УДК. 621.646.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД НЕФТЕПРОВОДА

К.В. Суслов¹, И.Н. Шушпанов¹, Д.В. Воронцов²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

²Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,
г. Москва, Россия

ORCID*:<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

<http://orcid.org/0000-0001-7121-7651>, ilis83@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4698-2412>denvorontsov@yandex.ru

Резюме: Развитие современного мира напрямую зависит от развития транспортной инфраструктуры. Одним из видов транспортировки является трубопроводные системы, предназначенные в основном для доставки жидкости из одного региона в другой. Наиболее популярные – это водопроводы, нефтепроводы и газопроводы. Водопроводы обычно располагаются в густо населенных районах, в то время как нефтепроводы часто расположены в труднодоступных районах, например в районах Крайнего Севера. Как правило, такие территории не имеют централизованного электроснабжения, что создает дополнительные трудности с обеспечением их функционирования. В основном, в качестве источников электроэнергии в таких регионах выступают дизельные генераторы. На основании анализа технологического цикла транспортировки нефти авторами предложен определенный способ увеличения его энергоэффективности и повышения надежности. Целью данной работы является разработка мероприятий по повышению энергоэффективности и надежности работы электрооборудования собственных нужд на нефтепроводах. Для достижения поставленной цели предлагается произвести замену дизельных генераторов, используемых в настоящее время, на установки на базе возобновляемых источников энергии. В частности, предлагается использовать ветро-солнечные установки в качестве основных источников питания, в то время как дизельные генераторы использовать в качестве резервных источников энергии. В статье приводится технико-экономическое обоснование данного мероприятия, а также предложены конкретные технические решения для его реализации. Реализация предложенного мероприятия позволит, прежде всего, уменьшить затраты на топливо, а также повысить категорию надежности аварийной задвижки с третьей до первой.

Ключевые слова: изолированные системы электроснабжения, возобновляемые источники энергии, дизельный генератор, надежность электроснабжения.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -70-79

USE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY FOR NUTRITION OF OWN REQUIREMENTS OF OIL PIPELINE

K.V. Suslov¹, I.N. Shushpanov¹, D.V. Vorontsov²

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²IrkutskGubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

<http://orcid.org/0000-0001-7121-7651>, ilis83@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4698-2412>denvorontsov@yandex.ru

Abstract: *The development of the modern world directly depends on the development of transport infrastructure. One of the types of transportation is the pipeline system, they are designed mainly for the delivery of liquid from one region to another, the most popular pipelines are oil pipelines and gas pipelines. Water pipelines are usually located in densely populated areas, while oil pipelines are often located in hard-to-reach areas, for example, in the regions of the Far North. As a rule, such territories do not have a centralized power supply, which creates additional difficulties in ensuring their functioning. Generally, diesel generators are the source of electricity in such regions. Based on the analysis of the oil transportation cycle, the authors proposed a certain way to increase its energy efficiency and increase reliability. The aim of this work is increasing energy efficiency and reliability of electrical equipment for own needs in oil pipelines. To achieve this goal, it is proposed to replace diesel generators with plants using renewable energy sources. In particular, it is proposed to use wind-solar installations. These installations are supposed to be used as the main power sources, while diesel generators will be used as stand-by sources of energy. The article provides a feasibility study for this event, as well as specific technical solutions for its implementation. First of all, this event will reduce fuel costs. Also, this will increase the category of reliability of the emergency valve from the third to the first.*

Keywords: *isolated power supply systems, renewable energy sources, diesel generator, power supply reliability.*

Введение

На сегодняшний день Россия занимает значимую позицию в обеспечении баланса спроса и предложений на рынках нефти. С точки зрения перспективы развития нефтедобычи в России приоритетными регионами являются Дальний Восток и Восточная Сибирь. Соответственно возникает необходимость транспортировки нефти из данных регионов к потребителям, находящимся в промышленно развитых районах страны при помощи нефтепроводов. Как правило, такие территории, по которым прокладываются нефтепроводы, расположены в северных районах, где не всегда имеется возможность обеспечить централизованное электроснабжение, что создает дополнительные трудности с обеспечением их функционирования. Также стоит отметить, что в себестоимости транспортировки нефти до 23% операционных затрат составляют затраты на электрическую энергию. Поэтому целью данной работы является повышение энергоэффективности и надежности работы электрооборудования собственных нужд на нефтепроводах, расположенных в труднодоступных регионах страны.

Постановка задачи

На магистральных нефтепроводах используются шиберные и клиновые задвижки, предназначенные для перекрытия участков линейной части магистральных нефтепроводов в случае их повреждения, а также для технологической обвязки систем насосных станций, чистки и диагностирования магистральных трубопроводов и др. [1].

Согласно нормативным требованиям нефтепроводы 1 класса диаметром 1000 мм и более, должны иметь автоматические системы аварийного закрытия. Данные системы должны устанавливаться на расстоянии не более чем 20 км друг от друга. Средняя установленная электрическая мощность каждой задвижки составляет 11 кВт. Помимо аварийных задвижек параллельно с ними стоят пункты антикоррозийной защиты трубопроводов на основе электрохимической защиты (ЭХЗ), для питания данного

оборудования тоже необходима электроэнергия. В табл. 1 приведены данные по нагрузкам таких систем.

Таблица 1

Сводная ведомость нагрузок	
Потребители	Установленная мощность, кВт
Электропривод задвижек	3
Шкаф связи: информационно-коммуникационное оборудование	1
Телеметрия	5,8
Собственные нужды: обогрев, вентиляция, освещение	3
Оборудование электрохимической защиты (ЭХЗ)	2

Мощность, расходуемая на телеметрию и ЭХЗ, потребляется круглый год. Электроэнергия на обогрев используется только в холодное время года. Электропривод задвижек используется только в случае их срабатывания. Стоит отметить, что для срабатывания задвижек можно использовать электроэнергию, используемую на отопление. Это допустимо из соображений, что время срабатывания задвижек 2–7 с, и за это время температура оборудования не может измениться до критически низких значений. Один из вариантов решения – централизованное питание оборудования по линиям электропередачи. Однако прокладывать линии до установок экономически нецелесообразно, если взять линию высокого напряжения 110 кВ и выше, передавая мощность, не будет соответствовать классу напряжения. А в линиях более низкого напряжения будут очень большие падения напряжения, так в линии 10 кВ, на каждом километре они составляют 100 В.

В основном для электроснабжения устройств аварийной защиты используются дизельные генераторы мощностью 15 кВт, со средним потреблением топлива 5 л/ч. Однако для обеспечения их работы необходимо постоянное наличие топлива, что в условиях Восточной Сибири и Дальнего Востока весьма затруднительно и дорогостояще. Завоз топлива осуществляется либо зимой, либо на специальном гусеничном транспорте, что приводит к увеличению стоимости топлива в 2–3 раза по сравнению с розничными ценами. Дизельные генераторы достаточно хорошо показывают себя в эксплуатации, но в то же время обладают некоторыми принципиальными недостатками:

1. Возможно замерзание дизельного топлива при очень низких температурах.
2. Высокая стоимость транспортной составляющей для топлива.
3. Трудоемкость ремонта топливной аппаратуры и сложность технического обслуживания.
4. Дизельные генераторы очень чувствительны к качеству топлива и требуют постоянного мониторинга состояния узлов агрегата и работы двигателя.
5. Достаточно шумная работа дизель-генераторов.

В связи с тем, что затраты на обслуживание дизель-генератора высоки, а также имеется ряд других явных недостатков, связанных с их эксплуатацией, возникла необходимость рассмотреть возможность применения других источников электрической энергии для нужд электроснабжения задвижек.

Предлагаемое решение

Очевидным путем повышения энергоэффективности таких объектов является максимальное использование альтернативных и местных энергоресурсов. Предлагается использовать ветро-солнечные установки в качестве основного источника питания устройств аварийных задвижек. Генерация, основанная на возобновляемых источниках питания, носит стохастический характер, поэтому при ее использовании невозможно полностью отказаться от дизель-генераторов. Данные генераторы необходимо использовать в качестве резервных источников питания.

Существует достаточно много исследований по определению технико-экономической эффективности [2–5] и надежности [5; 6] таких систем. Но нет наработанных данных об опыте эксплуатации подобных установок в условиях Крайнего Севера.

Поэтому при эксплуатации систем на базе возобновляемых источников энергии в условиях экстремальных климатических условий возможно возникновение ряда непредвиденных событий.

Для определения надежной схемы электроснабжения аварийной задвижки после внедрения данных установок разработаны две принципиальные схемы совместной работы дизель-генератора и ветро-солнечной генерирующей установки (рис. 1 и 2) [7].

Рис. 1. Схема совместной работы дизель-генератора и ветро-солнечной установки на накопитель электрической энергии

Рис. 2. Раздельная работа дизель-генератора и ветро-солнечной установки

В первом варианте (рис. 1) ветро-солнечная генерирующая установка и резервный источник питания дизель-генератора подключены и работают на накопители энергии, после чего с них через инверторы осуществляется электропитание нагрузки, а именно аварийной задвижки. В нормальном режиме ветро-солнечная установка является основным источником питания. Для подключения ветрогенератора к сети используется специальный контроллер (блок-преобразователь). Помимо преобразования, данный блок позволит обеспечить совместную работу солнечных батарей и ветрогенераторов. В аварийном режиме, когда заряд на батареи не снижается ниже 20% от номинального значения, происходит замыкание ключа K1. К накопителям через выпрямители подключается дизель-генератор, который выдает в сеть ток промышленной частоты, а

также обеспечивает их зарядку. Это происходит до тех пор, пока величина заряда не достигнет 80% от номинального значения. После этого ключ К1 размыкается и продолжается работа предлагаемой схемы в нормальном режиме.

Во втором варианте (рис. 2) в нормальном режиме ветро-солнечная генерирующая установка подключена также к накопителю электрической энергии, после чего посредством инверторов осуществляется электроснабжение нагрузки, а именно приводов аварийных задвижек. Резервный источник, т.е. дизель-генератор, в данном случае в нормальном режиме при разомкнутом ключе К1 не работает. В аварийном режиме в случае, если величина заряда накопителя становится ниже 20% от номинального значения, происходит замыкание ключа К1 и размыкание ключа К2. Электроснабжение аварийной задвижки будет осуществляться напрямую с дизельного генератора. Работа в аварийном режиме продолжается до тех пор, пока заряд на накопителях не достигает 80% от номинального значения. В этом случае происходит размыкание ключа К1, а ключ К2 замыкается. После этого работа данной схемы продолжается в нормальном режиме. Для обеспечения заданного цикла необходима установка автоматического ввода резерва (АВР).

В обоих вариантах предусмотрено:

- в зимний период времени постоянный обогрев солнечных батарей, подогрев дизельного топлива и вращающего механизма ветрогенератора;
- повышение категории надежности аварийной задвижке с третьей до первой.

Было проведено моделирование представленных вариантов в среде *Matlab*, и был сделан вывод о том, что первый вариант является предпочтительным для надежной и безотказной работы комплекса ветро-солнечной и дизельной установки.

Экономическая эффективность предложенных мероприятий будет выражаться в уменьшении затрат на топливо для дизельных генераторов.

Материал и методы исследования

Материалами для проведения исследования стали данные, предоставленные ООО «Таас-Юрях нефтегазодобыча».

Апробацию данного метода на трубопроводе, соединяющим месторождение Таас-Юрях в республике Саха (Якутия) с магистральным нефтепроводом Восточная Сибирь – Тихий океан, длиной 160 км и объемом перекачки нефти до 5 тыс. т/г (рис. 3).

Рис. 3. Трубопровод месторождения Таас-Юрях – НПС № 12 (нефтепровод ВСТО)

На данный момент электроснабжение аварийных задвижек осуществляется дизель-генераторами марки АД-10С-Т400-1РМ18 *TCC PERKINS* (15 кВт) с расходом топлива 5 л/ч.

В общем случае минимальное количество аварийных задвижек трубопроводе:

$$n = L_{\text{тр}}/20,$$

где $L_{\text{тр}}$ – длина трубопровода.

На нефтепроводе Таас-Юрях – ВСТО установлено 9 аварийных задвижек. Это обусловлено тем, что по длине нефтепровода имеются переходы через речные преграды.

Годовые расходы на топливо рассчитываются по следующей формуле:

$$C_t = n \cdot q \cdot t \cdot C,$$

где q – удельный расход топлива, л/ч; t – время работы дизель-генератора; C – стоимость 1 литра топлива с учетом доставки.

При стоимости дизельного топлива 70 рублей за литр годовые расходы составят 16,56 млн руб. По данным, предоставленным ООО «Таас-Юрях нефтегазодобыча», затраты на обслуживание дизель-генераторов данного участка: капитальный ремонт, замену масла, замену фильтров, замену ремня ГРМ – составляют 1,56 млн руб. в год.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выбора солнечных батарей и ветрогенераторов необходимо знать количество солнечного излучения вдоль трубопровода и среднюю скорость ветра. Входными данными для расчета служат координаты местности, где проложен нефтепровод. В качестве исходных данных для расчета используется информация, имеющаяся на специализированном сайте (табл. 2) [8].

Таблица 2

Результаты расчета основных климатических показателей

Параметр	Среднегодовое значение	Размерность
Относительная влажность	66,1	%
Ежедневный уровень инсоляции	2,88	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \frac{1}{\text{сут.}}$
Атмосферное давление	97,2	кПа
Скорость ветра	3,2	м/с

Годовой уровень инсоляции составляет $1051,2 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \frac{1}{\text{сут.}}$:

Среднегодовая скорость ветра 3,2 м/с.

Для определения оптимальных мощностей солнечных батарей и ветрогенератора использовалась программа [9].

В программе заложен следующий алгоритм работы (рис. 4):

- задаются климатические параметры региона, при котором предполагается использование СВУ (солнечная инсоляция по месяцам, скорость ветра максимальная и средняя по месяцам);
- задаются активные мощности СВУ и ДГУ, выбор которых необходимо проверить;
- задаётся активная нагрузка потребителя электроэнергии;
- задаются экономические показатели для анализа эффективности внедрения источников альтернативной энергии;
- выполняется расчет, и на выходе выдаются графики генерация-нагрузка, на основании которых производится анализ эффективности выбранных мощностей генерации.

Рис. 4. Алгоритм расчета, используемый в программе

По приближенным расчетам подобраны мощности СВУ. Мощность солнечных батарей составила 10, а ветрогенераторов – 15 кВт. Для проверки оптимальности предлагаемых мощностей при помощи этого же программно-вычислительного комплекса строится график заполнения нагрузки.

Рис. 5. Полученные графики электрогенерации при совместной работе солнечных батарей и ветрогенераторов

График нагрузки построен для периода зимнего максимума на основании эксплуатационных данных, практически постоянный, в него включена нагрузка на обогрев всех устройств. Графики ветро- и солнечной генерации также приведены для периода зимней недели, когда наблюдается самый короткий дневной цикл и практическое безветрие.

На основании табл. 2 и рис. 5 были выбраны солнечно-ветровая энергоустановка *HYWS-25K* с установленной мощностью солнечных батарей 10 кВт и ветрогенераторов общей мощностью 15 кВт, а также с применением накопителей электрической энергии. Данная мощность, с учетом стохастического характера генерации, позволит полностью покрыть график нагрузки электропотребления аварийной задвижки (рис. 5). Комплектация установки представлена в табл. 3.

Таблица 3

Комплектация установки			
№	Детали	Количество / K_i	Цена, руб.
1	Ветрогенератор HY-1000L110	15 шт.	32000
2	Солнечные модули 100 Вт/12 В	100 шт.	27000
3	Аккумулятор Свинцово-кислотный с регулируемым клапаном / 1000 А·ч/12 В	92 шт.	3500
4	Система управления со встроенным преобразователем	2 шт.	300000
5	Башня из алюминия 3000 Вт/9 м	15 компл.	72800
6	Портативный солнечный кронштейн 3 × 2	21 компл.	7000
7	Электрический кабель	1 компл.	150000
8	Техническое помещение	1 компл.	70000

Стоимость установки рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{уст}} = r \cdot n \cdot \sum_{i=1}^8 K_i \cdot C_i,$$

где n – количество аварийных задвижек по длине трубопровода; $r = 1,2$ – коэффициент, учитывающий транспортировку материалов до места установки.

В результате расчетов установлено, что стоимость установок для обеспечения электроснабжения всех задвижек, устанавливаемых на данном нефтепроводе, составляет 60,97 млн рублей.

Опытным путем с использованием программно-вычислительного комплекса [9] и с учетом того, что использование дизель-генератора будет происходить в зимний период времени, когда будет максимальная нагрузка и самый короткий дневной цикл, определено: после установки солнечных батарей для резервирования электроснабжения аварийных задвижек произойдет существенное снижение потребления топлива. В частности, как показывают расчеты, экономия топлива составит 80%.

Срок окупаемости T определяется с учетом того, что затраты на амортизацию и обслуживание в обоих вариантах одинаковые.

$$T = \frac{C_{\text{уст.}}}{C_t + C_0 - C_t^*},$$

где $C_{\text{уст.}}$ – стоимость установки; C_0 – стоимость обслуживания; C_t^* – стоимость топлива после внедрения СВУ. Таким образом, срок окупаемости составляет 4,12 года.

В связи с изложенным, замена дизель-генераторов на солнечно-ветровые установки для снабжения электроэнергией оборудования собственных нужд нефтепроводов является перспективной инициативой. Она позволяет экономить на стоимости топливной составляющей, с учетом дополнительных расходов, связанных с его транспортировкой в труднодоступные места. Также данное мероприятие полностью окупаемо в достаточно короткий срок, что является одним из ключевых пунктов при реализации любых проектов.

Выводы

Предлагаемый подход является универсальным. Он может быть применен во всех проектах по внедрению СВУ как основного источника питания для электроснабжения собственных нужд не только нефтепроводов, но и изолированных территорий, например вахтовых поселков. Замена дизель-генератора на солнечно-ветровые установки позволяет не только существенно сократить расходы на топливную составляющую при генерации, но и обеспечить лучшие экологические показатели. Данное улучшение достигается за счет снижения выбросов CO_2 , NO_x и др. в атмосферу за счет использования возобновляемых источников энергии при электроснабжении данных потребителей. Повышение надежности электроснабжения обеспечивается за счет диверсификации источников энергии, тем более что дизельные генераторы в данном случае используются в качестве резервных. Предлагаемый подход также дает возможность определить необходимый состав и мощность генераторов на базе возобновляемых источников электроэнергии, а также параметры накопителей электрической энергии в зависимости от величины нагрузки, а также географических координат установки.

Литература

1. Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. М.: Недра, 1990. 427 с.
2. Li Y., Cai W., Wang C. Economic Impacts of Wind and Solar Photovoltaic Power Development in China // *Energy Procedia*, Volume 105, May 2017, P. 3440–3448.
3. Fathabadi H. Novel standalone hybrid solar/wind/fuel cell power generation system for remote areas // *Solar Energy*, Volume 146, April 2017, P. 30–43.
4. Petrakopoulou F. On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions // *Energy Conversion and Management*, Volume 118, 15 June 2016, P. 63–74.
5. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system // *Energy*, Volume 115, Part 1, 15 November 2016, P. 1022–1041.

6. Acuña L.G., Padilla R.V., Alcides Santander Mercado Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator // Renewable Energy, Volume 106, June 2017, P. 68–77.

7. Воронцов Д.В., Уколова Е.В., Шушпанов И.Н. Виртуальные станции для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 9 (116). С. 86–94.

8. Официальный сайт НАСА [Электронный ресурс]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения 25.03.2017).

9. Программа определения оптимальных параметров функционирования изолированной энергетической системы / Т.В. Сокольникова, К.В. Суслов, П. Ломбарди, Гэ Хиубей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612112, дата гос.рег. 15.02.17.

10. Ямуров Н.Р., Крюков Н.И., Кускильдин Р.А. Промышленная безопасность в системе магистральных нефтепроводов. М.: Изд-во РАЕН, 2001. 159 с.

Авторы публикации

Суслов Константин Витальевич – канд. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Шушпанов Илья Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

Воронцов Денис Валерьевич – магистрант Российского государственного университета (РГУ) нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

References

1. Boyko V.S. Development and operation of oil fields. M.: Nedra, 1990. 427 p.
2. Li Y., Cai W., Wang C. Economic Impacts of Wind and Solar Photovoltaic Power Development in China // Energy Procedia, Volume 105, May 2017, Pages 3440-3448
3. Fathabadi H. Novel standalone hybrid solar/wind/fuel cell power generation system for remote areas // Solar Energy, Volume 146, April 2017, Pages 30-43
4. Petrakopoulou F. On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions // Energy Conversion and Management, Volume 118, 15 June 2016, Pages 63-74
5. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system // Energy, Volume 115, Part 1, 15 November 2016, Pages 1022-1041
6. Acuña L.G., Padilla R.V., Alcides Santander Mercado Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator // Renewable Energy, Volume 106, June 2017, Pages 68-77
7. Vorontsov D.V., Ukolova E.V., Shushpanov I.N. Virtual stations for power supply of emergency valves of main oil pipelines. Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20. No. 9 (116). Pp. 86-94.
8. Official site of NASA [Electronic resource]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (circulation date 25.03.2017)
9. Program for determining optimal parameters for the functioning of an isolated energy system / T.V. Sokolnikova, K.V. Suslov, P. Lombardi, Ge Hubei. Certificate of state registration of computer program No. 2017612112, date of state registration. 15.02.17
10. Yamurov N.R., Kryukov N.I., Kuskildin R.A. Industrial safety in the system of main oil pipelines. Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Natural Sciences, 2001. 159 p.

Authors of the publication

Konstantin Suslov – cand. sci. (techn.), professor, department of power supply and electrotechnic, Irkutsk

National Research Technical University

Ilia Shushpanov – cand. sci. (techn.), associate professor, department of power supply and electrotechnic, Irkutsk National Research Technical University

Denis Vorontsov – master student, the Russian State University of Oil and Gas (NIU). I.M. Gubkin.

Поступила в редакцию

17 января 2018 г.