

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.31

<http://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.2>

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ МИНИГРИД ПОСТОЯННО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Джэндубаев Эдуард Абрек-Заурович

Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, 355017, Ставрополь, Российская Федерация)
dzhendubaev-1@yandex.ru, Researcher ID: IUO-8685-2023.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с достоинствами электроэнергетики постоянно-переменного тока по сравнению с существующей электроэнергетикой переменного тока. В качестве примера рассматривается минигрид постоянно-переменного тока, в состав которой входят: газотурбинный двигатель, ротор которого вращается с частотой 12000 об/мин; быстроходный четырехполюсный асинхронный генератор с конденсаторным самовозбуждением с частотой ЭДС около 400 Гц в режиме холостого хода; повышающий трансформатор (400 Гц) с выпрямителем и фильтром, подключенными ко вторичной обмотке; линия постоянного тока; понижающий полупроводниковый трансформатор постоянного тока, к которому подключается нагрузка постоянного тока. Приведены известные выражения, а также результаты расчетов, которые подтверждают возможность существенного улучшения массогабаритных и технико-экономических показателей минигридов постоянно-переменного тока по сравнению с минигридами переменного тока. Оценочными расчетами показано, что эффективность предложенного технического решения зависит от доли «скрытых» потребителей постоянного тока и удаленности генератора от нагрузки.

Ключевые слова: минигрид постоянно-переменного тока, газотурбинная установка, быстроходный асинхронный генератор, полупроводниковый трансформатор постоянного тока, ЛЭП постоянного тока, выпрямитель, инвертор

Для цитирования: Джэндубаев Э.А.-З. Техничко-экономические аспекты построения минигрид постоянно-переменного тока // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2023. № 4 (97). С. 14–26. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.2>

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90127

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023;

одобрена после рецензирования 23.06.2023;

принята к публикации 30.06.2023.

Research article

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF DC-AC MINIGRID CONSTRUCTION

Eduard A.-Z. Dzhendubaev

North-Caucasus Federal University (1, Pushkin st., 355017, Stavropol, Russian Federation)
1dzhendubaev-1@yandex.ru, Researcher ID: IUO-8685-2023.

Abstract. The article deals with issues related to the advantages of AC power industry in comparison with the existing AC power industry. As an example, a DC-AC minigrid is considered, which includes: a gas turbine engine, the rotor of which rotates at a frequency of 12000 rpm; high-speed four-pole asynchronous generator with capacitor self-excitation and EMF frequency of about 400 Hz in idle mode; step-up transformer (400 Hz), to the secondary winding of which a rectifier with a filter is connected; DC power lines; a step-down semiconductor DC transformer to which a DC load is connected. Known expressions are given, as well as the results of calculations, which confirm the possibility of a significant improvement in weight, size and technical and economic indicators of DC-AC minigrids compared to AC minigrids. Estimated calculations show that the effectiveness of the proposed technical solution depends on the proportion of “hidden” DC consumers and the remoteness of the generator from the load.

Keywords: DC-AC minigrid, gas turbine plant, high-speed asynchronous generator, DC semiconductor transformer, DC power line, rectifier, inverter.

For citation: Dzhendubaev, EA. Technical and economic aspects of dc-ac minigrid construction. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2023;4(97):14–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.4.2>

Funding: The study was carried out with financial support RFBR in the framework of scientific project No. 20-38-90127.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 13.06.2023;

approved after reviewing 23.06.2023;

accepted for publication 30.06.2023.

Введение / Introduction. Известно, что реализация идей и изобретений М.О. Доливо-Добровольского, в виде трехфазных: синхронных генераторов, асинхронных двигателей, стержневых трансформаторов, линий электропередач (ЛЭП) привела к созданию в 1891 г. первой в мире трехфазной электроэнергетической системы. С тех пор электроэнергетические системы не претерпели существенных изменений, если не принимать в расчет создание дальних высоковольтных линий передач постоянного тока. Поразительным является то, что М.О. Доливо-Добровольский в одной из последних своих работ показал границы возможностей дальних трехфазных ЛЭП, а будущее развитие ЛЭП он видел в дальних электропередачах постоянным током высокого напряжения по подземным кабелям. Эта его идея была реализована спустя десятки лет [1].

В настоящее время кабельные линии постоянного тока получили распространение в основном при передаче электроэнергии через проливы и моря, а также в стесненных городских условиях, причем, критическая длина линии, при которой ее строительство и эксплуатация становится экономически оправданным, по сравнению с кабельной линией переменного тока, составляет 30–50 км [2]. Критическая длина воздушных линий постоянного тока равна 400–700 км [2; 3]. Известны вставки постоянного тока (ВПТ), состоящие из линии постоянного тока, выпрямительных и инверторных подстанций, которые используются для объединения энергосистем, работающих на разных или несинхронных частотах. В настоящее время лидером по количеству ВПТ является Китай [2]. Очевидно, что развитие технологий и снижение стоимости выпрямительных и инверторных подстанций приведет к снижению критической длины и номинального напряжения линий постоянного тока.

Технико-экономическая целесообразность применения постоянного тока в распределительных сетях на современном этапе и в перспективе связана с увеличением доли так называемых «скрытых» потребителей постоянного тока (импульсные блоки питания светодиодных светильников, компьютерной и офисной техники, инверторный электропривод) и внедрением распределенной генерации (солнечных и ветроэлектростанций) и зарядных станций для электромобилей. В условиях появления солнечных и ветроэлектростанций, первые из которых выдают постоянное напряжение, а вторые при использовании асинхронных и синхронных генераторов вынуждены выпрямлять переменный ток в постоянный и затем инвертировать его опять в переменный с целью стабилизации режимов работы, экономически более целесообразным становится построение мини- или микрогридов постоянно-переменного тока или полностью постоянного тока.

До появления полупроводниковых электротехнических устройств большинство электроприемников в промышленности и быту были потребителями переменного тока с минимальным количеством «скрытых» потребителей постоянного тока, на входе которых устанавливались выпрямители с сглаживающими фильтрами. Одним словом, потребители переменного тока, в основном это асинхронные двигатели, подключались к электроэнергетическим системам переменного тока.

Однако появление мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и других полупроводниковых приборов силовой электроники привело к технологической революции в области инверторов и иных преобразовательных устройств, которые также являются «скрытыми» потребителями постоянного тока [3; 4]. При этом они «вынуждены» подключаться к электроэнергетической системе переменного тока, а не к более подходящей им электроэнергетической системе постоянного тока.

Можно предположить, что на определенном этапе развития технологий встречные процессы перехода к сетям постоянного тока «сверху–вниз» (от протяженных сетей сверхвысокого напряжения к сетям более низких напряжений) и «снизу–вверх» (от низковольтных распределительных сетей к высоковольтным распределительным сетям) пересекутся, что будет соответствовать полному переходу на сети постоянного тока.

В данной статье анализируются технико-экономические аспекты перехода к сетям постоянного тока «снизу–вверх», включая:

- 1) вопросы целесообразности перевода скрытых электроприемников постоянного тока в разряд явных потребителей постоянного тока [3; 4];
- 2) использования полупроводниковых трансформаторов постоянного тока (DC/DC) для трансформации электроэнергии постоянного тока;
- 3) использования в миниридах быстроходных асинхронных генераторов с частотой вращения ротора более 3000 об/мин и частотой ЭДС более 400 Гц в паре (или без) с мощными повышающими трансформаторами (400 Гц и более) и выпрямителями, к которым подключаются ЛЭП постоянного тока;
- 4) создания миниридов постоянно-переменного тока, в которых генерация энергии и её трансформирование осуществляется на переменном токе (часть системы с переменным током), а передача и распределение – на постоянном токе (часть системы с постоянным током). В любом случае потребителей постоянного тока следует подключать к электроэнергетической системе постоянно-переменного тока без маломощных «посредников» в виде выпрямителей со сглаживающими фильтрами.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. При анализе массогабаритных и технико-экономических показателей асинхронной машины, работающей в генераторном режиме, и трансформатора воспользуемся теорией электрических машин [5; 6] и трансформаторов [7]. При оценке эффективности полупроводниковых трансформаторов воспользуемся результатами сравнительного анализа полупроводниковых трансформаторов, которые представлены в [8].

Большинство электроприемников с инверторами подключаются к сетям переменного тока, причем между сетью переменного тока и инвертором устанавливается выпрямитель с фильтром. Такие электроприемники можно назвать «скрытыми» потребителями постоянного тока, поскольку их можно подключать непосредственно к сети постоянного тока [3; 4].

К таким электроприемникам (по мере роста их мощности) можно отнести: светодиодные лампы; зарядные устройства сотовых телефонов; вторичные источники питания телевизоров, компьютеров и иных полупроводниковых устройств; блоки бесперебойного питания; инверторные вентиляторы, холодильники, кондиционеры, стиральные машины; микроволновые печи; инверторные сварочные аппараты; электрозаправочные станции; многочисленные преобразовательные устройства, используемые в электроприводах различной мощности и назначения; электромобили и т. д.

Следует заметить, что регулируемые электроприводы превосходят по энергоэффективности нерегулируемые электроприводы, двигатели которых подключаются напрямую к сети переменного тока [9]. Такое превосходство стало причиной повсеместного использования первых, модернизации или полной замены вторых. Такая тенденция с электроприводами наблюдается во всех отраслях промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и различных бытовых устройствах.

Бурное развитие интернета также способствует увеличению числа скрытых потребителей постоянного тока в виде компьютеров, их периферийных устройств, различного оборудования, связанного с цифровизацией производства, а также многочисленных центров обработки данных. Следует подчеркнуть, что последние в мировом масштабе потребляют в полтора раза больше электроэнергии, чем вся Россия [10].

Отдельно следует отметить возросший интерес к полупроводниковым трансформаторам переменного тока (AC/AC), которые стали вытеснять на рынке классические низкочастотные силовые трансформаторы [11, 12]. Основными участниками рынка полупроводниковых трансформаторов являются General Electric Company, Schneider Electric, Eaton Corporation, Vollspark, Varentec INC., Hitachi ABB, Red Box Aviation, Power Systems and Controls, INC., Alstom SA, Siemens AG [12]. Естественно, сотрудников перечисленных фирм довольно сложно заподозрить в экономической безграмотности и выпуске невостребованной продукции.

Известно, что при неизменной номинальной мощности трансформатора рост частоты переменного напряжения, подводимого к первичной обмотке, улучшает массогабаритные и энергетические показатели трансформатора в соответствии с выражением [7]:

$$A_{\text{магн}} A_{\text{обм}} = (\sqrt{2}) P_{\text{ном}} / (k_{\text{обм}} J B_m \cdot \pi f) \sim L^4, \quad (1)$$

где $A_{\text{магн}}$ – сечение магнитопровода; $A_{\text{обм}}$ – площадь окна для обмоток однофазного трансформатора, которое охватывается магнитопроводом; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность; $k_{\text{обм}}$ – коэффициент заполнения площади окна обмотками; J – плотность тока в обмотках; B_m – амплитудное значение плотности магнитного потока (индукция); f – частота напряжения, подводимого к первичной обмотке трансформатора, L – базисный размер, например, расстояние между осями стержней трансформатора.

Из выражения (1) видим, что с увеличением частоты произведение $A_{\text{магн}} A_{\text{обм}}$ уменьшается обратно пропорционально частоте f , а следовательно, базисный размер L уменьшается обратно пропорционально корню четвертой степени из частоты, а соответственно условный объем $V=L^3$ должен быть пропорционален $f^{3/4}$.

В качестве примера рассмотрим данные трансформаторов для блоков питания, которые представлены в таблице 1 [13].

Таблица 1

Массогабаритные показатели трансформаторов питания

№	Тип трансформатора	Частота, Гц	Сном, ВА	Вес, г	Габариты: B, H, D , мм, Объем $V: B \times H \times D$, см ³	$L = \sqrt[3]{V}$, см
1	ТПП281-220-400	400	210	1260	83×75×74 460,650	7,723
2	ТПП321-220-50	50	200	4500	88×137×132 1591,392	11,675
	Отношение показателей P_{400}/P_{50}	8	1,05	0,28	0,289	0,661

При соотношении частот трансформаторов 8 к 1, а мощностей 1,05 к 1 из (1) следует, что отношение L_{400}/L_{50} должно быть равным

$$\sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{210}{200}} = 0,602,$$

что всего на 9,1 % меньше отношения L_{400}/L_{50} , вычисленного через объемы трансформаторов. Таким образом, уменьшение объема для рассмотренных трансформаторов при увеличении частоты с 50 до 400 Гц несколько меньше, чем должно быть в соответствии с (1).

Таким образом, использование повышающего трансформатора, который подключен к асинхронному генератору с частотой ЭДС 400 Гц, будет иметь существенно меньшие габариты, меньшие потери и более высокий КПД, чем аналогичный по мощности трансформатор, подключенный к переменному напряжению частотой 50 Гц. Следует отметить, что увеличение частоты напряжения оказывает аналогичное влияние и на массогабаритные показатели фильтра.

Длительное время основными недостатками полупроводниковых трансформаторов напряжения переменного тока являлись их значительная стоимость и потери, которые были больше, чем у стандартных низкочастотных трансформаторов. Эти потери связаны с тем, что при их подключении к сети переменного тока (50 Гц) преобразование электрической энергии происходит пять раз в соответствии с количеством основных устройств в электрической цепи: выпрямитель с фильтром → среднечастотный ($800 \text{ Гц} < f < 10000 \text{ Гц}$) инвертор с фильтром → среднечастотный трансформатор (U_1/U_2) → выпрямитель с фильтром → низкочастотный (50 Гц) инвертор с фильтром.

Существенного снижения потерь можно достичь, если полупроводниковые трансформаторы напряжения постоянного тока подключать к сети постоянного тока. В этом случае преобразование электроэнергии происходит только три раза: среднечастотный инвертор с фильтром → среднечастотный трансформатор → выпрямитель с фильтром. Уменьшение на один выпрямитель с фильтром и один инвертор с фильтром приводит не только к уменьшению потерь, но и к уменьшению стоимости таких полупроводниковых трансформаторов [14; 15].

Конечно, этому можно противопоставить то, что первое преобразование «напряжение переменного тока → выпрямитель с фильтром» в полупроводниковом трансформаторе напряжения переменного тока не исчезает, а «переносится» к мощному источнику переменной ЭДС, т. е. к генератору или к вторичной обмотке низкочастотного трансформатора.

Такой подход имеет место быть, но не выдерживает критики, поскольку одна мощная выпрямительная подстанция, работающая круглосуточно в течение года, будет иметь более высокий КПД и меньшую стоимость, чем десятки и сотни тысяч маломощных скрытых потребителей постоянного тока с индивидуальными выпрямителями, которые имеют более низкие КПД и коэффициенты использования.

Естественно, что экономический эффект кратно возрастет, если выпрямительные подстанции будут использоваться только на электростанциях, а взаимосвязь сетей постоянного тока высокого, среднего и низкого уровней напряжения будет осуществляться только с помощью полупроводниковых трансформаторов постоянного тока.

Следует отметить, что предложенное решение по снижению потерь в полупроводниковом трансформаторе постоянного тока нашло свое экспериментальное подтверждение в статье [16]. На рисунке 1 представлены кривые из этой статьи.

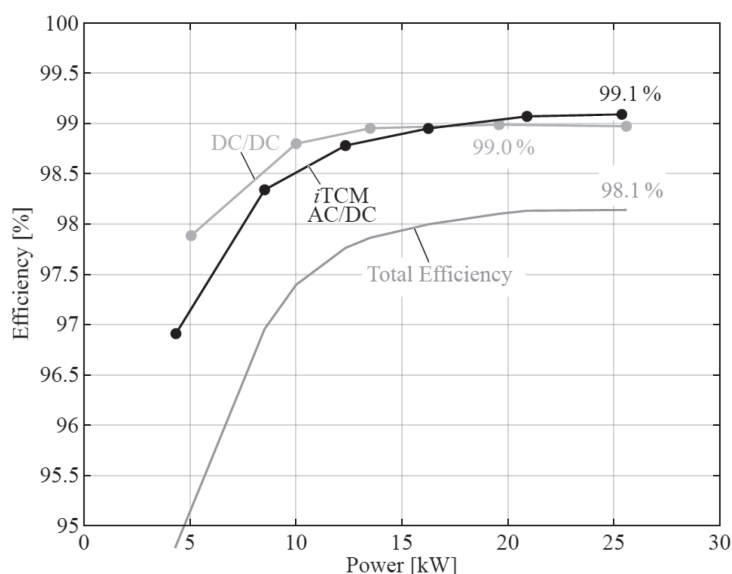


Рис. 1. Кривые КПД двух этапов преобразования и общего КПД полупроводникового трансформатора AC/DC

В верхней части графика приведены кривые КПД двух этапов преобразования (DC/DC: 99 % и AC/DC: 99.1 %), чуть ниже – кривая общего КПД полупроводникового трансформатора AC/DC (98.1 %). Основные параметры двунаправленного DC/DC конвертора этого трансформатора имеют следующие значения: 25 кВт – мощность; 99 % – КПД; 7/0,4 кВ – первичное и вторичное напряжение постоянного тока. Следует заметить, что потери в среднечастотном трансформаторе конвертора равны 99,61 % [17]. Для сравнения аналогичные параметры стандартного низкочастотного трехфазного трансформатора переменного тока с аморфным магнитопроводом ТМГА-30/10/0.4 имеют следующие значения: 30 кВт; 97,5 %; 10/0,4 кВ [18].

Следует отметить, что несмотря высокую стоимость, продажа полупроводниковых трансформаторов переменного тока (AC/AC) ежегодно возрастает [12].

Ниже представлена таблица 2 из [8], в которой приведены характеристики полупроводниковых среднечастотных трансформаторов среднего (SST MV) и низкого (SST LV) напряжений, полупроводникового трансформатора (SST AC/AC) и низкочастотного трансформатора (LFT, 50 Гц) мощностью 1000 кВА.

Таблица 2

Характеристики трансформаторов мощностью 1000 кВА

	SST MV, AC/DC	SST LV, DC/AC	SST, AC/AC	LFT, AC/AC
КПД %	98,3	98,0	96,3	98,7
Объем, м ³	1,57	1,10	2,67	3,43
Вес, кг	1270	1330	2600	2590
Стоимость материалов, т\$	34,1	18,6	52,7	11,4

Электрическая схема полупроводникового трансформатора представлена на рисунке 2 [8].

При работе всех элементов схемы осуществляется 100% преобразование AC/AC. При отключении одного из конверторов 500 kVA LV система начинает работать в режиме 50% AC/DC (800V DC) и 50% AC/AC (400 V). Отключение двух конверторов 500 kVA LV (400V) обеспечивает работу в режиме 100% преобразования SST MV AC/DC (800V).

В предлагаемой системе постоянно-переменного тока предполагается использование полупроводниковых трансформаторов постоянного тока со 100% преобразованием DC/DC. В таком трансформаторе, в отличие от трансформатора, представленного на рисунке 2, отпадает необходимость в преобразователях AC/DC, конденсаторах постоянного тока на входе ячеек среднего напряжения, также преобразователях DC/AC LV (400 V). Перечисленные элементы на рисунке 2 отделены пунктирной линией. Сделаем допущение, что стоимость конденсаторов на среднем и низком напряжении равны, тогда в предлагаемом решении конденсаторов постоянного тока будет в два раза меньше, чем в системе SST MV AC/DC (800 V).

Для определения стоимости полупроводникового трансформатора SST DC/DC воспользуемся данными круговой диаграммы рисунка 10 (d) из [8], преобразовав ее в гистограмму (рис. 3). Черным цветом на рис. 3 показана стоимость материалов полупроводникового трансформатора среднего напряжения (SST MV, AC/DC), а серым цветом – трансформатора постоянного тока (SST DC/DC).

Из рис. 3 видно, что в полупроводниковом трансформаторе постоянного тока стоимость полупроводников уменьшилась на одну треть (столбец 1), а стоимость конденсаторов – в два раза (столбец 7). С учетом этого и значения стоимости из таблицы 2 (34,1 т.\$), получим стоимость полупроводникового трансформатора постоянного тока 28,67 т.\$, что на 15,9% меньше, чем у трансформатора MV SST AC/DC.

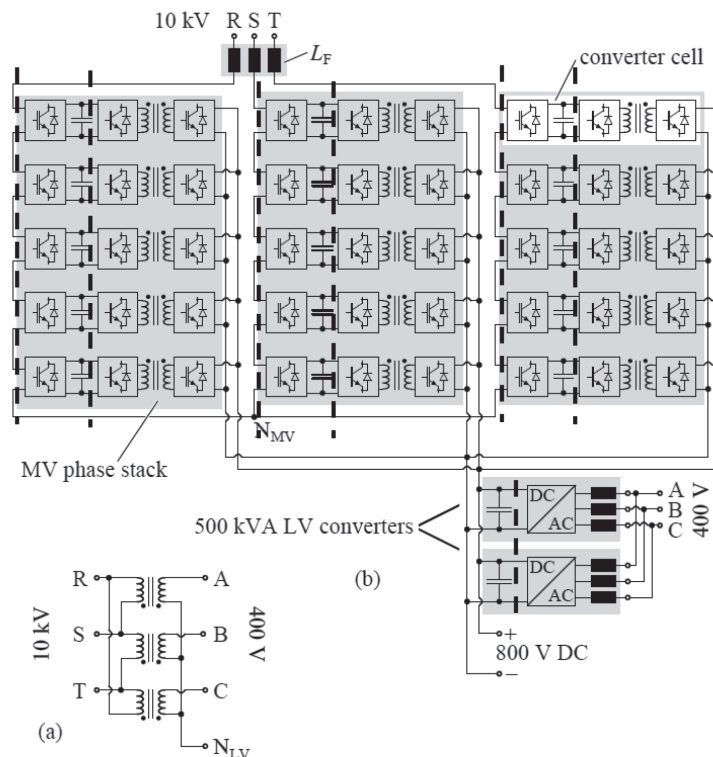


Рис. 2. Электрические схемы LFT (a) и полупроводникового трансформатора AC/AC (b) [8]
Пояснения к рисунку: LF – низкая частота; converter cell – ячейка преобразователя; MV phase stack – фаза среднего напряжения; 500 kVA LV converters – низковольтные преобразователи 500 кВА; NLV – нейтраль низкого напряжения; DC – постоянный ток; AC – переменный ток.

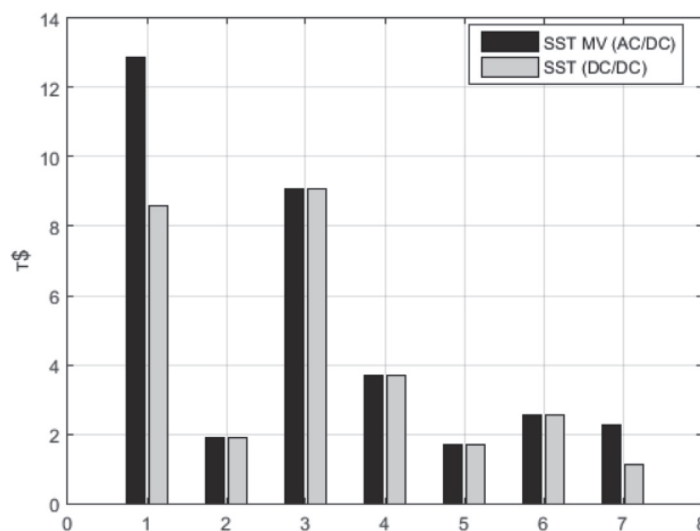


Рис. 3. График стоимости материалов в тысячах американских долларов (t\$)
Обозначения столбцов: 1 – полупроводники (semiconductors); 2 – корпус/рама (cabinet/frame); 3 – трансформаторы (transformers); 4 – электроника (electronics); 5 – индуктивный фильтр (filter ind); 6 – теплоотвод (heat sink); 7 – конденсаторы постоянного тока (dc capacitors).

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Полученные данные свидетельствуют о том, что по всем показателям полупроводниковый трансформатор постоянного тока превосходит все остальные варианты полупроводниковых трансформаторов, за исключением стоимости низкочастотного трансформатора, который производится с начала прошлого века и не претерпел серьезных изменений в конструкции. В связи с этим, 2,5-кратный разрыв по стоимости можно считать хорошим показателем для устройств нового поколения, как это имело место, например, с инверторными сварочными аппаратами, вторичными источниками электропитания, преобразователями частоты и большинством новых устройств. Эти устройства в конечном итоге вытесняли с рынка устройства предыдущего поколения благодаря тому, что в ходе их массового производства существенно снижалась их стоимость и сроки окупаемости, или благодаря своим неоспоримым достоинствам.

Следует заметить, что по этому пути проходят и те устройства, в которых применяются новые материалы. Например, опыт эксплуатации за рубежом низкочастотных масляных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных материалов показал, что разница в цене по сравнению с обычными масляными трансформаторами составляет примерно 30–35 %, и окупается в течение 3–5 лет в зависимости от региональных тарифов на электроэнергию [19].

Что касается экономической эффективности генераторов при переходе на постоянно-переменный ток, то и это не вызывает сомнений, поскольку, согласно формуле Арнольда [5; 6]:

$$C_A = D^2 l_\delta \Omega / P' = 2 / (\pi \alpha_\delta k_B k_s AB_\delta) = \text{const}, \quad (2)$$

где $P' = mEI$ – расчетная мощность (m , E , I – соответственно число фаз, номинальные значения ЭДС и тока обмотки статора); D – внутренний диаметр статора; l_δ – расчетная длина магнитопровода; α_δ – коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы магнитной индукции, учитывающий изменение напряжения при холостом ходе и нагрузке; k_s – обмоточный коэффициент; A – линейная нагрузка; B_δ – индукция в воздушном зазоре; Ω – угловая скорость ротора.

Из уравнения (2) определим расчетную мощность:

$$P' = D^2 l_\delta \Omega / C_A. \quad (3)$$

Из (3) видим, что при неизменной машинной постоянной C_A и неизменном произведении $D^2 l_\delta$ расчетная мощность увеличивается прямо пропорционально угловой скорости вращения ротора Ω .

Для подтверждения сказанного выше сделаем расчет генераторной части минигрид постоянного тока, состоящей: из газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт и частотой вращения 12000 об/мин; четырехполюсного двигателя, работающего в генераторном режиме с конденсаторным самовозбуждением, напряжением 0,4 кВ и частотой 400 Гц (режим холостого хода); повышающего трансформатора (2,5 МВА/0,4/12 кВ, 400 Гц); ЛЭП постоянного тока; понижающего полупроводникового трансформатора постоянного тока (SST DC/DC) и нагрузки постоянного тока.

Определим мощность, которую будет иметь четырехполюсная асинхронная машина при частоте вращения 12000 об/мин. Для этого определим кратность частоты вращения турбины и стандартного асинхронного двигателя: $12000/1500 = 8$. С учетом этого мощность двигателя, который вращается с частотой 12000 об/мин, составит $2500 \text{ кВт}/8 = 312,5 \text{ кВт}$. За основу возьмем стандартный четырехполюсный двигатель АИР 355 М4, который имеет следующие характеристики: напряжение 380 В; мощность 315 кВт; ток 556 А; вес 1700 кг. Этот двигатель может быть использован в качестве асинхронного генератора, при условии, что линейная скорость ротора не превысит критических значений. Цена данного двигателя – 596349 руб. [20].

Поскольку в стоимость асинхронного генератора входят конденсаторные батареи возбуждения или полупроводниковый источник реактивной мощности, то примем допущение, что самовозбуждение генератора осуществляется с помощью конденсаторов серии К78-17 или ее аналогов. Поскольку конденсаторы батареи работают при частоте 400 Гц, то напряжение на них, согласно документации, не должно превышать 55 % номинального напряжения частотой 50 Гц [21]. Поскольку напряжение стабилизируется за счет частоты вращения вала генератора, то рассчитаем емкость конденсаторов возбуждения, которая необходима для работы в режиме холостого хода.

С этой целью сделаем допущение, что намагничивающий ток асинхронного двигателя составляет 40 % от номинального, т. е. 222,4 А.

С учетом этого, емкостное сопротивление батареи конденсаторов одной фазы будет равно: $x_c = 380 / (\sqrt{3} \cdot 222,4 \cdot 8) = 0,1233$ Ом. Зная сопротивление батареи конденсаторов и частоту ЭДС генератора определим емкость батареи конденсаторов: $C = 1 / (2\pi \cdot 400 \cdot 0,1233) = 0,003227$ Ф. В целом, с учетом трех батарей, соединенных в звезду, и выполнения требования по снижению напряжения на конденсаторах путем удвоения количества последовательно соединенных конденсаторов получаем суммарную емкость $\sum C = 2 \cdot 3 \cdot 0,003227 = 0,019362$ Ф. За единичный элемент батареи конденсаторов примем конденсатор серии СВВ60 емкостью 80 мкФ, напряжением 450 В при частоте 50 Гц, стоимостью 337 руб. по состоянию на 18.06.23 [22]. Найдем количество конденсаторов и стоимость конденсаторных батарей: $19362 \text{ мкФ} / 80 \text{ мкФ} = 242$ шт. Округлим до 246 штук и определим количество конденсаторов на фазу: $246 / 3 = 82$ шт. С учетом этого стоимость всех конденсаторов составит:

$$246 \cdot 337 \text{ руб.} = 82902 \text{ руб.}$$

В итоге, общая стоимость асинхронного генератора с конденсаторами возбуждения будет равна $596349 + 82902 = 679251$ руб.

Для сравнения, воспользуемся данными двухполюсного синхронного турбогенератора Т-2,5-2 УЗ (П) мощностью 2,5 МВт и весом 12500 кг [23]. Поскольку сотрудники этого предприятия отказались предоставить данные о стоимости турбогенератора, то сделаем допущение, что стоимость одного килограмма асинхронной машины АИР 355 М4 и турбогенератора Т-2,5-2 УЗ (П) равны. С учетом этого допущения получим следующий результат: $(596349 / 1700) \cdot 12500 = 4,385$ млн руб. Таким образом, стоимость генераторной части предлагаемого варианта минигрид в 6,5 раза экономичнее варианта с классическим синхронным генератором с частотой ЭДС 50 Гц, что дает возможность сэкономить 3,794 млн руб.

На основе вышерассмотренных соотношений стоимостей генераторов и трансформаторов дадим укрупненную оценку целесообразности построения минигрид на основе газовой турбины, быстроходного асинхронного генератора для питания потребителей на переменном токе в зависимости от расстояния от электростанции до потребителей и соотношения доли потребителей постоянного тока. Результаты сопоставления классической трехфазной системы переменного тока частотой 50 Гц и минигрид постоянно-переменного тока при длинах линий 10 км и 1 км приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Сопоставление затрат на минигрид при длине кабельной линии 10 км, млн руб.

Тип минигрид	Генератор	Трансформаторы	Выпрямитель	Кабельная линия	Потери в ЛЭП	Трансформаторы	Выпрямители	Итого
50 Гц AC	4,3	1,8	0	15	5,9	1,8	0,6	29,4
400 Гц+DC	0,68	0,6	1,8	15	3	4,5	0	25,58

Примечания. Линия длиной 10 км выполнена кабелем кабель ААШвУ 3х95 длиной 10 км. На приемном и передающих концах ЛЭП установлено по 2 трансформатора мощностью 1000 кВА. Стоимость потерь энергии принята равной 3 рубля за кВт.ч, время наибольших потерь 2500 час. Величина нагрузки ЛЭП – 2 МВт. Вся нагрузка – «Скрытые» потребители постоянного тока.

Таблица 4

Сопоставление затрат на минигрид при длине кабельной линии 1 км, млн руб.

Тип минигрид	Генератор	Трансформаторы	Выпрямитель	Кабельная линия	Потери в ЛЭП	Трансформаторы	Выпрямители	Итого
50 Гц AC	4,3	1,8	0	1,5	0,59	1,8	0,6	10,59
400 Гц+DC	0,68	0,6	1,8	1,5	0,3	4,5	0	9,38

Как следует из приведенных в таблицах 3 и 4 результатов при приближении автономной электростанции к потребителям относительная эффективность минирид постоянно-переменного тока снижается с 14,9 % до 12,9 %. При расположении электростанции рядом с потребителями необходимости в трансформаторах и линии отпадает. Суммарные затраты при переходе к минирид постоянно-переменного тока снижаются с 4,9 млн рублей до 2,48 млн рублей, т. е. почти в 2 раза.

Результаты исследования эффективности перехода на сеть постоянного-переменного тока при различной доле «скрытых» потребителей постоянного тока приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Сопоставление затрат на минирид
при различной доле «скрытых» потребителей постоянного тока, млн руб.**

Тип минирид	Генератор	Выпрямитель в сети	Выпрямители «скрытых» приемников ПТ	Инвертор DC/AC	Итого
Доля «скрытых» потребителей постоянного тока 100 %					
50 Гц AC	4,3	0	0,60	0	4,9
400 Гц+DC	0,68	1,8	0	0	2,48
Доля «скрытых» потребителей постоянного тока 50 %					
50 Гц AC	4,3	0	0,30	0	4,6
400 Гц+DC	0,68	1,8	0	1,67	4,15
Доля «скрытых» потребителей постоянного тока 0 %					
50 Гц AC	4,3	0	0	0	4,3
400 Гц+DC	0,68	1,8	0	3,35	5,83

Для питания потребителей переменного тока частотой 50 Гц в миниридах постоянно-переменного тока с быстроходным асинхронным генератором предусматривается установка инвертора DC/AC, стоимость которого принята в соответствии с таблицей 2 при курсе рубля 90 руб. за 1 \$.

Из результатов в таблице 5 видно, что при доле «скрытых» потребителей постоянного тока 50 % применение миниридов постоянно-переменного тока с быстроходным асинхронным генератором все еще остается более эффективным по сравнению с классическими миниридами переменного тока частотой 50 Гц.

Заключение / Conclusion. Проведенный технико-экономический анализ с учетом зарубежных данных [8] показал, что полупроводниковый трансформатор постоянного тока SST DC/DC по всем показателям эффективности превосходит полупроводниковый трансформатор SST AC/AC и полупроводниковый трансформатор SST AC/DC. Также он превосходит стандартный низкочастотный трансформатор по большинству показателей, кроме стоимости, которая в 2,5 раза дороже для полупроводникового трансформатора постоянного тока SST DC/DC. Сравнительный анализ стандартного турбогенератора, «привязанного» к частоте 50 Гц энергосистемы переменного тока, и быстроходного ($n_{\text{рот}} \gg 3000$ об/мин) четырехполюсного асинхронного генератора на базе двигателя АИР 355 М4 с повышенной частотой (400 Гц) с конденсаторным возбуждением показал неоспоримые преимущества предлагаемого решения с точки зрения массогабаритных показателей и стоимости, которая уменьшается в 6,5 раз. Оценочные расчеты показали, что затраты на минириды постоянно-переменного тока на базе быстроходного асинхронного генератора частотой 400 Гц меньше затрат на классические минириды переменного тока частотой 50 Гц при значительной доле «скрытых» потребителей постоянного тока при любой удаленности нагрузки от генератора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Доливо-Добровольский М. О. О пределах возможности передачи энергии на расстояние переменным током // *Electrotechnische Zeitschrift*, 1919.
2. Травин Л. В. Перспективы применения электропередач постоянного тока высокого напряжения в России // III научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов» / Презентация. Москва, 2018.
3. Джендубаев А.-З. Р., Кононов Ю. Г., Джендубаев Э. А.-З. Электроэнергетика будущего: инверторные технологии и постоянный ток. *Энергия единой сети*. 2020. № 4. С. 50–61.
4. Джендубаев А.-З. Р., Кононов Ю. Г., Джендубаев Э. А.-З. Моделирование автономной электроэнергетической системы постоянного тока с полупроводниковыми трансформаторами. *Электричество*. 2022. N 7. С. 24–39.
5. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 2006.
6. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров. М: Юрайт, 2017.
7. Kolar J. W., Huber J. E. Solid-State Transformers (SST) Concepts, Challenges and Opportunities. URL: https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/_ECPE_SST_Workshop_2016_SST_Concepts_Challenges_Opportunities_FINAL_JWK_270116.pdf.
8. Huber J. E., Kolar J. W. Volume/weight/cost comparison of a 1MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014. P. 4545–4552.
9. Сахарнов Ю. В. Регулируемый электропривод - эффективное энергосберегающее оборудование. *Журнал прикладных исследований*. 2001. № 4–6. С. 114–126.
10. Тягунов М. Цифровая трансформация и энергетика. *Энергетическая политика*. 2021. № 9 (163). С. 74–85.
11. Kolar J. W. Solid State Transformer (SST) Applications-A Glimpse Into the Future // 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE 2019). 2019.
12. Solid State (Smart) Transformer. URL: alliedmarketresearch.com (дата обращения: 12.06.2023).
13. Компания «Электроника и связь». URL: eandc.ru. (дата обращения: 12.06.2023)
14. Ortiz G., Leibl M. G., Huber J. E., Kolar J. W. Design and experimental testing of a resonant DC–DC converter for solid-state transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 32. No 10. P. 7534–7542.
15. Shi H., Wen H., Hu Y., Yang Y., Wang Y. Efficiency optimization of DC solid-state transformer for photovoltaic power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. Vol. 67. No 5. P. 3583–3595.
16. Rothmund D., Guillod T., Bortis D., Kolar J.W. 99.1% efficient 10 kV SiC-based medium-voltage ZVS bidirectional single-phase PFC AC/DC stage. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 201. Vol. 7. No 2. P. 779–797.
17. Rothmund D. 10 kV SiC-Based Medium-Voltage Solid-State Transformer Concepts for 400V DC Distribution Systems. ETH Zurich, 2018.
18. РУСТРЭЙДКОМ Масляные герметичные трансформаторы ТМГА. URL: <http://rostradecom.ru>. (дата обращения: 12.06.2023).
19. ТМГ аморфные. URL: <http://transformator.ru/production/transformatory-tmg/tmg-amorfnye/>. (дата обращения: 12.06.2023).
20. ООО "УЭСК". URL: https://uesk.org/katalog/elektrodvigateli/trehfaznye-380v/elektrodvigateli-air/?filter%5Bprice%5D%5Bfrom%5D=3825&filter%5Bprice%5D%5Bto%5D=1138824&filter%5Bmownost_dvigatelya%5D%5B28%5D=315+кВт&filter%5Bboroty_dvigatelya%5D%5B2%5D=1500+о6%2Fмин. (дата обращения: 12.06.2023)
21. Северо-Задонский конденсаторный завод. URL: <http://skzcond.ru/>. (дата обращения: 12.06.2023).
22. Axtaike IC Electronic Components Store. URL: https://aliexpress.ru/item/1005005559178006.html?spm=a2g2w.productlist.0.0.5ccb4aa6zHm8aR&sku_id=12000033539992994. (дата обращения: 12.06.2023).
23. Турбогенераторы серии Т (ТС) мощностью от 2,5 до 63 МВт. URL: <https://privod-lysva.ru/index.php?id=1523> (дата обращения: 12.06.2023).

REFERENCES

1. Dolivo-Dobrovolsky M. O. O predelakh vozmozhnosti peredachi energii na rasstoyanie peremennym tokom. (On the limits of the possibility of transmitting energy over a distance by alternating current.) Berlin, Elektrotechnische Zeitschrift, 1919.
2. Travin L. V. Perspektivy primeneniya elektropredach postoyannogo toka vysokogo napryazheniya v Rossii/III nauchno-prakticheskaya konferenciya «Opyt i perspektivy primeneniya silovoj elektroniki i elektropredach postoyannym tokom dlya povysheniya nadezhnosti elektricheskikh setej i realizacii mezhdunarodnykh proektov» (Prospects for the use of high voltage direct current power transmission in Russia/III scientific and practical conference «Experience and prospects for the use of power electronics and direct current power transmission to improve the reliability of electrical networks and the implementation of international projects.») / Presentation. Moscow, 2018.
3. Dzhendubaev A. R., Kononov Yu. G., Dzhendubaev E. A. Elektroenergetika budushchego: invertornye tekhnologii i postoyannyj tok (Power Industry of the Future: Inverter Technology and DC). Energiya Edinoi Seti = Energy of Unified Grid. 2020, № 4, P. 50–61. (In Russ.).
4. Dzhendubaev A. R., Kononov Yu. G., Dzhendubaev E. A. Modelirovanie avtonomnoj elektroenergeticheskoy sistemy postoyannogo toka s poluprovodnikovymi transformatorami (Simulation of an autonomous DC electric power system with semiconductor transformers.) Electrichestvo = Electricity. 2022, № 7, P. 24–39. (In Russ.).
5. Goldberg O. D., Sviridenko O. S. Proektirovanie elektricheskikh mashin (Design of electrical machines.) Moscow: Visshaya Shkola, 2009. (In Russ.).
6. Kopylov I. P. Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya bakalavrov (Design of electrical machines: a textbook for bachelors.) Moscow: Youright, 2017. (In Russ.).
7. Kolar J. W., Huber J. E. Solid-State Transformers (SST) Concepts, Challenges and Opportunities. Available from: https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/ECPE_SST_Workshop_2016_SST_Concepts_Challenges_Opportunities_FINAL_JWK_270116.pdf. [Accessed 12 June 2023].
8. Huber J. E., Kolar J. W. Volume/weight/cost comparison of a 1MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, 2014. – P. 4545–4552.
9. Sakharnov Yu. V. Reguliruemyy elektropriwod – effektivnoe energosberegayushchee oborudovanie (Adjustable electric drive – efficient energy-saving equipment.) Jurnal Prikladnikh Issledovaniy (Journal of Applied Research). 2001, № 4–6, P. 114–126. (In Russ.).
10. Tyagunov M. Cifrovaya transformatsiya i energetika (Digital transformation and energy.) Energeticheskaya Politika (Energy Policy). 2021, № 9, P. 74–85. (In Russ.).
11. Kolar J. W. Solid State Transformer (SST) Applications-A Glimpse Into the Future//2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE 2019). 2019.
12. Solid State (Smart) Transformer. - Available from: alliedmarketresearch.com. [Accessed 12 June 2023].
13. Kompaniya «Elektronika i svyaz'» (Company «Electronics and communication») Available from: <https://eandc.ru>. [Accessed 12 June 2023]
14. Ortiz G., Leibl M. G., Huber J. E., Kolar J. W. Design and experimental testing of a resonant DC–DC converter for solid-state transformers // IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, Vol. 32, No 10, P. 7534–7542.
15. Shi H., Wen H., Hu Y., Yang Y., Wang Y. Efficiency optimization of DC solid-state transformer for photovoltaic power systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, V. 67, N 5, P. 3583–3595
16. Rothmund D., Guillod T., Bortis D., Kolar J.W. 99.1 % efficient 10 kV SiC-based medium-voltage ZVS bidirectional single-phase PFC AC/DC stage // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, Vol. 7, No 2, P. 779–797.
17. Rothmund D. 10 kV SiC-Based Medium-Voltage Solid-State Transformer Concepts for 400V DC Distribution Systems/D. Rothmund. – ETH Zurich, 2018.
18. RUSTREJDKOM Maslyanye germetichnye transformatory TMGA (ROSTRADECOM. Power high-voltage electrical equipment / Oil-sealed transformers TMGA.). Available from: <http://rostradecom.ru> [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).

19. TMG amorfnye (TRANSFORMER. Production of transformers, substations, electrical equipment / TMG amorphous.). Available from: <http://transformator.ru/production/transformatory-tmg/tmg-amorfnye/> [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).
20. ООО "UESK" (LLC "Company UESK"). – Available from: URL: https://uesk.org/katalog/elektrodvigateli/trehfaznye-380v/elektrodvigateli-air/?filter%5Bprice%5D%5Bfrom%5D=3825&filter%5Bprice%5D%5Bto%5D=1138824&filter%5Bmownost_dvigatelya%5D%5B28%5D=315+кВт&filter%5Bboroty_dvigatelya%5D%5B2%5D=1500+о6%2Fмин [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).
21. Severo-Zadonskij kondensatornyj zavod (Severo-Zadonsky Capacitor Plant.) – Available from: <http://skzcond.ru/> [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).
22. Axtaike IC Electronic Components Store. – Available from: <https://aliexpress.ru/item/1005005559178006.html> [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).
23. Turbogeneratory serii T (TS) moshchnost'yu ot 2,5 do 63 MVt (Turbine generators of the T (TC) series with a capacity of 2.5 to 63 MW.) – Available from: <https://privod-lysva.ru/index.php?id=1523> [Accessed 12 June 2023]. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Эдуард Абрек-Заурович Джэндубаев – ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения СКФУ, Researcher ID: IUO-8685-2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Eduard A. Dzgendubaev – Assistant, the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: IUO-8685-2023.