

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГИБРИДНОГО ИНВЕРТОРА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

д.т.н. Шклярский Я.Э., к.т.н. Скамьин А.Н., Васильков О.С.
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
s175070@stud.spmi.ru

Интеграция альтернативных источников энергии и различных технологий распределенной генерации с силовыми электронными преобразователями в электрических сетях приводит к увеличению разнообразия сети, но при этом и к ужесточению требований различных стандартов, например, ограниченный гармонический состав генерируемого тока, непрерывная работа устройства при искажении напряжения и т.д. Учитывая данный факт, в работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния гибридного инвертора на показатели качества электроэнергии в точке общего подключения. Был разработан лабораторный стенд, состоящий из трехфазного гибридного инвертора, аккумуляторной батареи (АКБ), линейной нагрузки в виде активного сопротивления и конденсаторной установки. Инвертор был подключен к электрической сети на параллельную работу для питания нагрузки в виде активного сопротивления. Исследовались режимы заряда АКБ и выдачи мощности в сеть при двух вариациях сопротивления системы. Выдаваемая мощность от инвертора варьировалась в пределах от 500 Вт до 2 кВт в режиме генерации электроэнергии в сеть и в пределах от 50 до 300 Вт в режиме заряда АКБ. В результате лабораторных исследований были получены зависимости суммарных гармонических искажений тока (THDI) при различных режимах работы инвертора и сопротивлениях системы. На основании полученных результатов был разработан алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости при работе нагрузки и гибридного инвертора с накопителем энергии, позволяющий снизить влияние гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети.

Ключевые слова: гибридный инвертор, аккумуляторная батарея, показатели качества электроэнергии.

Для цитирования: Шклярский Я.Э., Скамьин А.Н., Васильков О.С. Экспериментальные исследования влияния гибридного инвертора на качество электроэнергии // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 2–9. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-2-9

Введение

В настоящее время во многих странах развивается децентрализованная система электроснабжения, основными источниками энергии в которой являются альтернативные источники на базе ветряных и солнечных электростанций. В состав таких источников входят различные устройства, позволяющие преобразовывать постоянный ток в переменный и наоборот, работа которых основана на беспрерывной коммутации полупроводниковых ключей [1]. Режимы работы таких преобразователей различны и определяются требованиями для конкретных условий. Различают источники бесперебойного питания (UPS), которые постоянно подключены к системе переменного тока и производят заряд накопителем энергии, а разряд осуществляется только

в случае аварийной ситуации для обеспечения электроэнергией ответственных потребителей [2]; автономные инверторы [3] (stand alone, off-grid), которые обеспечивают потребителей электроэнергией в автономном режиме независимо от централизованной системы электроснабжения, содержащие накопители энергии для питания потребителей в случае отсутствия солнца или ветра; сетевые инверторы (grid-tied, on-grid), которые при отсутствии накопителей энергии подключены к централизованной системе электроснабжения, способные работать параллельно с сетью и излишки выработанной энергии передавать в сеть; гибридные инверторы (hybrid), которые совмещают в себе преимущества автономных и сетевых инверторов, имеют в своем составе накопители энергии и могут работать синхронно с энерго-

системой для выдачи дополнительной мощности в сеть и потребителям [4, 5]. Кроме этого, все виды инверторов при наличии накопителей энергии функционируют в режиме заряда батарей, характеристика которого зависит от типа подключаемых накопителей энергии.

Диапазон параметров автономных инверторов более скромн: максимальные токи и напряжения редко превосходят нескольких тысяч ампер и несколько сотен вольт. Диапазон параметров гибридных устройств достаточно широкий: от нескольких ампер до десятков тысяч ампер, от десятков вольт до сотен тысяч вольт.

Интеграция альтернативных источников энергии и различных технологий распределенной генерации в электрических сетях приводит к увеличению разнообразия сети, включая интеллектуальные сети, и приводит к ужесточению требований различных стандартов. Ограничения для качества электроэнергии от альтернативных источников энергии и систем распределенной генерации приведены в стандартах многих стран. Среди требований – работа с определенным коэффициентом мощности (близко к единице), ограниченный гармонический состав генерируемого тока, непрерывная работа устройства при искажении напряжения и т.д. Большинство из этих требований могут быть удовлетворены применением специальных преобразовательных устройств с соответствующими системами управления. Поэтому системы распределенной генерации используют силовые электронные преобразователи для адаптации генерируемых параметров мощности к требуемым параметрам электрической сети. Дополнительной проблемой является то, что многие производители гибридных инверторов определяют генерируемый спектр и амплитуду гармоник для синусоидального напряжения питания и номинальной нагрузки. Но в настоящее время напряжение питающей сети не является синусоидальным и включает в себя гармонические составляющие по напряжению.

Гибридные преобразователи энергии по своему функциональному назначению способны работать параллельно с энергосистемой. При этом различные конфигурации инверторов позволяют обеспечивать выдачу электроэнергии в сеть с минимальным влиянием на качество напряжения в сети [6]. Это в свою очередь связано со стоимостью внедряемого оборудования. На данный момент

самыми распространенными способами повышения качества вырабатываемой электроэнергии в сеть от гибридных преобразователей является L и LCL фильтры на вводе устройства [7]. Фильтрующая способность LCL-фильтров значительно выше, чем у простого L-фильтра. Поэтому LCL-фильтр более популярен на практике. Фильтры LCL позволяют уменьшить габариты фильтра и обеспечивают более эффективную фильтрацию тока высших гармоник относительно фильтра L. Однако известно, что функционирование таких фильтров может приводить к возникновению резонансных явлений на частотах высших гармоник, свойства которых связаны с параметрами питающей сети. Поэтому правильный расчет параметров фильтра LCL важен для обеспечения стабильной работы гибридных инверторов напряжения. Существует несколько способов расчета этих параметров, однако, все они должны учитывать: максимальное снижение высших гармоник, вызванное процессом переключения, с минимальными габаритами фильтра и потреблением реактивной мощности. Кроме этого, известно, что добавление фильтров может приводить к возникновению резонансных явлений на частотах высших гармоник, связанных с параметрами питающей сети.

Экспериментальные исследования

Для оценки влияния гибридного инвертора на качество электроэнергии в точке общего подключения были проведены исследования в лабораторных условиях с применением трехфазного гибридного инвертора и аккумуляторной батареи. Инвертор был подключен к электрической сети на параллельную работу для питания нагрузки в виде активного сопротивления. Применялся гибридный инвертор МАП *Hybrid*.

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 1.

Электрическая принципиальная схема гибридного инвертора МАП *Hybrid* представлена на рис. 2.

Параметры лабораторной установки представлены в таблице. Исследовались режимы заряда АКБ и выдачи мощности в сеть при двух вариациях сопротивления системы. При этом к установке была подключена линейная нагрузка в виде активного сопротивления мощностью 4,5 кВт. Выдаваемая мощность от инвертора варьировалась в пределах от 500 Вт до 2 кВт

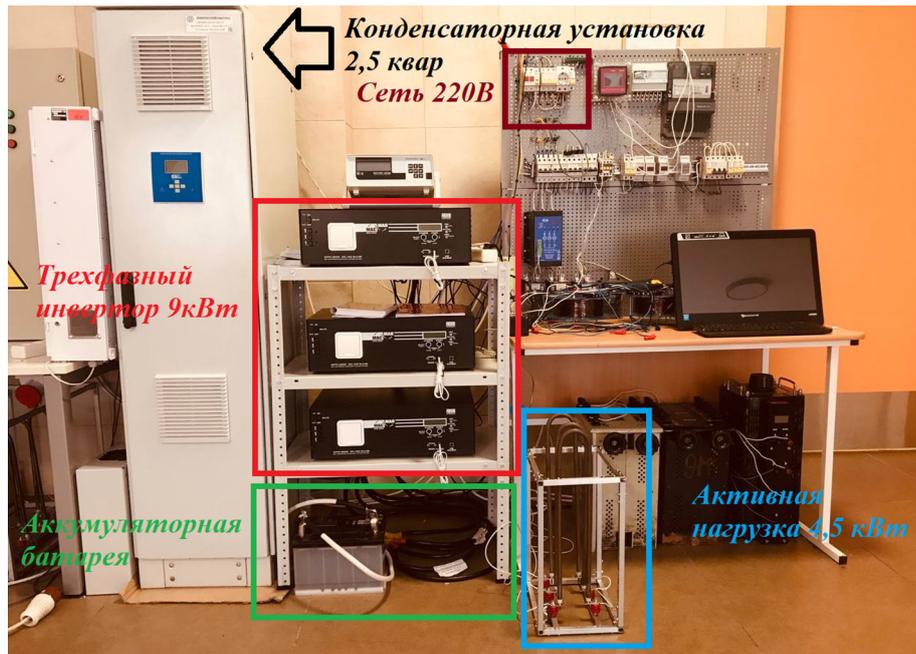


Рис. 1. Гибридный инвертор МАП Hybrid

Fig. 1. MAP Hybrid hybrid inverter

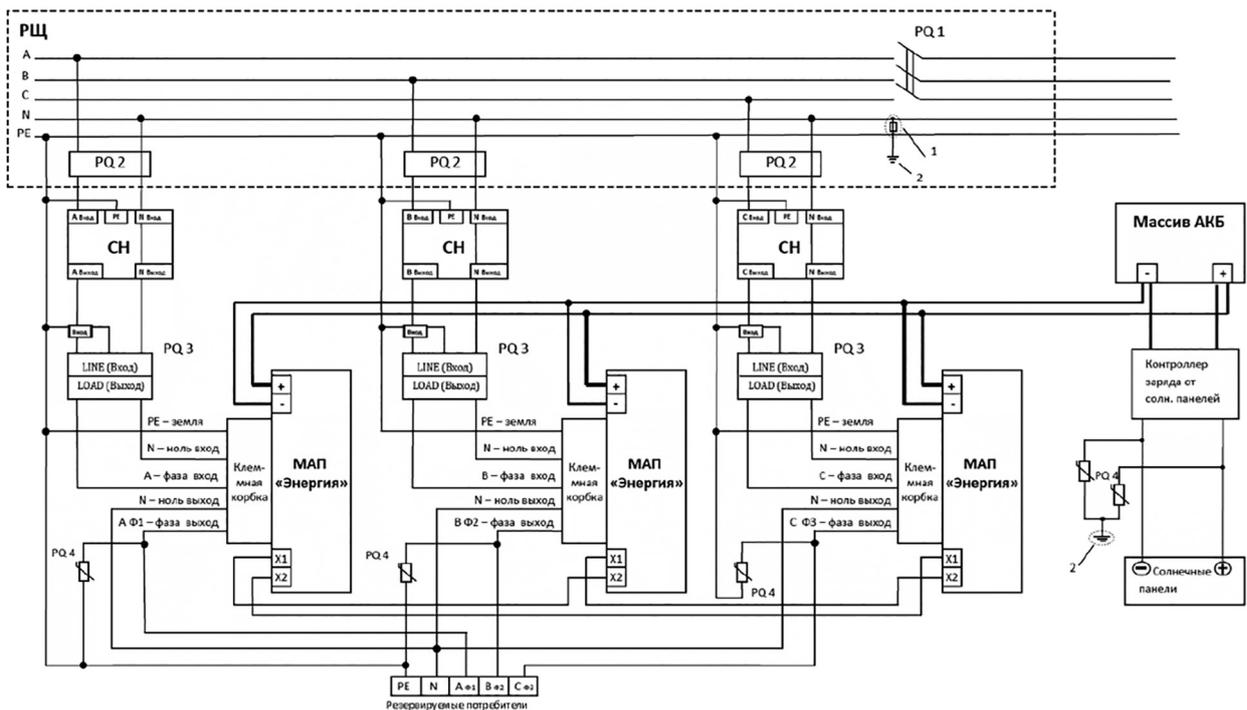


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема гибридного инвертора

Fig. 2. Electrical schematic diagram of a hybrid inverter

в режиме генерации электроэнергии в сеть, и в пределах от 50 до 300 Вт в режиме заряда АКБ.

В результате лабораторных исследований были получены зависимости суммарных гармонических искажений тока (THDI) при раз-

личных режимах работы инвертора и сопротивлений системы. На рис. 3 представлена зависимость выходной мощности инвертора и THDI выходного тока инвертора от времени.

Из графика видно, что с увеличением выходной мощности инвертора снижается THDI

Параметры лабораторной установки
 Table. Laboratory bench parameters

Наименование элемента	Параметры и значения
Электрическая сеть	$U_0 = 220 \text{ В}, Z_{\phi 01} = 0,8 \text{ Ом}, Z_{\phi 02} = 2,8 \text{ Ом},$
Гибридный инвертор	$P_{\text{НОМ}} = 9 \text{ кВт}, U_{\text{НОМ}} = 220/12 \text{ В}$
Линейная нагрузка	$P_{\text{НОМ}} = 4,5 \text{ кВт}, U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$
Конденсаторная установка	$Q_{\text{НОМ}} = 2,5 \text{ квар}, U_{\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$

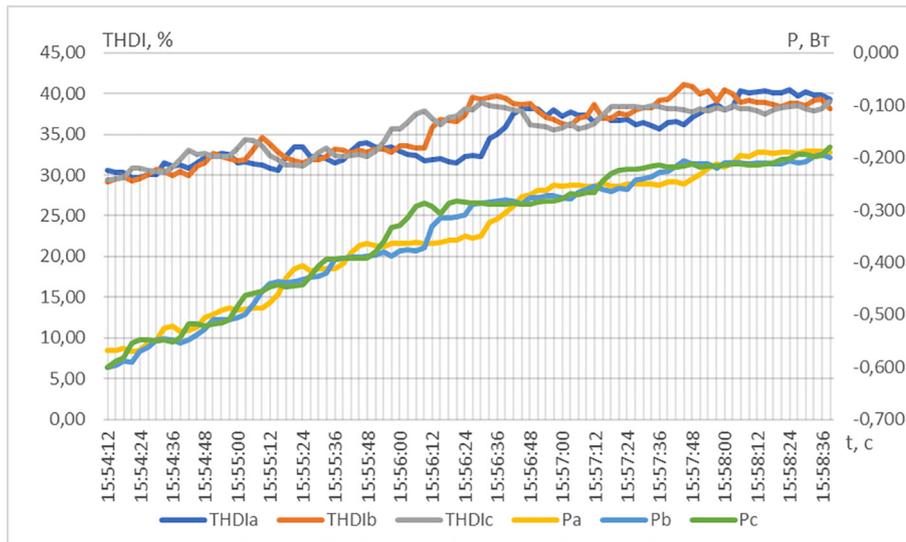


Рис. 3. Зависимость выходной мощности инвертора и THDI выходного тока от времени

Fig. 3. Dependence of the output power of the inverter and THDI of the output current on time

выходного тока. Аналогичная зависимость была получена и для режима заряда АКБ. В этом случае гармонический состав тока соответствует режиму работы шестипульсного выпрямителя, а искажения в токе уменьшаются при увеличении потребляемой мощности.

На рис. 4 представлен график, характеризующий THDI выходного тока инвертора в различных режимах работы (заряд АКБ и выдача мощности в сеть) в зависимости от сопротивления петли фаза-ноль.

Из графика видно, что в рассматриваемых режимах THDI выходного тока инвертора уменьшается при подключении дополнительного сопротивления в линию, т.е. при увеличении сопротивления системы.

Основные результаты и выводы:

1) напряжение на выходе инвертора остается постоянным, что объясняется типом инвертора, у которого на выходе напряжение не изменяется, как у источника напряжения;

2) искажение тока на выходе инвертора зависит от выдаваемой мощности: большое искажение тока при низкой выходной мощности, но при увеличении выходной мощности искажение тока быстро уменьшается;

3) при отсутствии фильтра сопротивление системы незначительно влияет на искажение выходного тока инвертора: с увеличением сопротивления системы THDI выходного тока инвертора снижается;

4) влияние искажений от инвертора на распределительную сеть зависит от сопротивления системы: если сопротивление системы возрастает, то влияние искажения напряжения от инвертора становится выше и наоборот, уменьшение сопротивления системы приводит к снижению искажения напряжения в сети, т.е. уменьшению влияния искажений от инвертора.

Стоит отметить, что в лабораторных условиях не удалось получить значения THDU

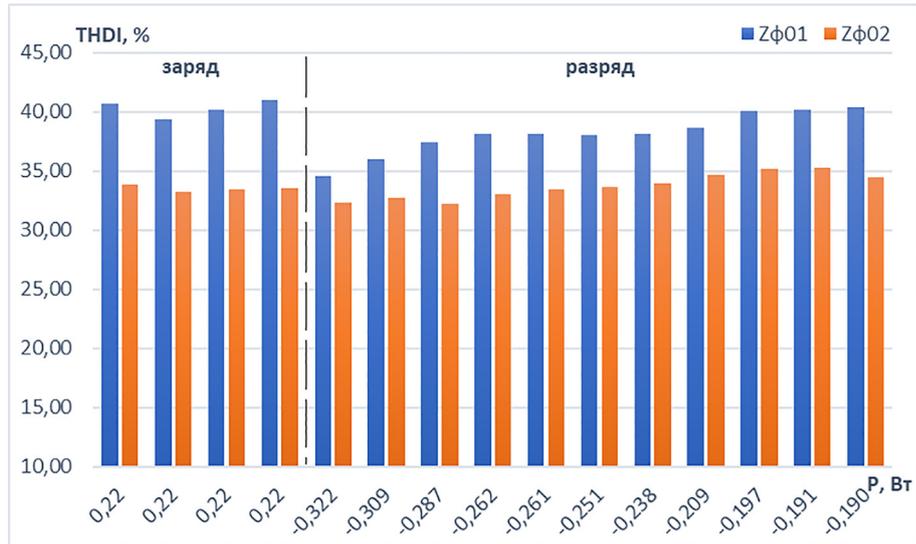


Рис. 4. Зависимость THDI выходного тока инвертора от мощности заряда/разряда и сопротивления петли фаза-ноль

Fig. 4. Dependence of THDI of the output current of the inverter on the charge/discharge power and phase-zero loop resistance

на выходе инвертора [8], что объясняется достаточно мощной сетью и инвариантностью этого показателя для рассматриваемых условий.

Разработка алгоритма выбора методов и средств по снижению влияния гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети

На основании полученных результатов был разработан алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости при работе нагрузки и гибридного инвертора с накопителем энергии, позволяющий снизить влияние гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети [9]. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

Суть алгоритма заключается в следующем.

Первоначально необходимо провести измерения показателей качества электроэнергии в части гармонических искажений по току и напряжению в точке подключения гибридного инвертора к сети. Подразумевается подключение промышленного гибридного инвертора к сети через силовой трансформатор. Главным показателем, характеризующим влияние инвертора на искажение в напряжении сети, является коэффициент искажения по току, так как если он соответствует более строгим стандартам ИЕС и IEEE, то и искажения в напряжении будут в пределах нормативных значений. На основании полученных результатов

исследований было выявлено, что повышение выходной мощности инвертора приводит к снижению искажения выходного тока, что целесообразно осуществить в случае наличия резерва по мощности инвертора и накопителя энергии. Далее при несоответствии показателей качества электроэнергии нормативным требованиям, применяются другие методы по ограничению искажений напряжения и тока на выходе инвертора: построение устройств на основе многоуровневых инверторов напряжения и применение фильтров высших гармоник. После приведения показателей по току в нормируемые пределы влияние на искажение напряжения сети будет минимально. Однако если искажение напряжения сети превышает нормируемые значения (например, в случае наличия искажения сети до подключения гибридного инвертора), то необходимо провести расчеты по снижению сопротивления системы с помощью возможного варьирования положения отпаяк вводного силового трансформатора, так как уменьшение сопротивления системы приводит к уменьшению искажения в напряжении на выходе трансформатора. В случае, если искажение напряжения сети до сих пор превышает нормируемые значения, то режимы работы гибридного инвертора не оказывают влияние на искажение напряжения в сети, поэтому необходимо применение сторонних мероприятий, не связанных с работоспособностью инвертора напряжения.

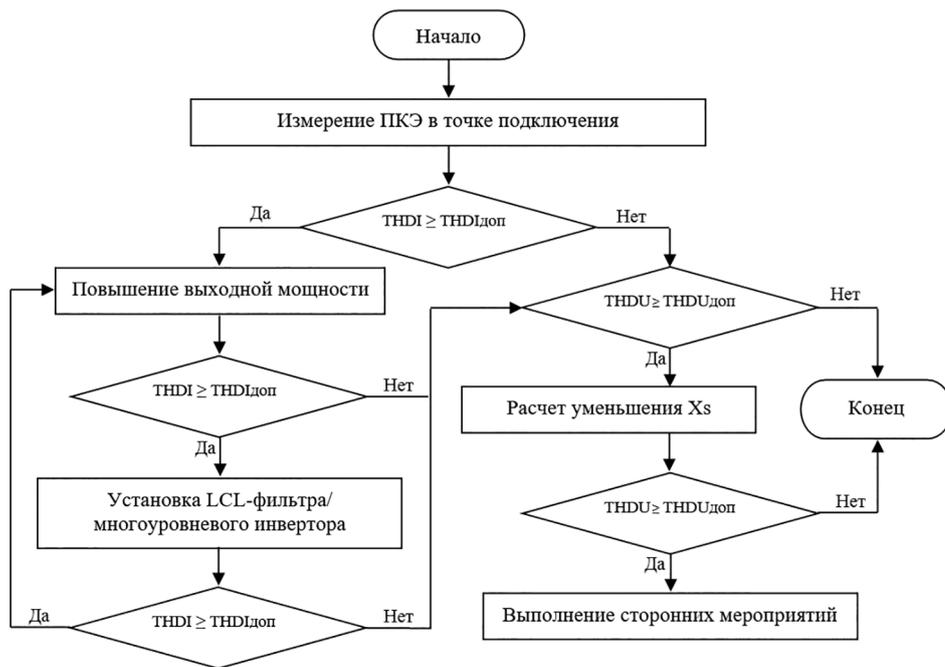


Рис. 5. Блок-схема алгоритма выбора методов и средств по снижению влияния гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for choosing methods and means to reduce the effect of hybrid inverters on the voltage distortion of the supply network

Заклучение

В работе исследовались несколько режимов работы гибридного инвертора с оценкой показателей качества электроэнергии. Получены зависимости THDI на выходе инвертора от выходной мощности для линейной нагрузки. Предложен алгоритм выбора методов и средств по обеспечению электромагнитной совместимости при работе нагрузки и гибридного инвертора с накопителем энергии, позволяющий снизить влияние гибридных инверторов на искажение напряжения питающей сети.

Литература

1. Akoro E., Amadou S.M., Tevi G.J.P. (2017). Different topologies of three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 2 (2), pp. 33–41. ISSN 2312-8712.
2. Федоров А.В., Махалин А.Н., Бабурин С.В. Применение ИБП в энергетических установках технологических объектов нефтегазовой отрасли // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2014. № 2 (58). С. 69–73.
3. Бельский А.А., Добуш В.С., Хайкал Ш.Ф. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности. *Записки Горного Института*. Т. 239. С. 564. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564
4. Rana, Ronak & Patel, Sujal & Muthusamy, Anand & Lee, Chee & Kim, Hee-Je. (2019). Review of Multi-level Voltage Source Inverter Topologies and Analysis of Harmonics Distortions in FC-MLI. *Electronics*. 8. 1329. DOI: 10.3390/electronics8111329
5. Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19. № 22. С. 134–138.
6. Shahina Firdoush, Shruti Kriti, Avinow Raj, Shusant Kumar Singh, 2016, Reduction of Harmonics in Output Voltage of Inverter, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) CMRAES – 2016 (Volume 4 – Issue 02)*.
7. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Методы и средства коррекции показателей качества электрической энергии на предприятиях минерально-сырьевого комплекса // *Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: Сборник научных трудов II Всероссийской научной конференции*, Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. С. 987–992.
8. Добуш В.С., Бельский А.А. Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения по

- требителей // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 29–34.
9. Скамьин А.Н., Васильков О.С. Компенсация влияния высших гармоник на электрооборудование при их возникновении со стороны сети // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 декабря 2018 года. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг «РАДУГА»», 2018. С. 157–160.
- ### References
1. Akoro E., Amadou S.M., Tevi G.J.P. (2017). Different topologies of three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 2 (2), pp. 33–41. ISSN 2312-8712.
 2. Fedorov A.V., Makhalin A.N., Baburin S.V. The use of uninterruptible power supplies in power plants of technological facilities in the oil and gas industry. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2014. No 2 (58), pp. 69–73 (in Russ.).
 3. Bel’skiy A.A., Dobush V.S., Khaykal SH.F. Operation of a single-phase autonomous inverter as part of a low-power wind power complex. *Zapiski Gornogo Instituta*. V. 239, pp. 564 (in Russ.). DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564
 4. Rana, Ronak & Patel, Sujal & Muthusamy, Anand & Lee, Chee & Kim, Hee-Je. (2019). Review of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies and Analysis of Harmonics Distortions in FC-MLI. *Electronics*. 8. 1329. DOI: 10.3390/electronics8111329
 5. Makarov V.G., Khaybrakhmanov R.N. Multilevel voltage inverters. Topology overview and application. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. V. 19. No 22, pp. 134–138 (in Russ.).
 6. Shahina Firdoush, Shruti Kriti, Avinow Raj, Shusant Kumar Singh, 2016, Reduction of Harmonics in Output Voltage of Inverter, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) CMRAES* – 2016 (Volume 4 – Issue 02).
 7. Abramovich B.N., Sychev Yu.A. Methods and means of correcting indicators of the quality of electrical energy at enterprises of the mineral resource complex. *Sovremennyye obrazovatel’nyye tekhnologii v podgotovke spetsialistov dlya mineral’no-syr’evogo kompleksa: Sbornik nauchnykh trudov II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 27–28 sentyabrya 2018 goda [Modern educational technologies in the training of specialists for the mineral resource complex: Collection of scientific papers of the II All-Russian scientific conference, St. Petersburg, September 27–28, 2018]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2018, pp. 987–992 (in Russ.).
 8. Dobush V.S., Bel’skiy A.A. Analysis of the impact of uninterruptible power supplies on the quality of electricity at the point of common consumer connection. *Promyshlennaya energetika*. 2018. No 6, pp. 29–34 (in Russ.).
 9. Skam’in A.N., Vasil’kov O.S. Compensation of the influence of higher harmonics on electrical equipment when occurring from the network side. *Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Moskva, 05–07 dekabrya 2018 goda [Electricity quality management: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 05–07 December 2018]. Moscow: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost’yu «“Tsentr poligraficheskikh uslug “RADUGA”» Publ., 2018, pp. 157–160 (in Russ.).

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF A HYBRID INVERTER ON POWER QUALITY

DSc in Engineering **YA.E. Shklyarskiy**, PhD in Engineering **A.N. Skam'in**, **O.S. Vasil'kov**
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
s175070@stud.spmi.ru

The integration of alternative energy sources and various technologies of distributed generation with power electronic converters in electrical networks leads to an increase in the diversity of the network, but at the same time to the tightening of the requirements of various standards, for example, a limited harmonic composition of the generated current, continuous operation of the device with voltage distortion, etc. Taking this fact into account, the paper presents the results of experimental studies of the effect of a hybrid inverter on power quality indicators at the point of common connection. A laboratory bench was developed. It consists of a three-phase hybrid inverter, a storage battery, a linear load in the form of an active resistance and a capacitor unit. The inverter has been connected to the power supply for parallel operation to supply the load in the form of active resistance. The modes of battery charging and power delivery to the network with two variations of the system resistance were investigated. The power output from the inverter varied from 500 W to 2 kW in the mode of generating electricity to the grid, and in the range from 50 to 300 W in the battery charging mode. As a result of laboratory studies, the dependences of the total harmonic current distortion (THDI) were obtained for various operating modes of the inverter and system resistances. On the basis of the obtained results, an algorithm for the selection of methods and means to ensure electromagnetic compatibility during operation of the load and a hybrid inverter with energy storage was developed. It makes it possible to reduce the effect of hybrid inverters on the voltage distortion of the supply network.

Keywords: hybrid inverter, storage battery, power quality indicators.

Cite as: Shklyarskiy YA.E., Skam'in A.N., Vasil'kov O.S. Experimental studies of the effect of a hybrid inverter on power quality. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 3 (49), pp. 2–9 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-2-9