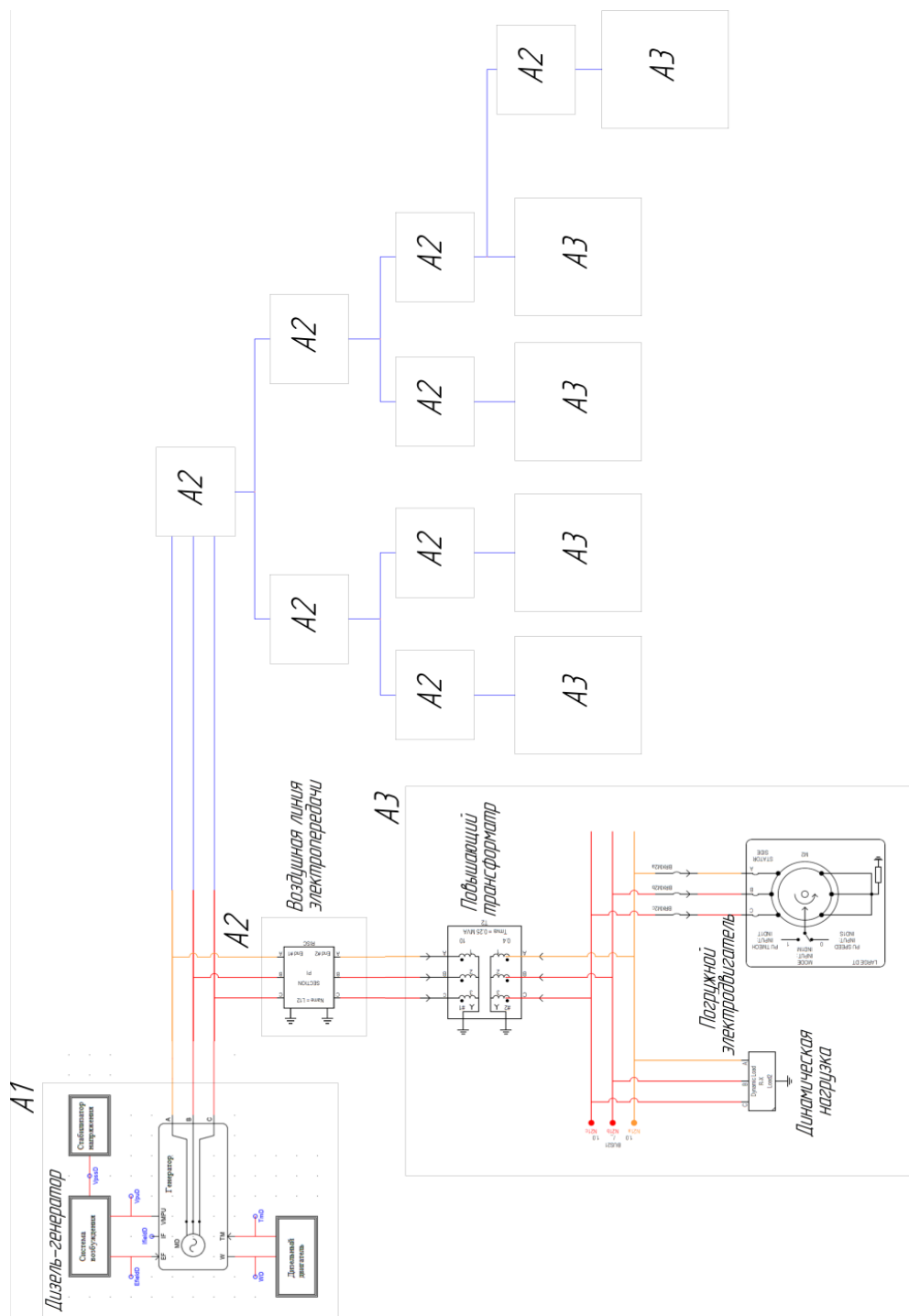


Рис. 4. Модель ЭТК-2

A1 – дизель-генератор; A2 – линия электропередачи; A3 - электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины.

Этап 2:

- расчет и построение модели электрической сети;
- анализ работы сети и сохранение устойчивой работы.

Линии электропередачи представлены в виде блока «*PI Section Model*». Данный модуль моделирует собственные и взаимные сопротивления, индуктивности и емкости (R_p – активное сопротивление прямой последовательности, X_p – индуктивное сопротивление прямой последовательности, X_{cp} – емкостное сопротивление прямой последовательности, R_z – активное сопротивление нулевой последовательности, X_z – индуктивное сопротивление нулевой последовательности, X_{cz} – емкостное сопротивление нулевой последовательности).

Глубинное компенсирующее устройство для ЭТК-1 ($Q = 60$ кВАр) представлено в виде блока «*Dynamic Load*» с возможностью изменения параметров.

Линейная нагрузка для ЭТК-2 (номинальная мощность $S_{max} = 40$ кВА; коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$) также представлена в виде блока «*Dynamic Load*» с возможностью изменения параметров в процессе моделирования.

Погружной электродвигатель насоса представлен в виде асинхронного двигателя «*Induction machine*».

Технические характеристики погружного электродвигателя (ЭД-Я 90-117 М1В55):

Номинальное напряжение $U_{д.ном} = 1040$ В;

Номинальная мощность на валу $P_{д.ном} = 90$ кВт;

Номинальная частота вращения $n_{ном} = 2910$ об/мин;

Номинальный КПД $\eta_{ном} = 84,5\%$;

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{д.ном} = 0,75$;

Номинальный ток $I_{д.ном} = 50$ А;

Номинальный момент $M_{д.ном} = 210$ Н·м;

Кратность пускового тока $k_I = 5,0$;

Кратность пускового момента $m_{II} = 1,5$;

Кратность максимального момента $m_{max} = 2,3$;

Момент инерции $J = 0,48$ кг·м²;

Номинальное скольжение $s_{ном} = 3,0\%$

Трансформаторы представлены в виде блока «*Power Transformers*» со всеми соответствующими техническими характеристиками (номинальная мощность $S_{тр} = 250$ кВА; напряжение на высокой стороне $U_{вн} = 10$ кВ; напряжение на низкой стороне $U_{нн} = 0,4$ кВ; потер холостого хода $P_{хх} = 0,65$ кВт; потери короткого замыкания $P_{кз} = 3,1$ кВт; ток холостого хода $I_{хх} = 2,3\%$; напряжение короткого замыкания $U_{кз} = 4.5\%$).

Модель синхронной машины в *RTDS* представляет собой трехфазную электрическую модель, которая может использоваться в качестве генератора (при положительном крутящем моменте), двигателя (при отрицательном крутящем моменте) или синхронного компенсатора (без крутящего момента). Для моделирования систем возбуждения использовались сформированные на *RTDS* модели генераторов.

В данной работе дизель-генератор моделируется как синхронный генератор с управляемой системой возбуждения, приводимый в движение дизельным двигателем с регулятором скорости (номинальная мощность $S_{ном} = 1110$ кВА; номинальное напряжение $U_{ном} = 0,4$ кВ).

В итоге, модель системы дизель генератора, исследуемая в данной работе, состоит из: двигателя и регулятора скорости, системы возбуждения, стабилизатора напряжения и синхронного генератора.

В результате моделирования в программном комплексе *RTDS* уровней напряжений систем электроснабжения погружных электродвигателей выявлено наибольшее падение напряжения 4,1% (9590 В), что соответствует норме 5%.

На рис. 5-6 представлены результаты моделирования частоты и напряжения в автономной электрической сети при набросе и сбросе нагрузки ЭТК-2. Диапазон отклонений частоты напряжения составляет от 47,66 Гц до 52,99 Гц, что соответствует норме $\pm 10\%$.

В результате моделирования уровней перенапряжения в зависимости от наличия или отсутствия глубинной компенсации реактивной мощности выявлено, что максимальное значение составляет 16%, что не превышает допустимых значений (30% от номинального значения).

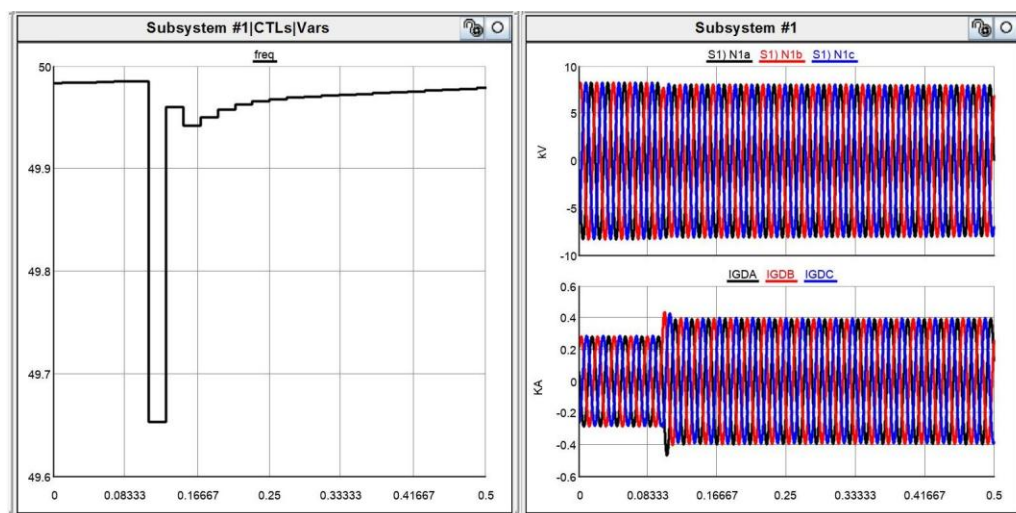


Рис. 5. Изменение частоты сети при увеличении нагрузки с 75% до 100% от номинальной загрузки дизель-генератора

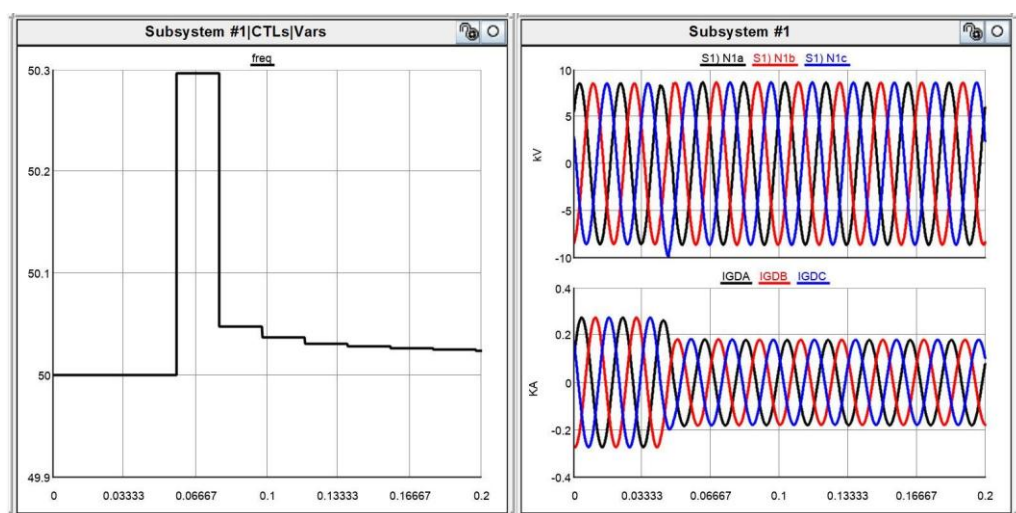


Рис. 6. Изменение частоты сети при снижении нагрузки с 75% до 50% от номинальной загрузки дизель-генератора

Выводы

В данной работе были предложены два вида моделей электротехнического комплекса: с индивидуальным источником электроэнергии ЭТК-1 и центром генерации на базе отдельных дизель-генераторов ЭТК-2, была разработана методика расчета энергетических параметров элементов электротехнического комплекса автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия, на котором повышение энергоэффективности осуществляется за счет совместной глубинной и групповой компенсации реактивной мощности и коррекции коэффициента мощности путем снижения гармонических составляющих тока, которые снижают удельный расход топлива, потребляемого дизель-генераторными установками на единицу добываемой нефти.

По данной методике было осуществлено построение энергоэффективного электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающего предприятия Южная Румайла. Сокращение удельного расхода электроэнергии на единицу добываемой нефти от внедрения результатов работы составляет 11%, экономия затрат на сооружение энергоэффективного электротехнического комплекса автономного электроснабжения нефтедобывающих предприятий составляет 14%.

В данной работе было произведено моделирование электротехнического комплекса погружного электродвигателя с целью определения величин напряжения и тока при коммутационных процессах. В результате уровень перенапряжений не превышает 16% при включении и 20% при отключении погружного электродвигателя,

что является допустимым.

Также было проведено моделирование полученной автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия на потери напряжения, при набросе и сбросе нагрузки. В результате уровень напряжения не превышает 5%.

Также проведено моделирование дизель-генераторов на отклонение частоты вырабатываемого напряжения при набросе и сбросе нагрузки. Диапазон отклонений частоты напряжения составляет от 47,66 Гц до 52,99 Гц при увеличении нагрузки с 75% до 100% от номинальной загрузки дизель-генератора и при снижении нагрузки с 75% до 50% от номинальной загрузки дизель-генератора, что соответствует нормам.

Литература

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.
2. Market research of sucker rod pump installations (USGGN). Analytical report [electronic resource]. Available at: URL: <http://research-techart.ru/report/walking-beam-pumping-unit.htm>. Accessed to : February 15, 2020.
3. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri. Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation // 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018.
4. Xiaodong Liang. Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system // 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016.
5. Priyatnadi Sardjono, Muhammad Nur Wangsa Saputra. Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump // 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 5-6 Oct. 2016.
6. Thorsen O.V., Dalva M. Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. V.37. Issue 2. Pp. 541-547.
7. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017.V.53. Issue 3. pp. 3164-3174.
8. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017.
9. Miaoxin Jin, Pengmiao Zhang, Gang Li, Qiang Gao, Xiaolu Li, Dianguo Xu. A downhole multi-parameter monitoring system for electrical submersible pump // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 June 2015.
10. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique // 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018.
11. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. Kazan: Kazan State Energy University. 2018. No. 11-12. pp. 127-132.
12. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov V.Yu., Gorodnov A.G Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS». Kazan: Kazan State Energy University. 2019 . No. 1-2. pp. 141-145.
13. Любимова Н.Г., Фомина В.Н. Особенности оценки эффективности энергосберегающих проектов, реализуемых у потребителей электроэнергии и тепла // Вестник университета. 2013. № 6. С. 150-156.
14. Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках // Серия инженера конструктора. АБВ. 2018. 58 с.
15. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Автономная высокоэффективная электрогенерирующая электростанция // Тр. Нижегородского государственного технического университета. 2009. Т. 77, С. 68-72.
16. Оташехов Д.И. Дизель-генераторная установка. Диагностика. Ремонт. Техобслуживание.

М. : Издательский дом МЭИ, 2018. 760 с.

17. Bakhteev K., Fedotov A., Chernova N. et al. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems // Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019, pp. 488-493.

18. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 347-352.

19. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The Improving quality of power supply to industrial consumers using highpower energy storage // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU-CON). Riga. 2018. pp. 1-5.

20. Ристхейн Э.М. Выбор сечений проводников по экономической плотности тока при автоматизированном проектировании электрических сетей // Труды. Таллинского политехнического института. 1983. № 563. С. 59-64.

Автор публикации

Городнов Антон Геннадьевич – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование», Казанский национальный исследовательский технологический университет им.А.Н. Туполева, г. Казань, Россия. Email:gorodnov_kai@mail.ru.

References

1. Gabor Takacs. *Electrical Submersible Pumps Manual*. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.

2. *Market research of sucker rod pump installations (USGGN)*. Analytical report [electronic resource]. Available at: URL: <http://research-techart.ru/report/walking-beam-pumping-unit.htm>. Accessed to: February 15, 2020.

3. Xiaodonz Liang, Ahmad El-Kadri. *Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation*. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.

4. Xiaodong Liang. *Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system*. 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016. doi: 10.1109/ICPS.2016.7490232.

5. Priyatmadi Sardjono, Muhammad Nur Wangsa Saputra. *Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump*. 2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 5-6 Oct. 2016. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863229.

6. Thorsen O.V., Dalva M. *Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2001;37(2):541-547

7. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017;53(3):3164-3174.

8. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. *A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system*. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.

9. Miaoxin Jin, Pengmiao Zhang, Gang Li, et al. *A downhole multi-parameter monitoring system for electrical submersible pump*. 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 June 2015. doi: 10.1109/ICPE.2015.7168111.

10. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. *Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique*. 2018 IEEE ANDESCON. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.

11. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov AG *Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field*. Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2018;11-12:127-132.

12. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov AG. Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field. Proceedings of the higher educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2019;1-2:141 - 145.
13. Lyubimova NG, Fomina VN. Features of evaluating the effectiveness of energy-saving projects implemented by consumers of electricity and heat. *University Bulletin*. 2013. No. 6. S. 150-156.
14. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. ABB. 2018.58 p.
15. Darienkov AB, Khvatov OS. Autonomous high-performance power generating power station. Nizhny Novgorod State Technical University. 2009;77:68-72.
16. Otashekhov DI. Diesel Generator Set. Diagnostics. Repairs. Maintenance. M.: Publishing House MPEI, 2018.760 p.
17. Bakhteev K, Fedotov A, Chernova N. et al. *Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems*. Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019. pp. 488-493.
18. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 347-352.
19. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The Improving quality of power supply to industrial consumers using highpower energy storage*. 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018. pp. 1-5. doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659834.
20. Risthein EM. *The choice of sections of conductors for economic current density in the automated design of electrical*. Networks. Tallinn Polytechnic. 1983;563:59-64.

Authors of the publication

Anton G. Gorodnov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia. Email:gorodnov_kai@mail.ru.

Поступила в редакцию

16 марта 2020г.