DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

УДК 621.314.58

Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности

А.А.БЕЛЬСКИЙ[1], **В.С.ДОБУШ**[1], **ШАЙБАН ФУАД ХАЙКАЛ**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Ливанский университет, Бейрут, Ливанская Республика*

В статье рассматривается опыт эксплуатации ветроэнергетического комплекса с ветроэлектрической установкой малой мощности (5 кВт), применение которого перспективно для электроснабжения удаленных объектов нефтедобычи, геологоразведочных и других видов работ по добыче полезных ископаемых. Приведена структура исследуемого комплекса и его характеристики, технические проблемы, возникшие при эксплуатации в течение 6 лет. Рассмотрены элементы ветроэнергетического комплекса – регулятор заряда аккумуляторных батарей и инвертор-преобразователь. Рассмотрены последствия выхода из строя механического регулятора заряда аккумуляторных батарей и представлены рекомендации по его замене. Подробно освещены вопросы диагностики и ремонта одного из основных элементов комплекса – инвертора-преобразователя, его составной части – звена постоянного тока. Представлены осциллограммы выходного напряжения инвертора-преобразователя при различной емкости звена постоянного тока и приведены изображения отремонтированного инвертора-преобразователя. Даны рекомендации по выбору инвертора-преобразователя и настройке режимов работы ветроэнергетического комплекса.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения; звено постоянного тока; ветроэлектрическая установка; ветроэнергетика; аккумуляторная батарея

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00530.

Как цитировать эту статью: Бельский А.А. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности / А.А.Бельский, В.С.Добуш, Шайбан Фуад Хайкал // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 564-569. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

Введение. По данным мировой ассоциации ветроэнергетики (World Wind Energy Association) 2017 г. установленная мощность ветроэлектрических установок (ВЭУ) равна 539,3 ГВт. В основном мощные ВЭУ (более 2 МВт) объединены в ветропарки и работают параллельно с сетью [13, 14]. В сфере малой ветроэнергетики, по данным WWEA, на 2017 г. количество малых ВЭУ (единичная мощность установки менее 100 кВт) в мире превысило 1 млн. Этот сектор в основном используется для электроснабжения частных лиц и организаций.

В РФ потенциальным владельцем малых ВЭУ является население малозаселенных территорий, находящееся вне досягаемого централизованного энергоснабжения, что составляет около 70 % территорий страны [2, 4]. Созданы условия развития ветроэнергетики: нормативно-правовая база и нормативно-техническая документация. В 2007 г. были приняты поправки к Федеральному закону «Об электроэнергетике», заложившие рамочные основы развития отрасли. В 2013 г. Правительство РФ подписало пакет мер по поддержке использования возобновляемых источников энергии [7, 8]. Также следует отметить перспективность применения маломощных ВЭУ для электроснабжения удаленных объектов нефтедобычи [9-11], геологоразведочных и других видов работ, относящихся к добыче полезных ископаемых.

Несмотря на это, в настоящее время опыта эксплуатации маломощных ВЭУ недостаточно и не освещены проблемы при работе с ними. Информация по решению возникающих проблем также отсутствует.

Постановка проблемы. Горным университетом в 2012 г. был приобретен ветроэнергетический комплекс на базе малой ВЭУ «Бриз 5000» производства ЗАО «Ветроэнергетическая компания» (Санкт-Петербург). Комплекс предназначен для проведения научных работ, автономного электроснабжения наружного освещения территории учебной опытно-экспериментальной базы университета с последующей оценкой эффективности данных систем. За 6 лет использования комплекса с малой ВЭУ был накоплен значительный опыт по эксплуатации.

Во время эксплуатации ветроэнергетического комплекса были выявлены многочисленные проблемы с силовым и регулирующим оборудованием [3]. Недостатки в работе оборудования

DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

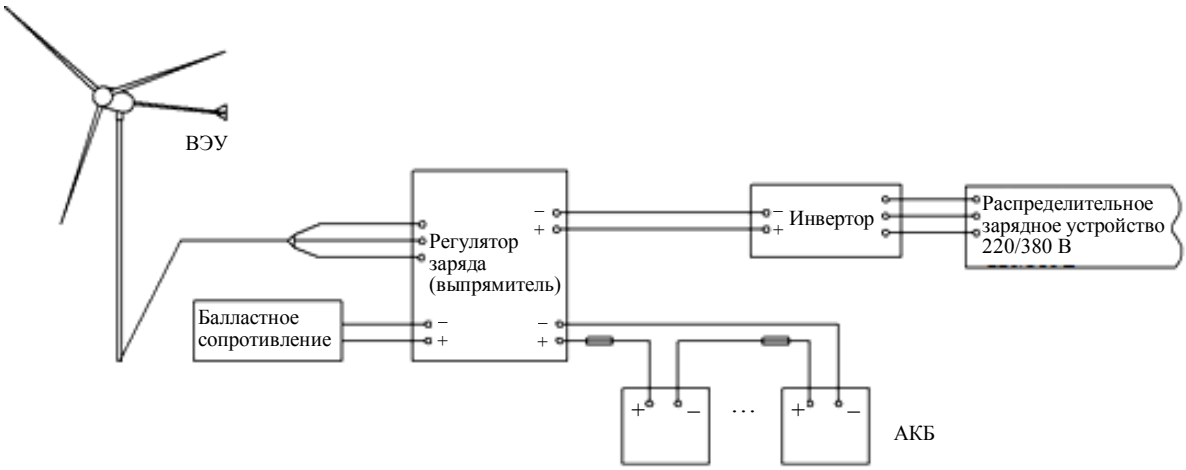

Рис.1. Схема ветроэнергетического комплекса

привели к выходу из строя регулирующей аппаратуры, инвертора и АКБ. Целью работы, результаты которой представлены в статье, является выявление причин выхода из строя оборудования, а также описание особенностей, связанных с этим ремонтных работ.

Методология исследований. Основными элементами ветроэнергетического комплекса являются: ВЭУ «Бриз 5000», кислотно-гелиевые аккумуляторные батареи (АКБ), автономный инвертор, регулятор заряда с выпрямителем (рис.1). Технические характеристики ветроэнергетического комплекса:

Номинальная мощность…….. 5 кВт
Номинальная (расчетная) скорость ветра… 12 м/с
Диаметр ротора (размах лопастей)……... 5 м
Количество лопастей……... 3 шт.
Высота мачты…….. 15 м
Тип электрического генератора……. Синхронный трехфазный с возбуждением от постоянных магнитов
Номинальная частота вращения ветроколеса…….. 400 об/мин
Защита от перезаряда АКБ……. Релейная, с переключением на балластное сопротивление
Напряжение звена постоянного тока……. 48 В
Параметры АКБ, количество…….. Кислотно-гелиевая; необслуживаемая; 12 В, 200 А·ч, 4 шт., срок эксплуатации 7 лет
Параметры инвертора……. $U_{вх}$ = 40-60 В (пост.); $U_{вых}$ =230 В (перем.); мощность 6 кВт
Мощность балластного сопротивления…. 6 кВт

При вращении лопастей ВЭУ вырабатывает переменное напряжение частотой 10-100 Гц, которое через неуправляемый выпрямитель подается на АКБ. Регулятор заряда, в свою очередь, контролирует напряжение на АКБ и, если оно превышает 60 В, с помощью тиристорного ключа переключает ВЭУ на балластное сопротивление. При понижении напряжения менее 56 В происходит обратное переключение и АКБ продолжают заряжаться.

В представленной схеме особое внимание следует уделить регулятору заряда. Это устройство предназначено для контроля и индикации величины зарядного тока и напряжения аккумуляторных батарей, отключения батарей от источников питания при достижении предельного значения напряжения.

В ветроэнергетическом комплексе используется инвертор-преобразователь Tripp Lite APSX 6048 VR (рис.2). В составе комплекса инвертор работает на выходную нагрузку в режиме инвертирования напряжения DC/AC. Инвертор-преобразователь имеет возможность дистанционного контроля и управления посредством последовательного интерфейса RS-232. Основные параметры настраиваются вручную с помощью DIP-переключателей под конкретные условия работы. Характеристики инвертора-преобразователя Tripp Lite APSX 6048 VR:

DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

Рис.2. Инвертор-преобразователь Tripp Lite APSX 6048 VR

Рис.3. Печатная плата инвертора с конденсаторами звена постоянного тока

Номинальная выходная мощность……	6000 ВА
Кратковременная выходная мощность….	12000 Вт
Номинальное выходное напряжение……	208/230 В
Погрешность выходного напряжения…..	±5 %
Частота на выходе……..	50 Гц ± 0,3 %
Номинальное входное напряжение……..	48 В
Максимальный входной ток…….	30 А
Ток зарядки…….	23 или 90 А
Диапазон рабочих температур……..	от 0 до +40 °С
Масса……	48 кг

Одно из существенных замечаний в ходе эксплуатации комплекса – отсутствие резервирования и дублирования электромеханического реле в регуляторе заряда, отвечающего за подключение балластного сопротивления, тем самым управляющего ходом заряда АКБ. Также актуально было бы применение твердотельного реле вместо электромеханического, так как у данного типа реле выше предельная частота коммутации.

В течение года произошел износ и выход из строя электромеханического реле. Это привело к отсутствию переключения на балластное сопротивление при достижении предельного значения напряжения в 60 В (58 В). В результате АКБ перезарядились до напряжения, превышающего номинальное значение. Перезаряд АКБ, в свою очередь, вызвал выход из строя звена инвертора.

Диагностика и ремонт. В ходе первичной диагностики инвертора при замерах RLC-метром на входных клеммах было обнаружено короткое замыкание. Разбор и последовательная диагностика составных элементов инвертора показали, что из строя вышел блок конденсаторов на входе инвертора (24 шт., включены параллельно). Параметры конденсатора: емкость 470 мкФ, рабочее напряжение 63 В. Печатная плата, на которой они располагались, крепилась к верхней части корпуса (рис.3).

Под платой находится кожух для защиты остальных элементов устройства при пробое конденсаторов и утечке электролита, который может вызвать короткое замыкание в схеме. Производителем не предусмотрена возможность замены конденсаторов, а сами элементы имеют достаточно компактное расположение под радиатором.

Блок конденсаторов на входе инвертора выполняет следующие функции:

• снижение высокочастотных пульсаций напряжения, возникающих при подключении выпрямителя на вход инвертора, что повышает качество выходного напряжения, так как алгоритмы управления силовыми ключами, как правило, не учитывают пульсации входного напряжения;

• снижение высокочастотных перенапряжений, вызванных коммутацией силовых ключей при работе инвертора на активно-индуктивную и индуктивную нагрузку, которые могут привести к отказу силовых модулей.

• снижение высокочастотных пульсаций тока на АКБ, возникающих при работе инвертора.

DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

Частота высокочастотной составляющей напряжения определяется частотой коммутации и алгоритмом работы силовых ключей инвертора. Уровень пульсации напряжения в звене постоянного тока определяется типом выпрямителя, частотой коммутации и алгоритмом работы силовых ключей инвертора, характером нагрузки электрического преобразователя и величиной емкости самого конденсатора, установленного в звене постоянного тока.

Так как в составе ветроэнергетического комплекса на вход инвертора подается постоянное напряжение с АКБ, то основной функцией конденсатора является снижение перенапряжений, обусловленных коммутацией силовых ключей (рис.4).

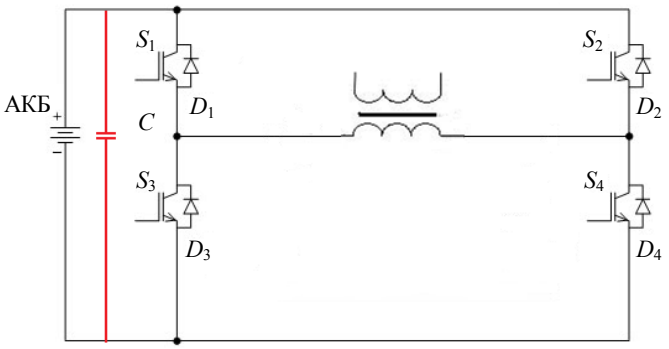

Рис.4. Упрощенная схема силовой части инвертора

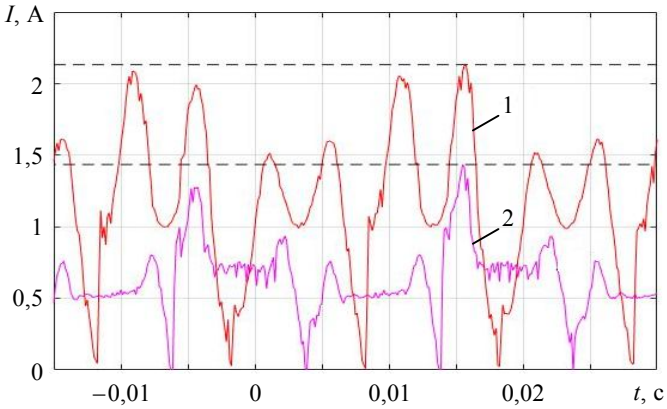

Рис.5. Осциллограммы тока АКБ без блока (1) и с блоком (2) конденсаторов

При анализе работы ключей инвертора на активно-индуктивную нагрузку можно сделать вывод, что перенапряжения в звене постоянного тока вызваны процессом заряда емкости конденсатора со стороны нагрузки в те моменты, когда ток, протекающий по нагрузке, протекает через оба обратных диода инвертора. Время, в течение которого ток протекает через оба обратных диода, зависит от алгоритма работы ключей инвертора. Задавшись этим алгоритмом и зная величину выходного тока и характер нагрузки инвертора, можно определить величину коммутационных перенапряжений в функции емкости накопительного конденсатора звена постоянного тока согласно второму закону коммутации, представив его разностными уравнениями:

$$\Delta U_{\text{с}} = I_{\text{н}} \frac{\Delta t}{c},$$

или, выразив величину емкости накопительного конденсатора для обеспечения допустимого выброса напряжения в звене постоянного тока,

$$C = I_{\text{н}} \frac{\Delta t}{\Delta U_{\text{с}}},$$

где C – емкость конденсатора; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки, протекающий в момент работы двух диодов; Δt – время протекания тока через обратные диоды; $\Delta U_{\text{с}}$ – уровень пульсации напряжения на конденсаторе.

При замене блока конденсаторов параметры, от которых зависит необходимая емкость конденсатора, не изменились, следовательно, новую емкость необходимо выбирать не меньше, чем заложенную при проектировании (11,28 мФ).

Для проверки работы инвертора с новым блоком конденсаторов инвертор был подключен на активно-индуктивную нагрузку мощностью 50 Вт. Были сняты осциллограммы тока на АКБ, выходного напряжения и тока. Рассматриваемые осциллограммы (рис.5) показывают, что ток АКБ при работе с инвертором без конденсаторов достигает значения 2,13 А, а в случае наличия блока конденсаторов ток не поднимается выше 1,43 А. На рис.4 не представлены высокочастотные помехи, которые присутствовали в осциллограмме тока АКБ при работе с инвертором без конденсаторов, так как их отображение мешало бы восприятию осциллограмм.

DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564

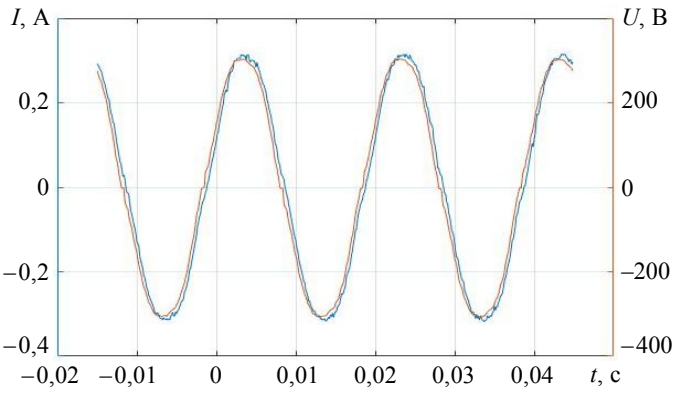

Рис.6. Осциллограммы выходного напряжения и тока

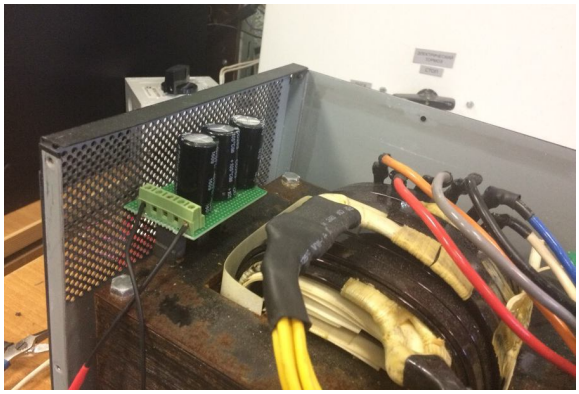

Рис.7. Новый блок конденсаторов, вынесенный на отдельную плату

Таким образом, новый блок конденсаторов выполняет функции, отмеченные ранее.

На рис.6 представлены осциллограммы, полученные с выхода инвертора. Выходные переменные (напряжение и ток) представляют собой синфазные практически идеальные синусоиды. При изменении емкости звена постоянного тока форма и амплитуда выходного тока и напряжения не изменились.

Новый блок конденсаторов (3 шт., включены параллельно) с суммарной емкостью 14,1 мФ и рабочим напряжением 63 В, закреплен на отдельной плате, вынесенной в другую часть корпуса (рис.7). В результате: повысилась ремонтопригодность инвертора; отсутствует вероятность повреждения компонентов печатных плат из-за попадания на них электролита при повреждении конденсаторов.

Рекомендации по выбору инвертора. В случае использования малообслуживаемых ВЭУ малой мощности особое внимание следует уделять выбору автономного инвертора напряжения [1, 5, 6, 12, 15], основными характеристиками которого являются: номинальная выходная мощность, выходное и входное напряжение, номинальный входной ток, вид выходного сигнала (меандр или синус).

Помимо перечисленных характеристик, необходимо обращать внимание на следующие факторы:

• Защита от перезаряда. Встроенная защита от перенапряжения на входных клеммах инвертора позволит избежать выхода его из строя при отказе регулятора заряда, который обеспечивает переключение генерации ВЭУ на балластное сопротивление при перезаряде АКБ.

• Энергоэффективность. Характеризует потери энергии в инверторе при преобразовании постоянного напряжения в переменное и определяется отношением мощности на выходе к мощности на входе. Данный параметр должен входить в техническую документацию инвертора. Предпочтение следует отдавать инверторам, имеющим большее значение энергоэффективности в широком диапазоне напряжений.

• Настраиваемые параметры включения и отключения нагрузки. При наличии этой функции существует возможность автоматической коммутации нагрузки в зависимости от напряжения на АКБ, что позволит защитить АКБ от глубокого разряда и продлить срок их службы.

Заключение. В работе представлены структура, характеристики и особенности эксплуатации ВЭУ малой мощности. Особое внимание уделено функционированию инвертора, который является одной из главных составляющих ВЭУ. По результатам диагностики инвертора выявлены неполадки в звене постоянного тока – короткое замыкание конденсаторов. Также представлены осциллограммы тока, протекающего по аккумуляторным батареям, при различной емкости звена постоянного тока. На основе представленных зависимостей сделан вывод о необходимости установки конденсаторов для уменьшения пульсации тока, протекающего по аккумуляторным батареям. На основе опыта эксплуатации даны общие рекомендации по выбору автономного инвертора.

DOI: *10.31897/PMI.2019.5.564*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамович Б.Н.* Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса / Б.Н.Абрамович, А.А.Бельский // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 227-230.

2. *Абрамович Б.Н.* Интеллектуальная система комплексного мониторинга использования энергоресурсов и контроля уровня качества электрической энергии в условиях распределенной генерации на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии / Б.Н.Абрамович, Ю.А.Сычев // Промышленная энергетика. 2014. № 12. С. 40-44.

3. *Бельский А.А.* Опыт использования ветроэнергетической установки малой мощности «Бриз-5000» / А.А.Бельский, Э.Х.Муратбакеев // Современная техника и технологии. 2015. № 5 (45). С. 63-68.

4. Выбор емкости конденсатора звена постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты с инвертором напряжения / Ф.А.Гельвер, Н.В.Белоусова, В.Ф.Самосейко, А.В.Саушев // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II Международной научной конференции. СПб, 2014. С. 44-47.

5. *Квитко А.В.* Расчет мощности и выбор основных функциональных узлов ветроэлектрической установки / А.В.Квитко, А.А.Гончаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 98 (04). http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/25.pdf

6. *Квитко А.В.* Автономные ветроэлектрические установки и системы / А.В.Квитко, Я.А.Семенов, Г.С.Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112 (08). http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/72.pdf

7. О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности: Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 / Собрание законодательства. 2013. № 449.

8. О внесении изменений в Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года: Распоряжение Правительства РФ от 28.06.13 / Собрание законодательства. 2013. № 861-р.

9. *Malarev V.Yu.* Electric Power Supply System Development for Down-hole Electric Steam Generators to Produce High-viscosity Oil / V.Yu.Malarev, A.V.Kopteva, V.Yu.Koptev; 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, Russia, 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602954

10. *Koptev V.Yu.* Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency / V.Yu.Koptev, A.V.Kopteva; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 2. DOI:10.1088/1755-1315/87/2/022010

11. *Koptev V.Yu.* Developing an Ecological Passport for an Open-Pit Dump Truck to Reduce Negative Effect on Environment / V.Yu.Koptev, A.V.Kopteva; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 66. Iss. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012009

12. *Wang Y.* Design and research of an inverter for a small wind power generation system / Y.Wang, S.Hu; IEEE Fifth International Conference on Advanced Computational Intelligence. 2012. Vol. 32. № 23. P. 937-940. DOI: 10.1109/ICACI.2012.6463309

13. *Shklyarskiy Ya.E.* The compensation criterion of overload neutral wire current in low voltage electrical networks / Ya.E.Shklyarskiy, A.Ya.Shklyarskiy, A.A.Belitskiy // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus. 2017. № 7910728. P. 1012-1015.

14. *Shklyarskiy Ya.E.* Registration of reactive power for case of distortions in electric grid / Ya.E.Shklyarskiy, A.Ya.Shklyarskiy // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 3. № 032041.

15. Inverter control of an isolated small scale wind power generation system / S.Y.Yang, X.Zhang, L.Chen, Z.Xie, R.X.Cao // Automation of electric power systems. 2008. Vol. 2. № 23. P. 95-99.

***Авторы*: А.А.Бельский,** *канд. техн. наук, доцент, abelskij@gmail.com* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **В.С.Добуш,** *канд. техн. наук, доцент, griimov@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Шайбан Фуад Хайкал,** *д-р техн. наук, директор инженерного факультета, chaibanhaykal@hotmail.com* (*Ливанский университет, Бейрут, Ливанская Республика*).

Статья поступила в редакцию 23.01.2019.
Статья принята к публикации 5.02.2019.