

Обзор применения силовой полупроводниковой электроники для нужд малой генерации

Координатор ИК С6 РНК СИГРЭ
В.О. Самойленко

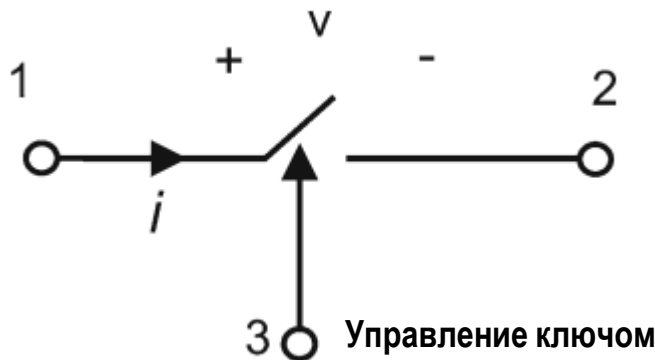
- Концепция, проблемы и направления улучшения силовых преобразователей для работы с малой генерацией (МГ);
- Виды и особенности применяемых полупроводниковых устройств;
- Схемы соединения и управления полупроводниковыми приборами;
- Обобщенная схема работы установки МГ с преобразователем;
- Влияние установок МГ с преобразователями на частотные характеристики системы;
- Влияние преобразователей на статическую и динамическую устойчивость МГ;
- Использование силовой полупроводниковой силовой электроники для нужд малой генерации;
- Статистика причин отказов полупроводниковых преобразователей;
- Международные стандарты по подключению объектов малой генерации через полупроводниковые устройства.



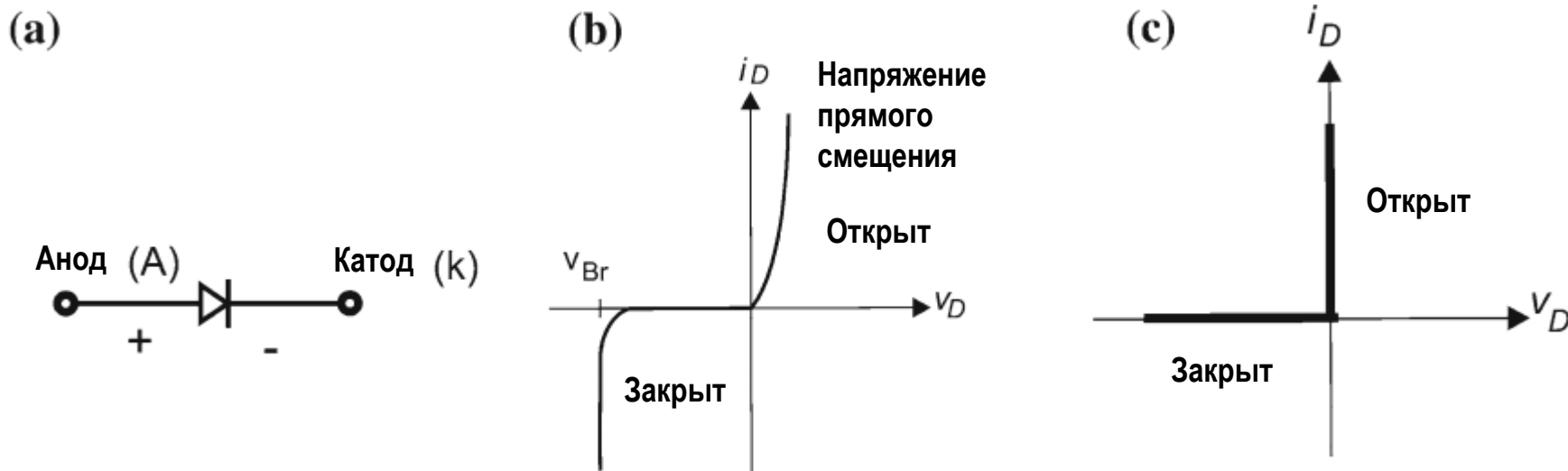
СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Полупроводниковые устройства. Идеальный ключ для нужд преобразования электроэнергии



Идеальный ключ	Реальный ключ
В замкнутом состоянии падение напряжения равно нулю и устройство может проводить бесконечный ток	Ограничения по току (несколько кА) и тепловому режиму (десятки °C).
В разомкнутом состоянии ток равен нулю и устройство может выдерживать бесконечное напряжение	Обратная (иногда – прямая) проводимость (доли %), наличие конечного напряжения пробоя (несколько кВ)
Время переключения из одного состояния в другое равно нулю, нет собственных переходных процессов при переключении	Время перехода из одного состояния в другое и переходного процесса – до 5 мкс
Отсутствуют потери и затраты энергии на переключение из одного состояния в другое	КПД реального ключа - 98 %, частота системы управления 0,5 - 3,5 кГц
Отсутствует влияние на качество электроэнергии	Доля высших гармоник в напряжении до 30%



(a) – обозначение, (b) – реальная характеристика, (c) – идеальная характеристика.

Наработка на отказ – 20 лет.

Достоинства и недостатки:

- + Простота, большой диапазон напряжений и токов (до 10 кВ, 10 кА) единичн. у-ва
- Неуправляемость

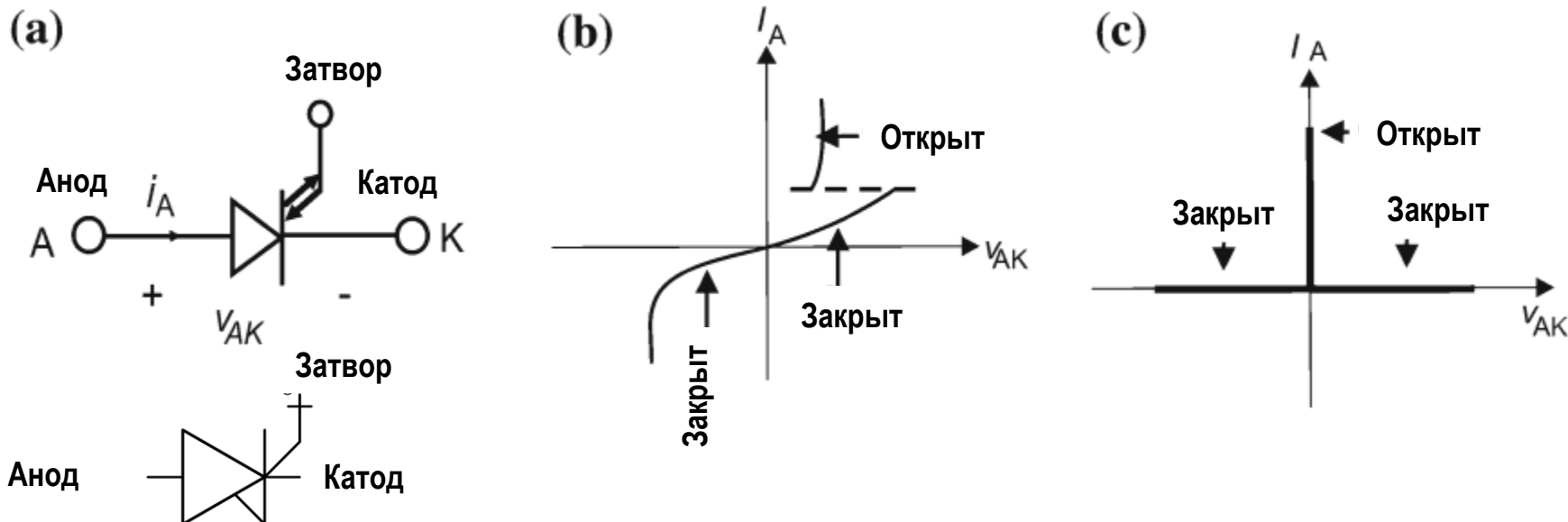
Применение: простые выпрямители, антипараллельное включение с тиристорами или транзисторами в сложных схемах.



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Полупроводниковые устройства. Запираемые тиристоры (GTO) и тиристоры с интегрированным управлением (IGCT)



(a) – обозначение, (b) – реальная характеристика, (c) – идеальная характеристика.

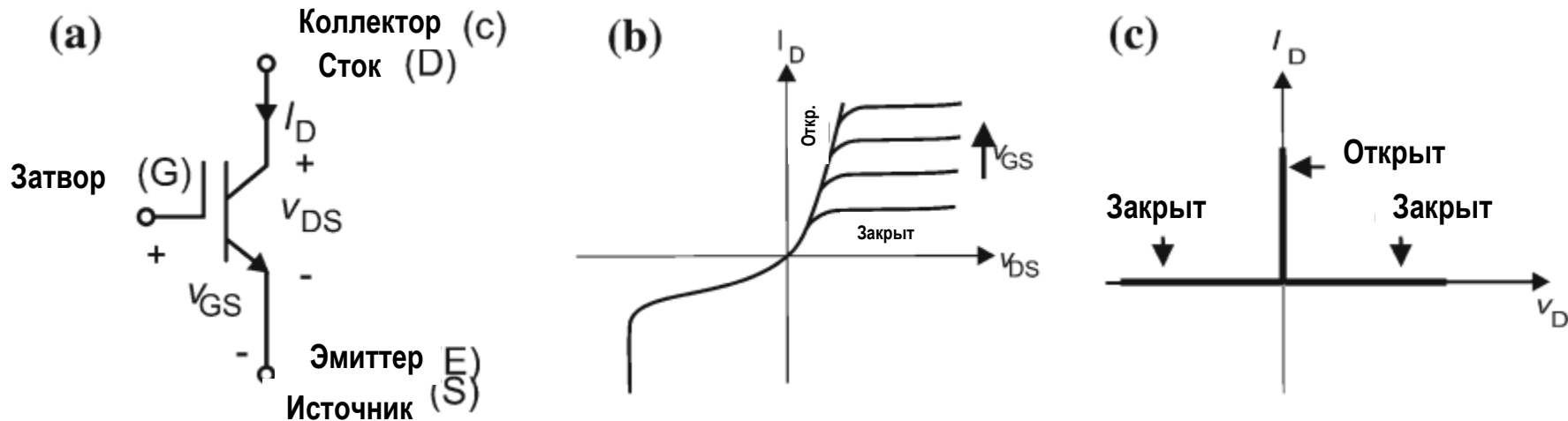
Наработка на отказ – 6 лет.

Достоинства и недостатки:

- + Большой диапазон напряжений и токов единичного устройства
- Запираемые тиристоры: низкое быстродействие, большие потери
- Тиристоры с интегрированным управлением: технологическая сложность (совместная разработка **ABB** и **Mitsubishi Electric**).

Применение: преобразователи.

Полупроводниковые устройства. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT)



(a) – обозначение, (b) – реальная характеристика, (c) – идеальная характеристика.

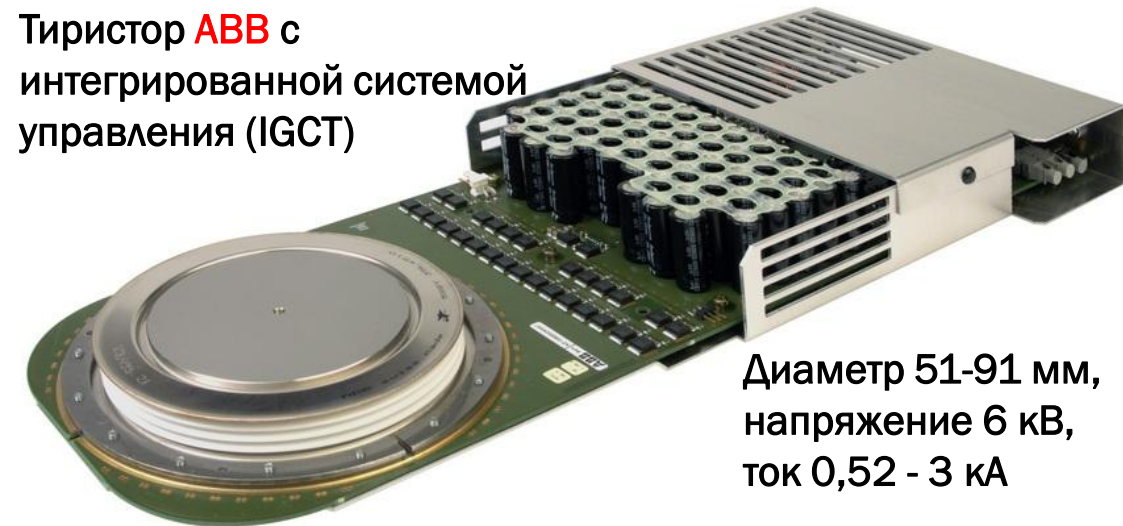
Наработка на отказ – 3 года. Является комбинацией биполярного транзистора (BJT) и полевого транзистора с изолированным затвором (MOSFET).

Достоинства и недостатки:

- + Быстродействие, управляемость напряжением, низкие потери
- Диапазон напряжений и токов (3 кВ, 0.5 кА), последовательно-параллельное вкл.

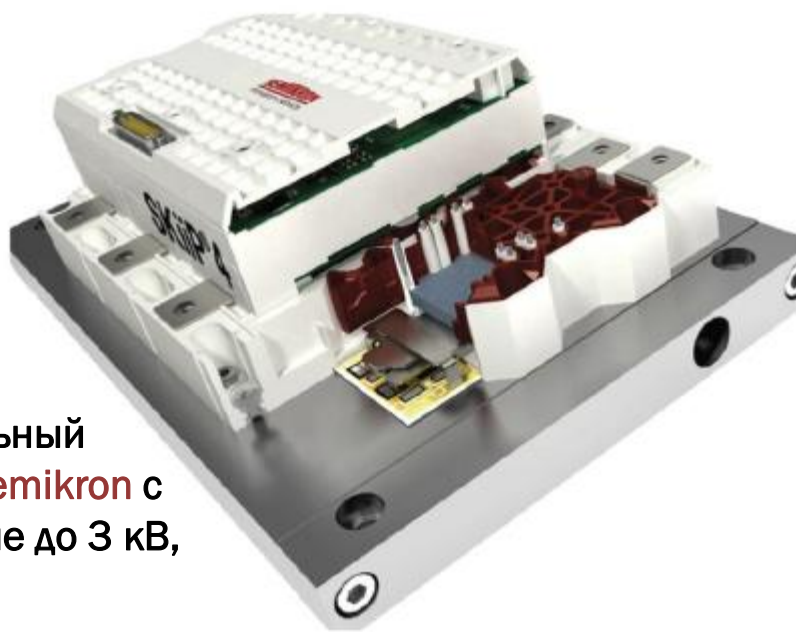
Применение: инверторы.

Тиристор **ABB** с
интегрированной системой
управления (IGCT)



Диаметр 51-91 мм,
напряжение 6 кВ,
ток 0,52 - 3 кА

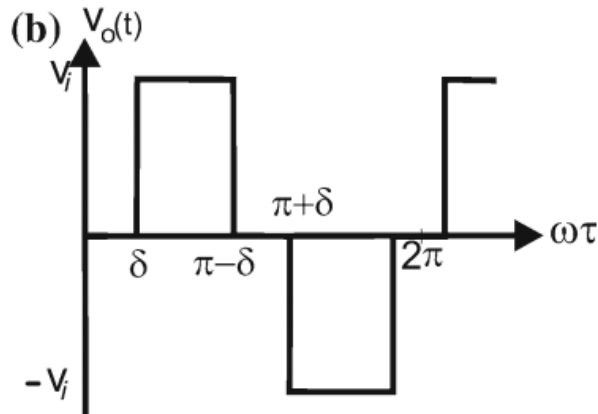
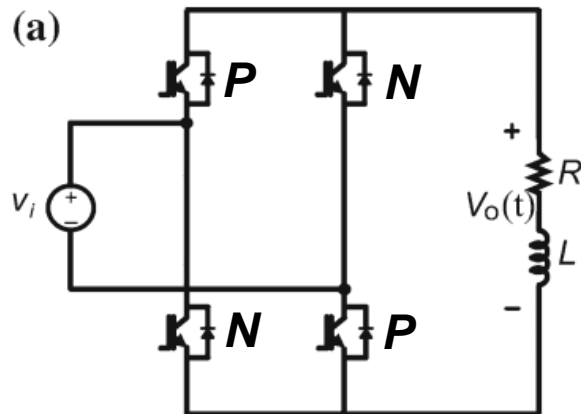
Модульный
преобразовательный
шинный блок **Semikron** с
IGBT, напряжение до 3 кВ,
ток до 1 кА



Шкаф преобразователя **ABB**



Схемы включения и принцип работы инвертора. 1

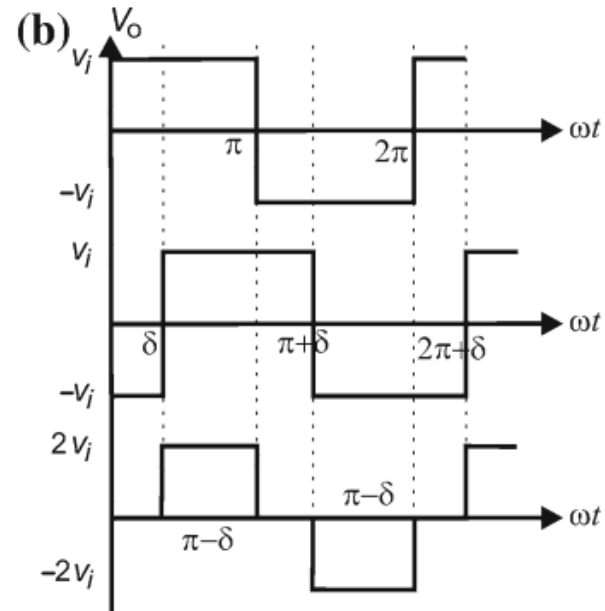
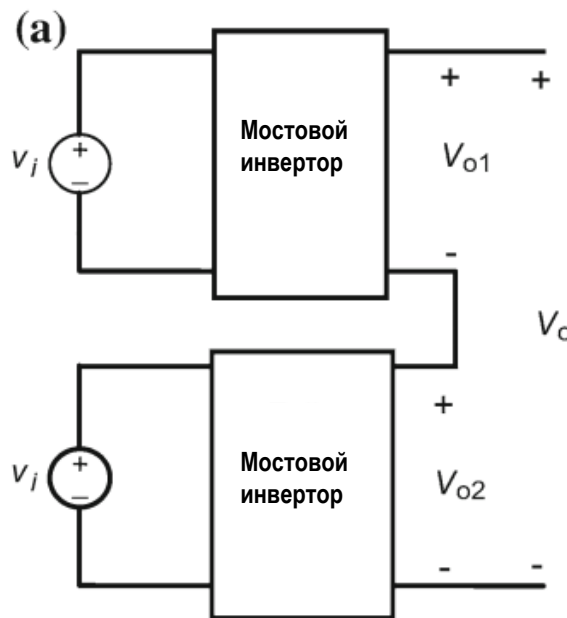


Мостовая схема инвертора

(a) – электрическая схема ,
(b) – форма кривой
напряжения.

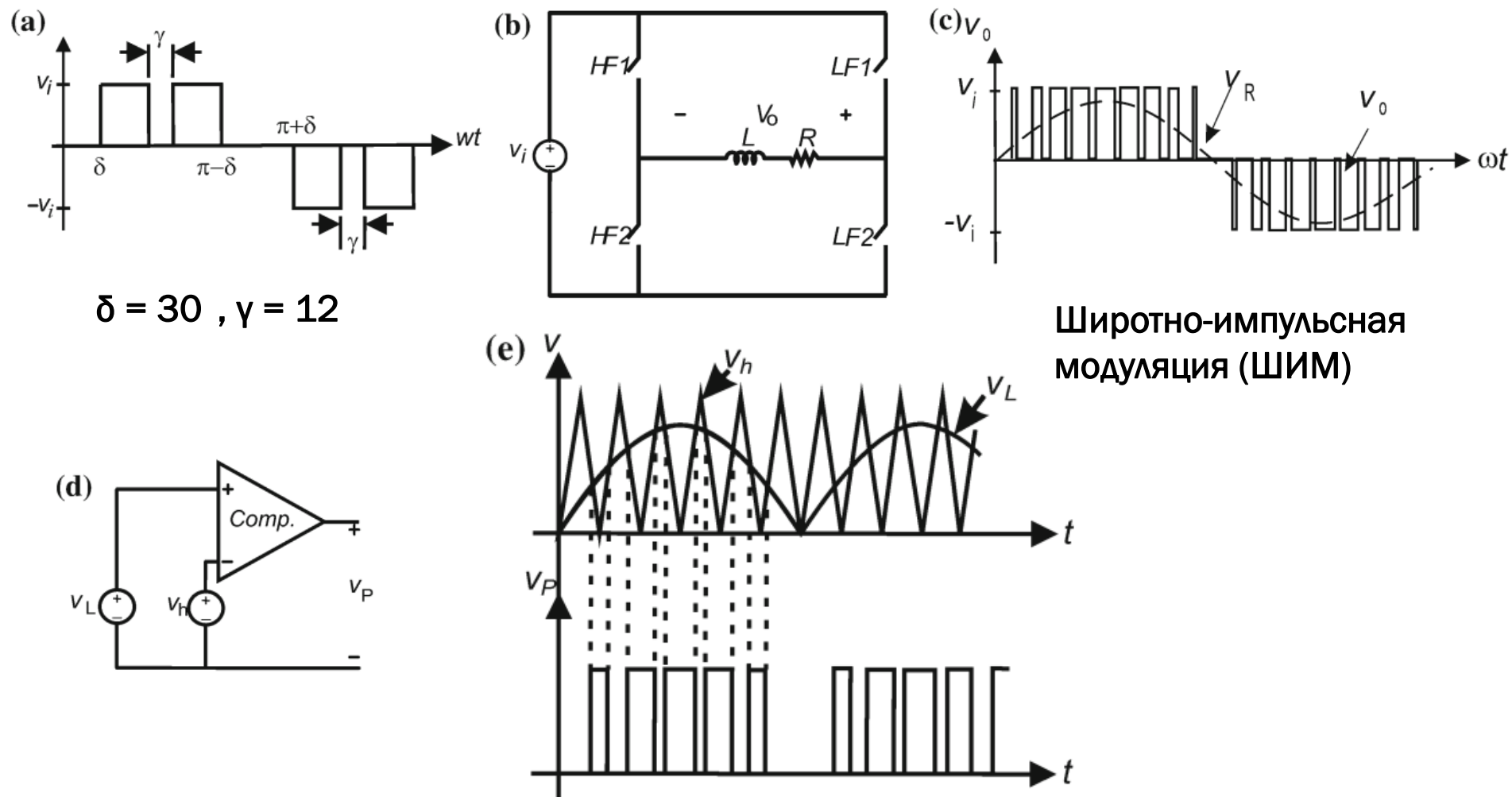
Подавление гармоник при
последовательном
соединении двух мостов

(a) – электрическая схема ,
(b) – форма кривой
напряжения.



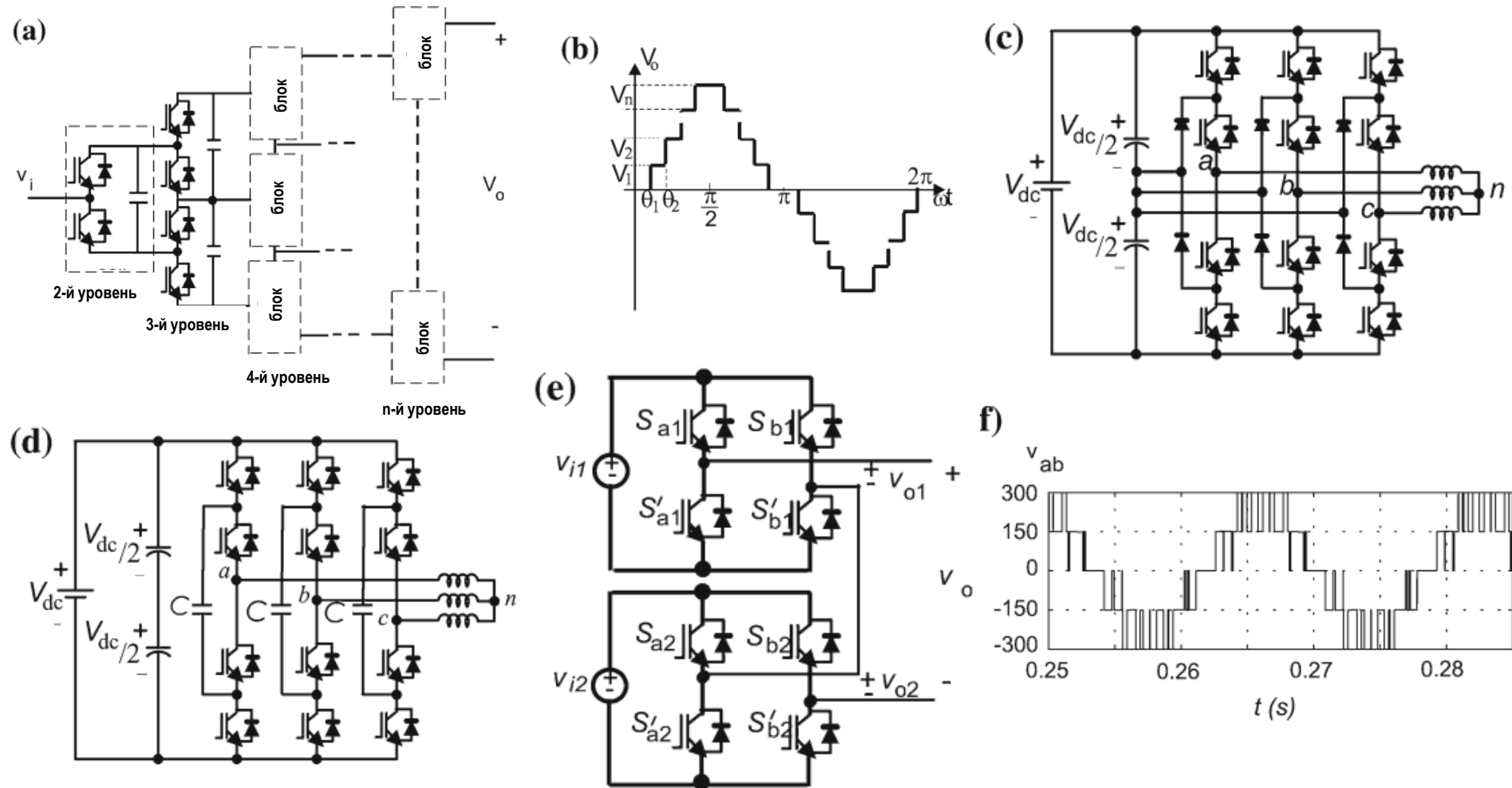


Схемы включения и принцип работы инвертора. 2



(a) – подавление различных гармоник, (b) – общая схема для выполнения ШИМ,
(c) – результат ШИМ, (d) – схема сравнения, (e) – принцип ШИМ.

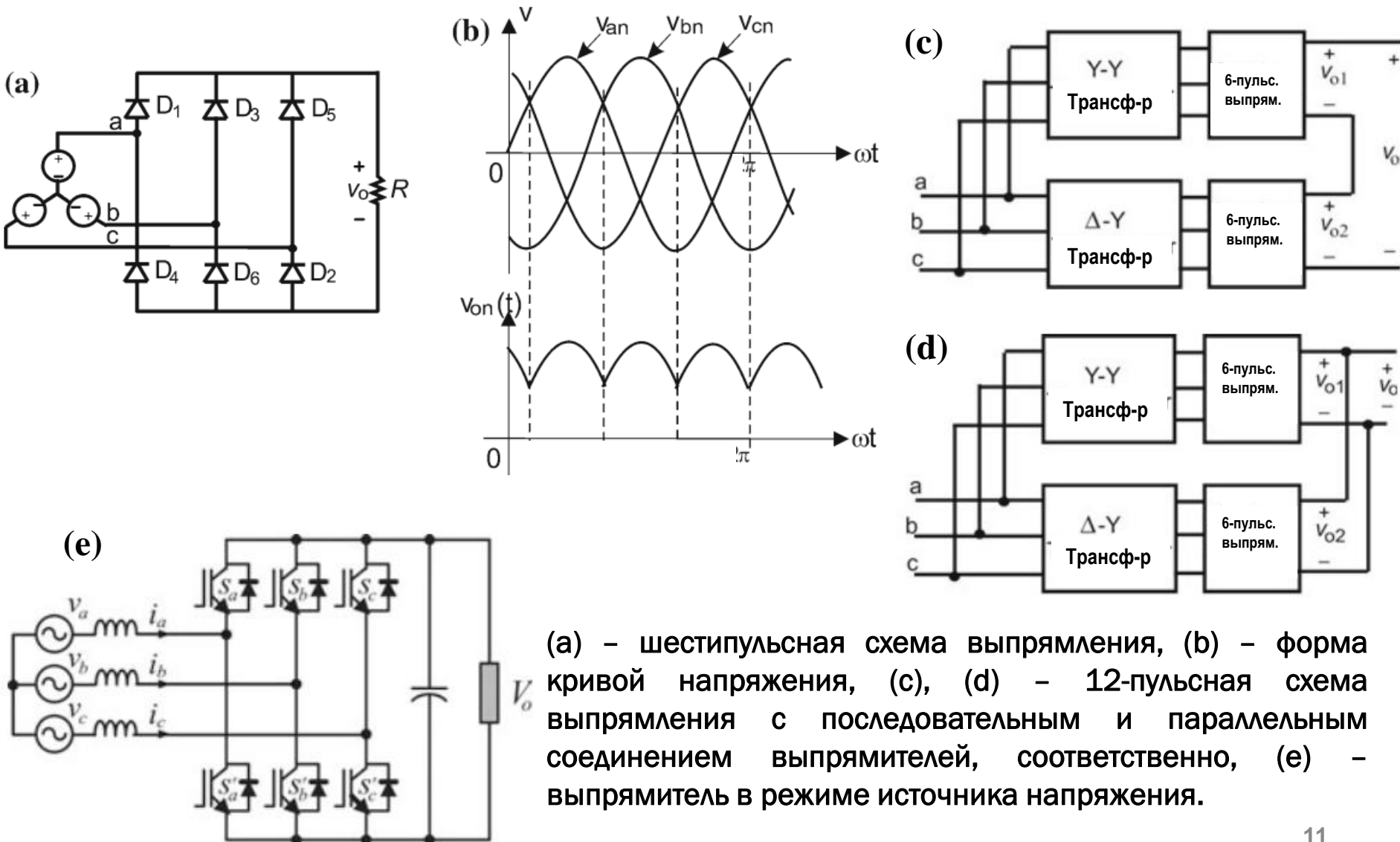
Схемы включения и принцип работы инвертора. 3



(a) – многоуровневый инвертор, (b) – форма кривой напряжения, (c) – схема со связанной нейтралью, (d) – схема с навесными конденсаторами, (e) – каскадная H-образная схема, (f) – пример формы кривой напряжения для схемы со связанной нейтралью при наличии ШИМ

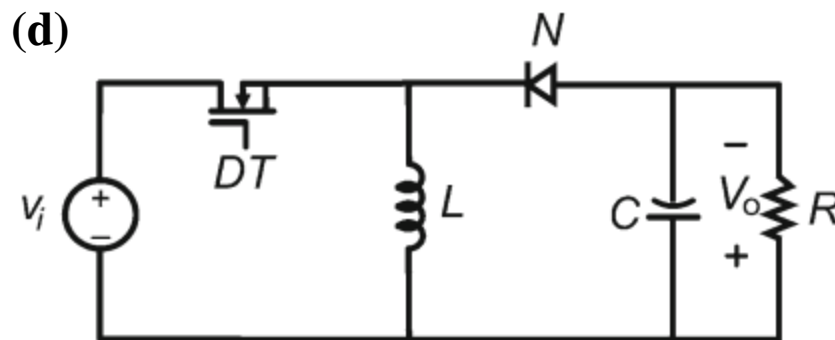
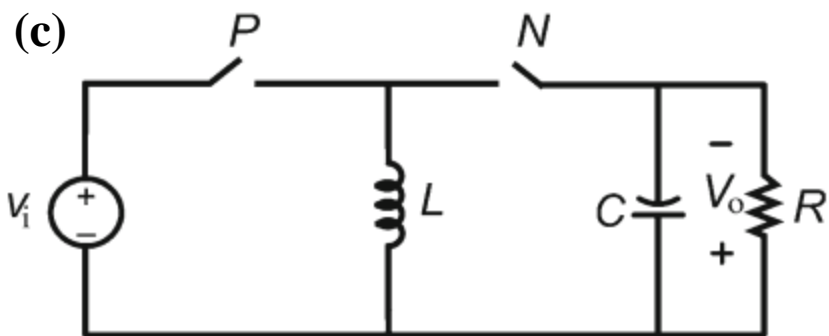
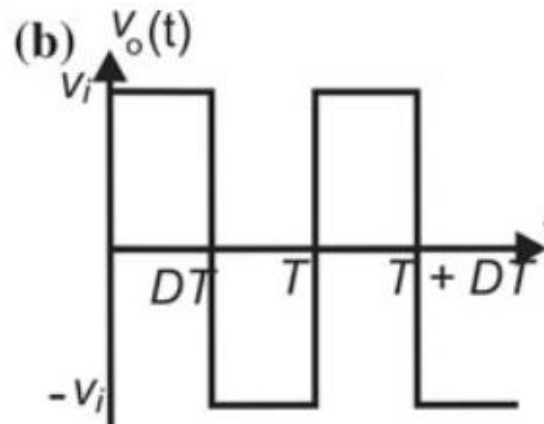
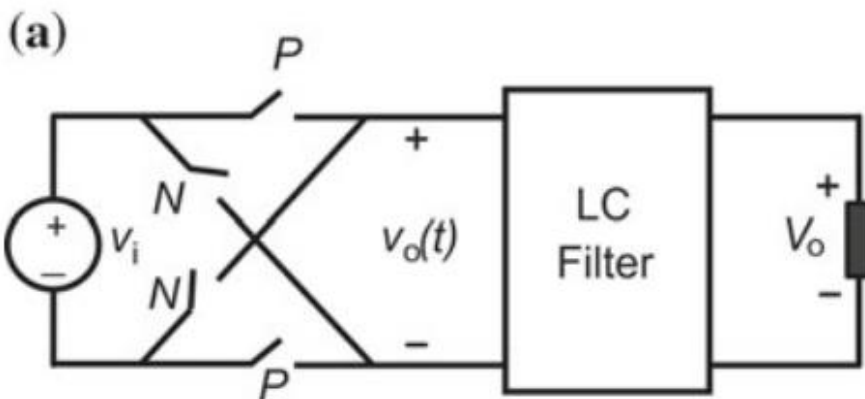


Схемы включения и принцип работы выпрямителя





Особенности прямого преобразования напряжения на постоянном токе



(a) – принцип работы мостового вольтовывчитающего преобразователя, (b) – форма кривой напряжения, (c) – принцип работы преобразователя с возможностью повышения или понижения напряжения, (d) – электрическая схема такого преобразователя.

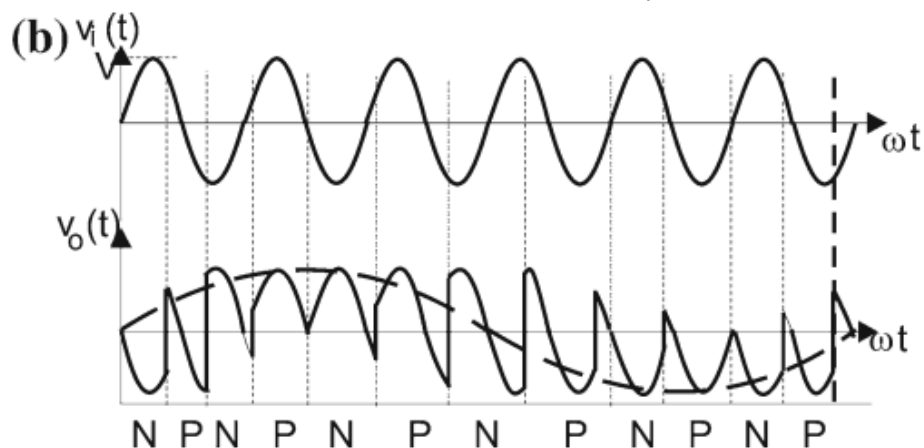
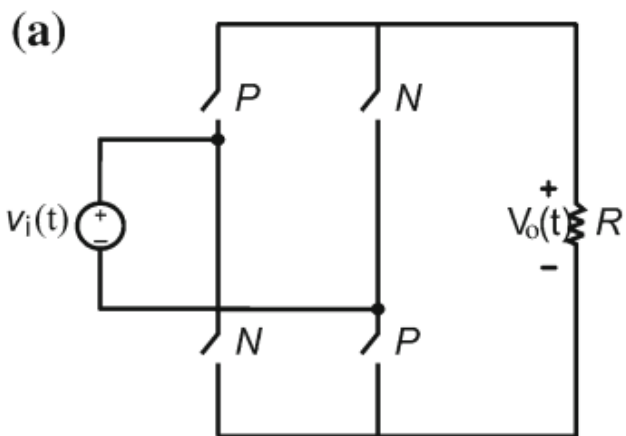
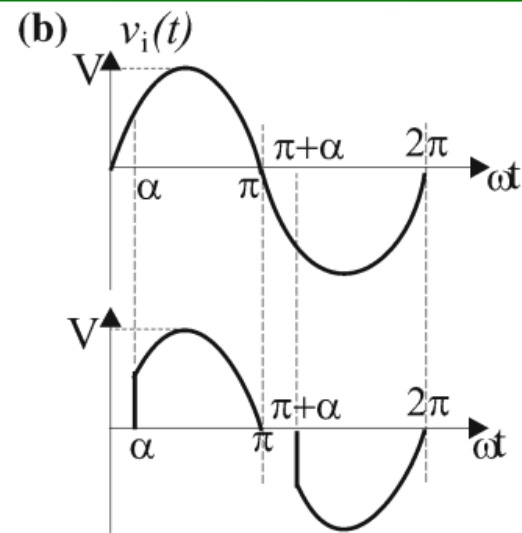
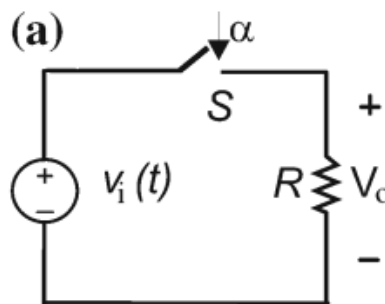


Особенности прямого преобразования напряжения на переменном токе

Преобразование с изменяемым
модулем и фиксированной частотой

(a) – электрическая схема,

(b) – форма кривой напряжения

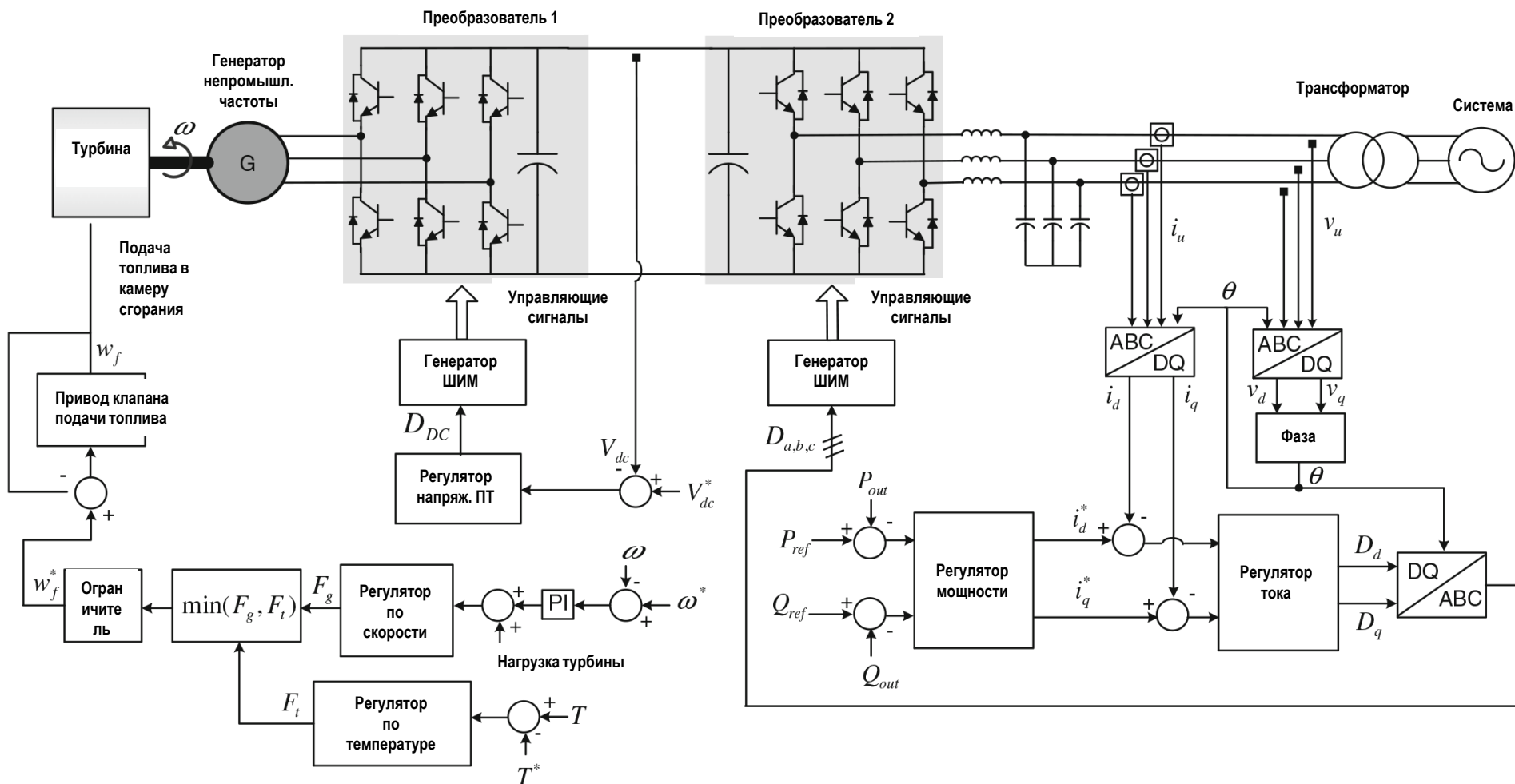


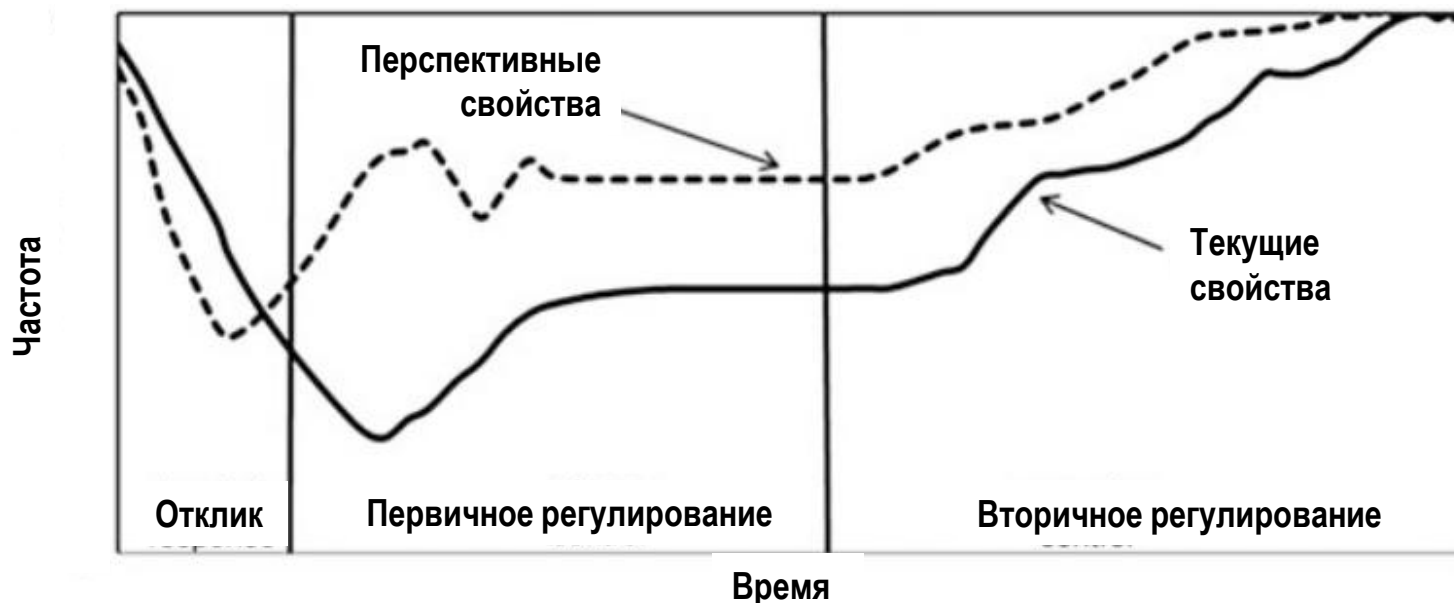
Преобразование с изменяемым модулем и изменяемой частотой

(a) – электрическая схема, (b) – форма кривой напряжения



Схема управления установкой малой генерации с преобразованием частот





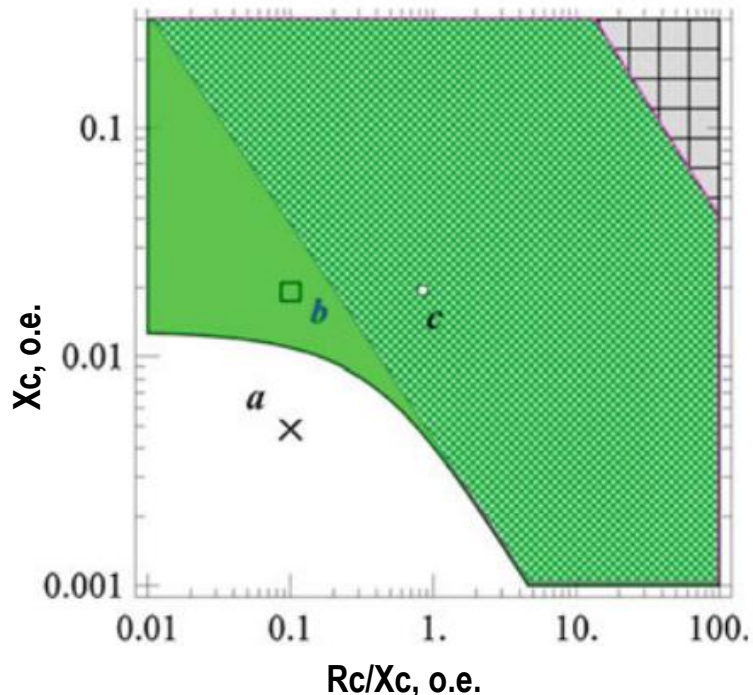
1. Инвертер практически безынерционен и способен выдавать мощность при отклонениях частоты энергосистемы до нескольких Гц от номинальной;
2. Стандарты IEEE 1547 и UL 1741: большинство инвертеров являются частотоверными;
3. Звено обратной связи по частоте энергосистемы в составе системы управления установкой не всегда предусмотрено;
4. Автоопределение автономной работы может отключить установку через 2 с после выделения;
5. Перспективное улучшение частотных свойств может быть достигнуто с помощью наращивания емкости накопителей в составе установки с реализацией функции виртуального синхронного генератора (VSG).
6. Поддержка классических частотно-мощностных свойств СГ: **SIEMENS** NetConverter.



СЕМИНАР

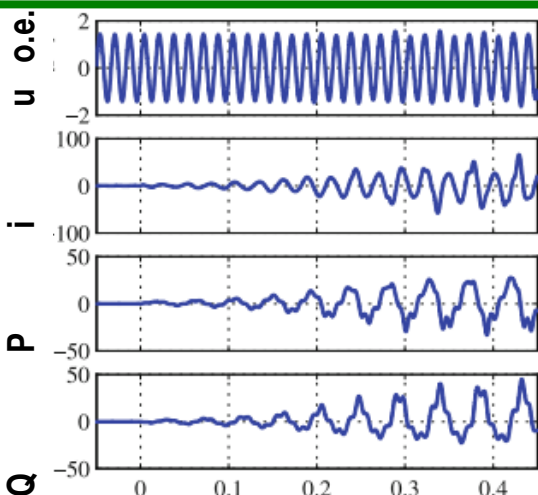
Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Влияние преобразователя на статическую устойчивость

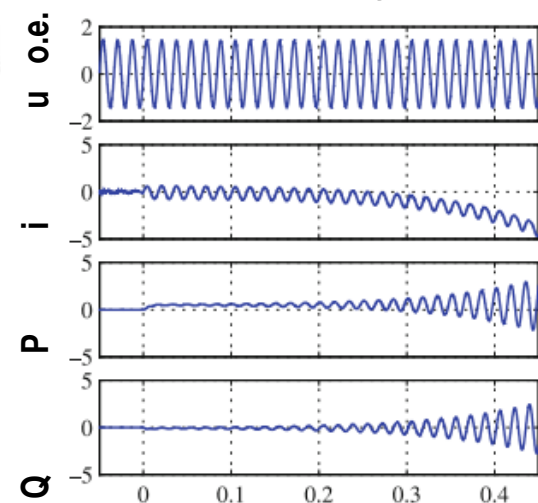


1. Способность к генерации реактивной мощности и поддержанию напряжения положительно отражается на максимуме передаваемой мощности.

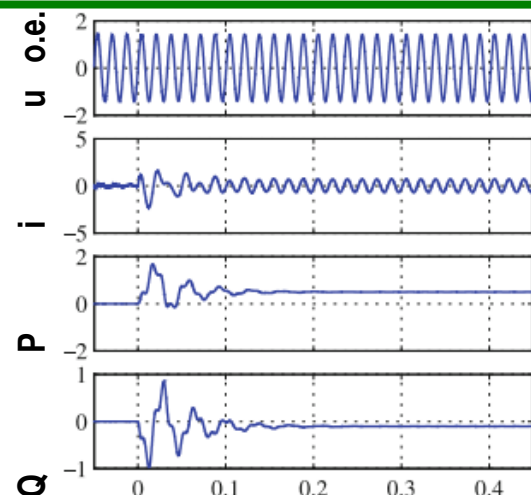
2. Устойчивость при малых возмущениях определяется настройкой системы управления и зависит от параметров системы, от алгоритма формирования выходного напряжения инвертора.



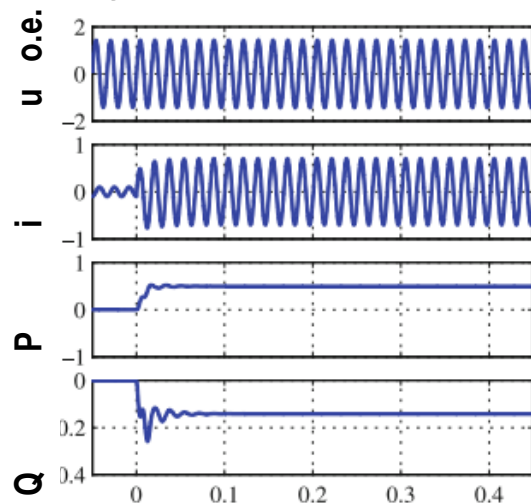
(a), любой алгоритм,
колебательная неустойчивость



(b), алгоритм синусоиды,
аперiodическая неустойчивость



(b), U-СКВ алгоритм,
устойчив

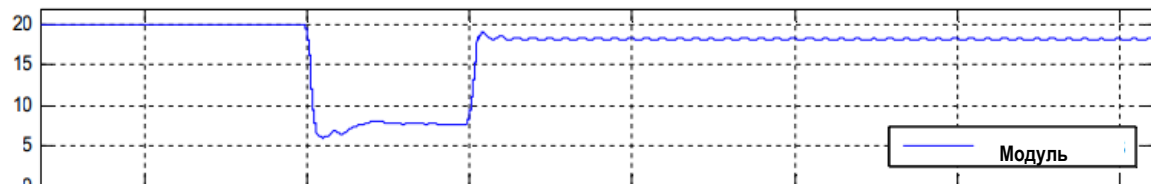


(c), любой алгоритм (на
примере алг. син.), устойчив

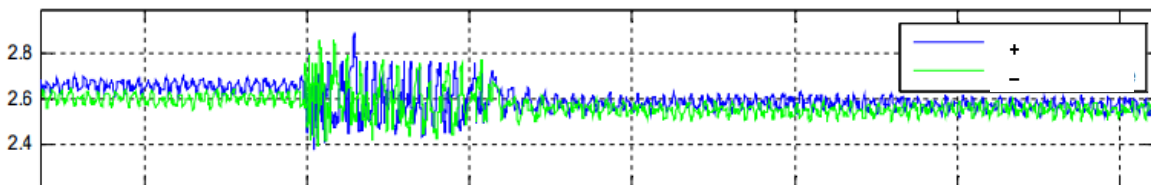


Влияние преобразователя на динамическую устойчивость

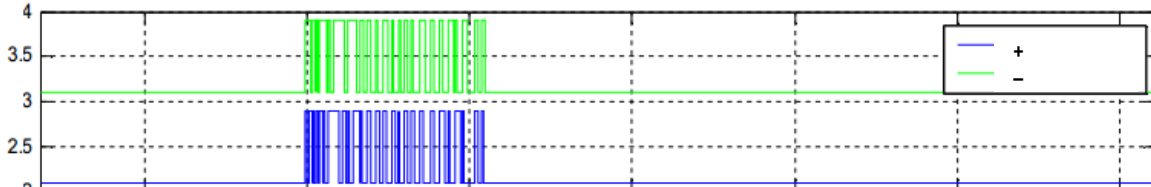
Напряжение сети, кВ



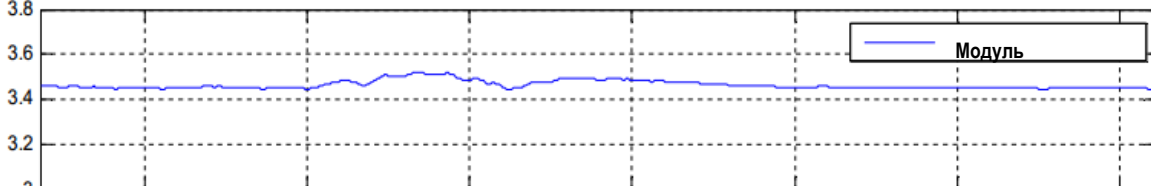
Напряжение шин преобразователя на стороне постоянного тока, кВ



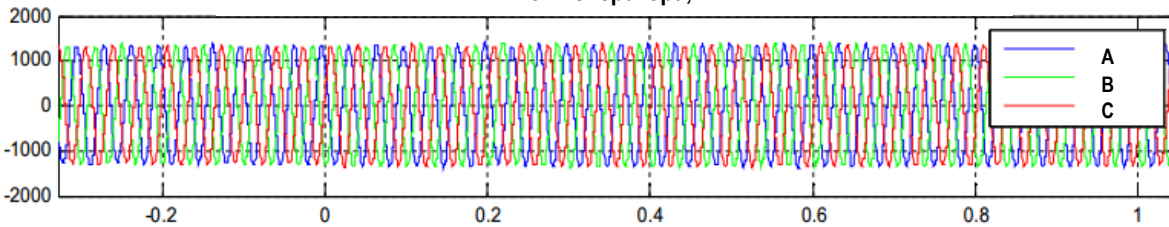
Напряжение на ограничителях перенапряжения, кВ



Напряжение генератора, кВ



Ток генератора, А

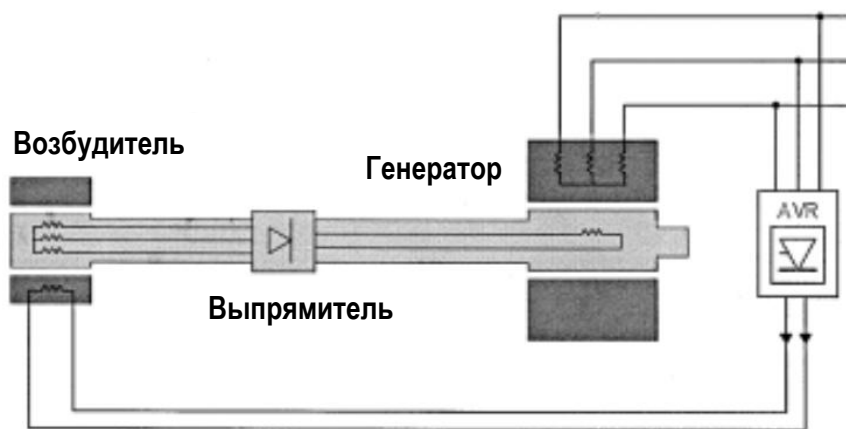


1. Уменьшение влияния близких КЗ на СГ и его переходные параметры, устранение влияния удаленных КЗ;
2. Уровень тока КЗ от СГ – около 2 о.е. вместо 10 о.е. (пятикратное уменьшение);
3. Выдача полной мощности в момент КЗ на пониженном напряжении;
4. Возможны отключения установки в результате выхода параметров СУ за допустимые пределы.

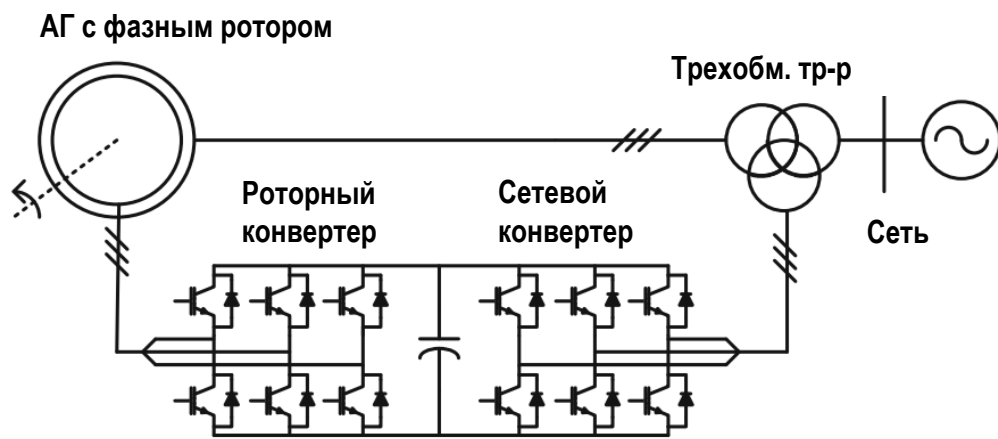
1. Системы возбуждения;
2. Коммутация цепей, согласование частот энергосистемы и генератора;
3. Симметрирование нагрузки генератора;
4. Реализация воздействий РЗА;
5. Пуски и остановки генератора;
6. Альтернативный ретрофит и перевод генератора в режим синхронного компенсатора;
7. Интеграция больших массивов возобновляемых источников энергии;
8. Интеграция различных источников энергии и разнородных нагрузок.



1. Уменьшение применения силовой преобразовательной электроники в СГ мощностью 1-5 МВт вследствие повсеместного перехода на систем возбуждения с постоянными магнитами;
2. Использование в СГ мощностью до 1 МВт с бесщеточной системой самовозбуждения;



СГ с бесщеточной системой самовозбуждения



АГ с двойным питанием

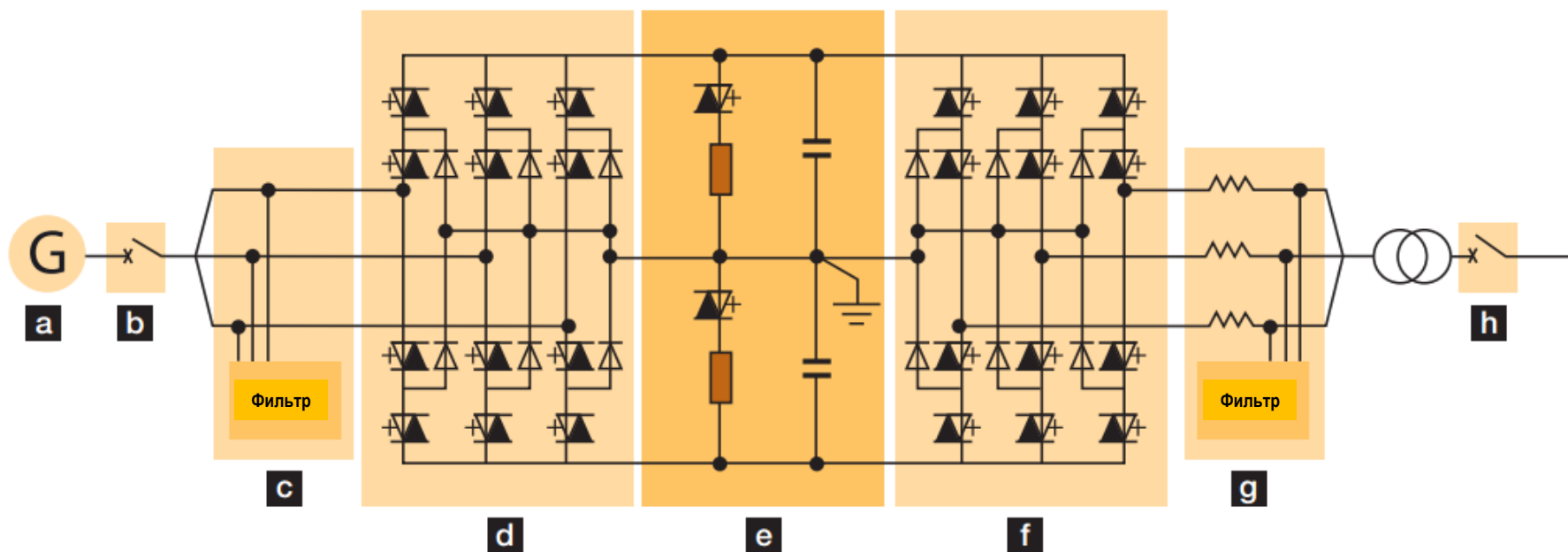
3. Использование асинхронных машин с двойным питанием (в т.ч. с бесщеточным питанием ротора);



СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Коммутация цепей и согласование частот энергосистемы и генератора

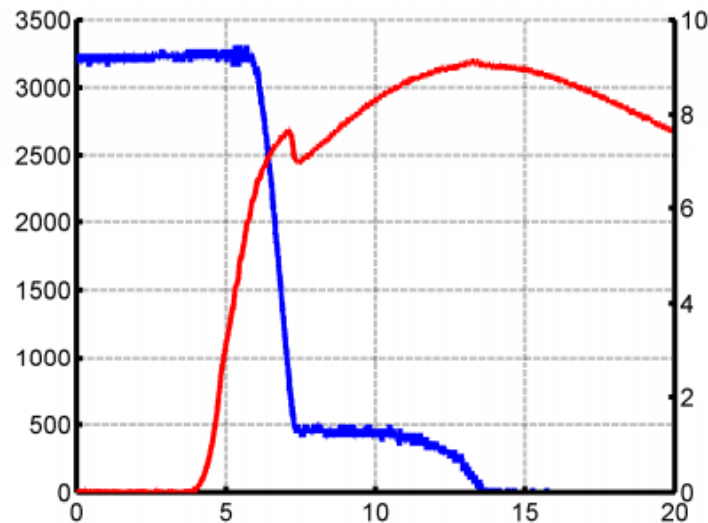


Диапазон частот: 8 – 100 Гц

Коммутационный процесс
цепи тиристором в составе
полупроводникового
преобразователя

Ток, А

Напряжение, В



Время, мкс

a Генератор

b Генераторный выключатель

c Фильтр dU/dt

d Генераторный преобразователь

e ВПТ и прерыватель

f Сетевой преобразователь

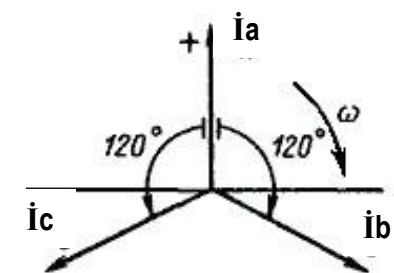
g Фильтр

h Трансформатор (при наличии) и выключатель

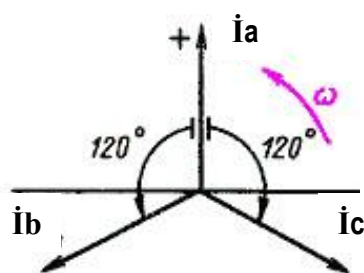


Преобразователь выполняет перераспределение мощности по фазам.

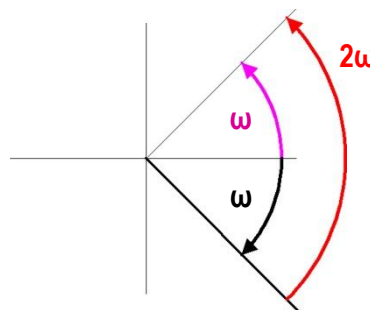
Генератор не может длительно работать на несимметричную нагрузку (особенно актуально при выделении части энергосистемы). Несимметрия порождает несинусоидальность токов, вибрации, нагрев различных элементов генератора (особенно ротора) токами высокой частоты.



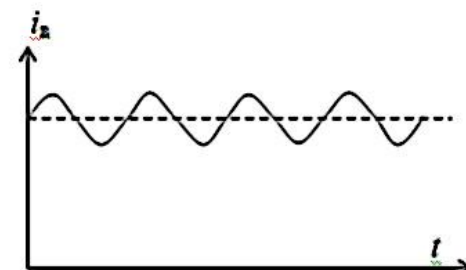
Прямая последовательность



Обратная последовательность



Разность частот



Пulsация тока возбуждения

Типовые установки защиты генератора по току обратной последовательности от полного тока генератора:

Сигнальный элемент

5 %

Отключающий элемент

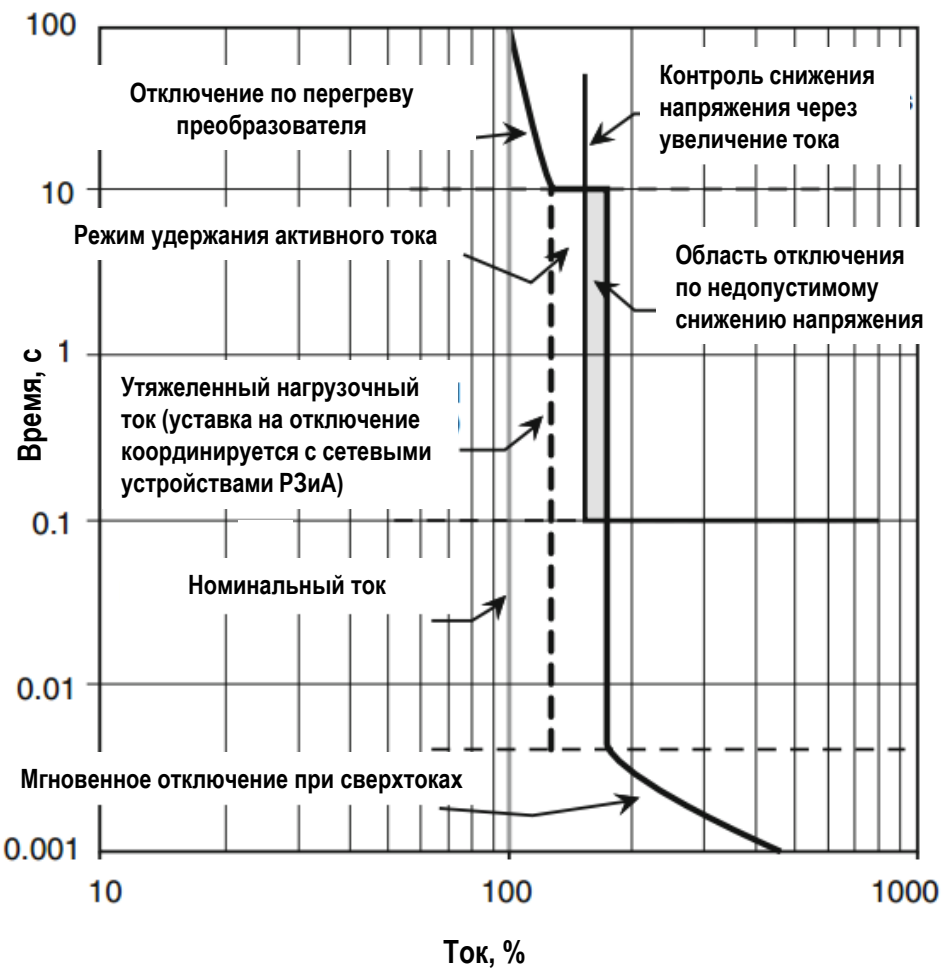
9 %

Время отключения по интегральной хар-ке

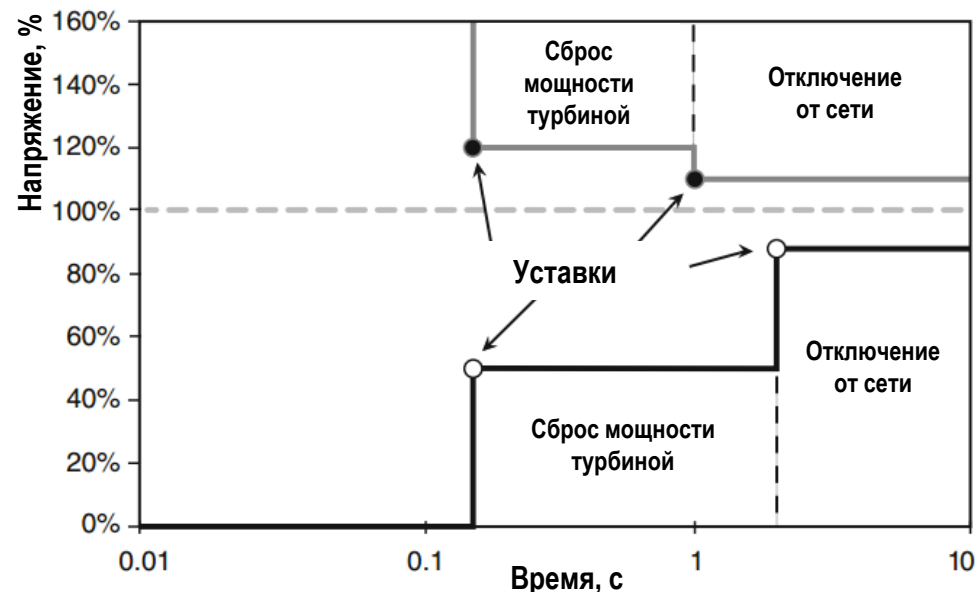
0,5 - 4000 с

Время охлаждения генератора

500 - 2000 с



Защитная характеристика по току



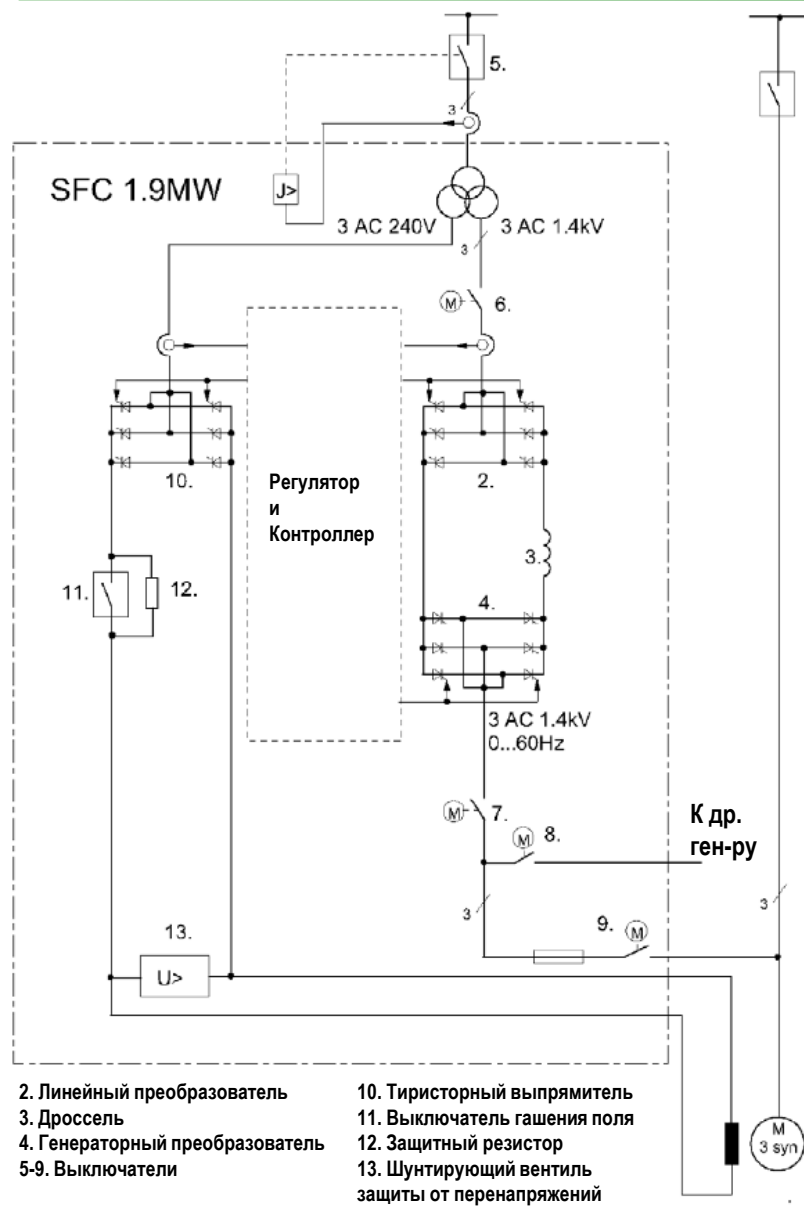
Защитная характеристика по напряжению

Защитные характеристики устройств РЗиА для комплекса «генератор-преобразователь» отличаются от таковых для генератора ввиду:

1. меньшей постоянной инерции генератора;
2. возможностей преобразователя и его безынерционности;
3. назначению малой генерации.



Режимы пуска/останова генератора с помощью частотного привода



1. **Основной.** Разгон генератора с номинальной мощностью преобразователя до зоны высокого крутящего момента турбины при частоте 0,7 от номинальной (2100 об/мин);
2. **От резервного источника питания (например, дизель-генератора).** Разгон генератора с минимально возможной мощностью до зоны высокого крутящего момента турбины при частоте 0,7 от номинальной (2100 об/мин);
3. **Останов генератора снятием возбуждения.** С полным отключением возбудителя при частоте ниже 200 об/мин;
4. **Имитация режима валоповорота.** Требуется наличие датчиков положения вала и параметров ротора;
5. **Режим мойки газовой турбины (технология AEG Industrial).** Заливка корпуса газовой турбины водой или моющим составом, вращение с частотами до 600 об/мин по специальной программе (в т.ч. в обратную сторону, если позволяют подшипники и система смазки).
6. **Пуск в режиме синхронного компенсатора.** Разгон до частоты 1,05 от номинальной (3150 об/мин) и последующая синхронизация.



Альтернатива демонтажу, ретрофиту, простому турбогенератора (технологии **General Electric**, **AEG Industrial**). Преимущества:

1. Генераторное оборудование уже установлено;
2. Проблемы возникают чаще с тепловой частью (в т.ч. износ турбины);
3. Источник реактивной мощности и средство поддержания напряжения в узле;
4. Синхронный компенсатор (СК) с относительно большой постоянной инерции и мощной генераторной системой АРВ ПД или АРВ СД эффективен в переходных режимах;
5. Возможность загрузки СК реактивным током до 30% выше таковой для генератора (ввиду отсутствия активного тока), что позволяет разгрузить остальные агрегаты от выработки реактивной мощности и догрузить их выработкой активной – выше доход, меньше издержки;
6. Устанавливается один преобразователь частоты и одна система управления с возможностью подключения любого из блоков.



Перевод генератора в режим синхронного компенсатора без работы первичного привода . 2

Варианты:

1. Временный. Установка частотного привода для пуска генератора. Желательна расцепка с турбиной;
2. Постоянный. Установка опорного подшипника и пускового/приводного двигателя с частотным приводом вместо турбины;





СЕМИНАР

Проблемы подключения
и эксплуатации малой генерации

Интеграция ветропарков и больших массивов ветрогенерации

Решение **ABB**

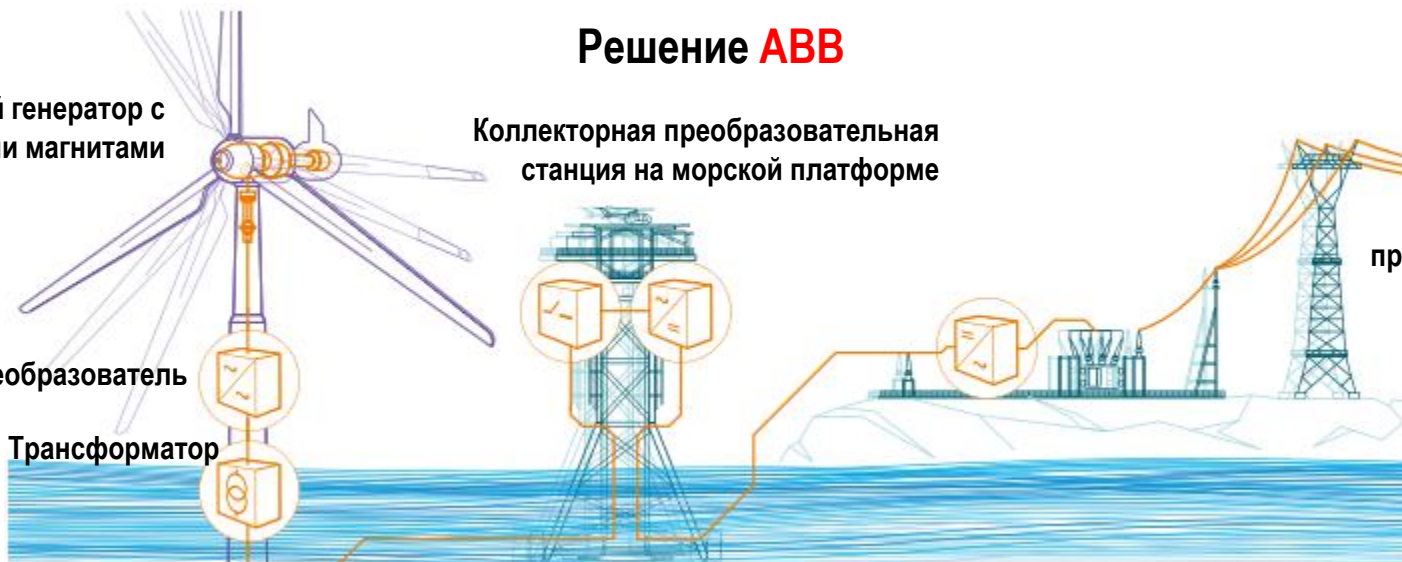
Синхронный генератор с
постоянными магнитами

Преобразователь

Трансформатор

Коллекторная преобразовательная
станция на морской платформе

Береговая
преобразовательная
повышающая
подстанция



Асинхронный
генератор с
двойным
питанием

Двойной
преобразователь

Коллекторная преобразовательная
повышающая подстанция на
морской платформе

Береговая
преобразовательная
повышающая
подстанция



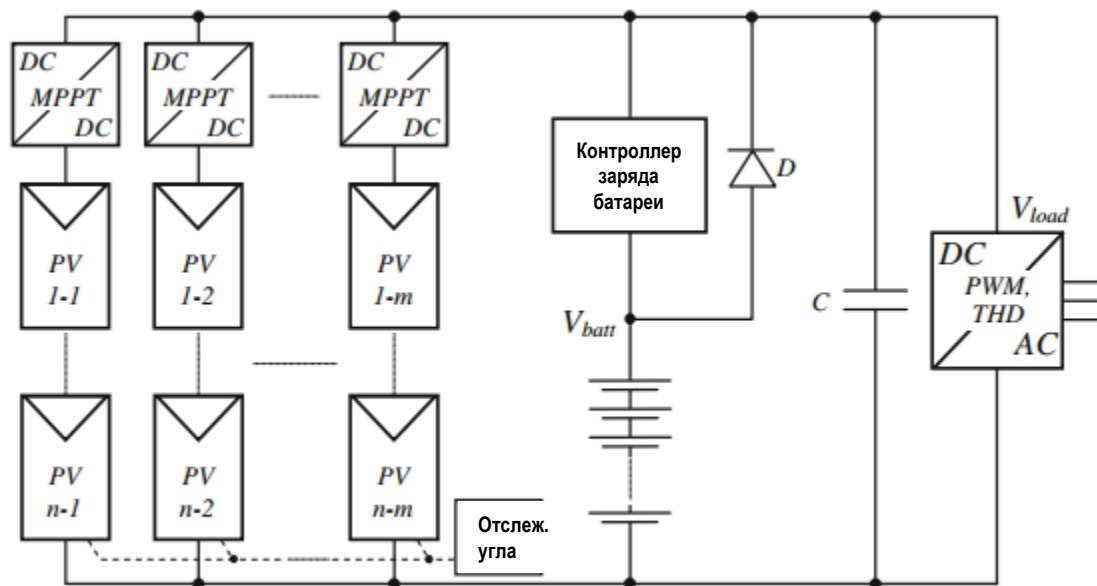
Коллекторная преобразовательная повышающая
подстанция на морской платформе





Общие принципы интеграции солнечных панелей и работы преобразователей в составе фотомассива

Солнечная панель – сама по себе сложное полупроводниковое устройство. Существует несколько десятков схем подключения солнечных панелей в зависимости от характеристик панелей, мощности, классов напряжения преобразовательной электроники и сети, расположения панелей, размера солнечной электростанции, наличия накопителей. Схемы преимущественно однофазные (!). Схемы преобразователей для подключения солнечных панелей существенно отличаются от таковых для подключения электромеханических преобразователей энергии.

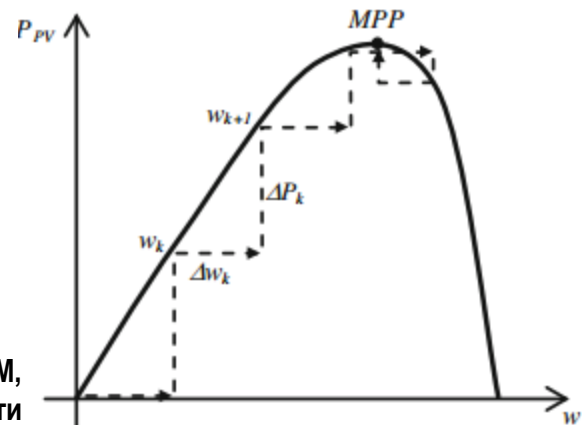
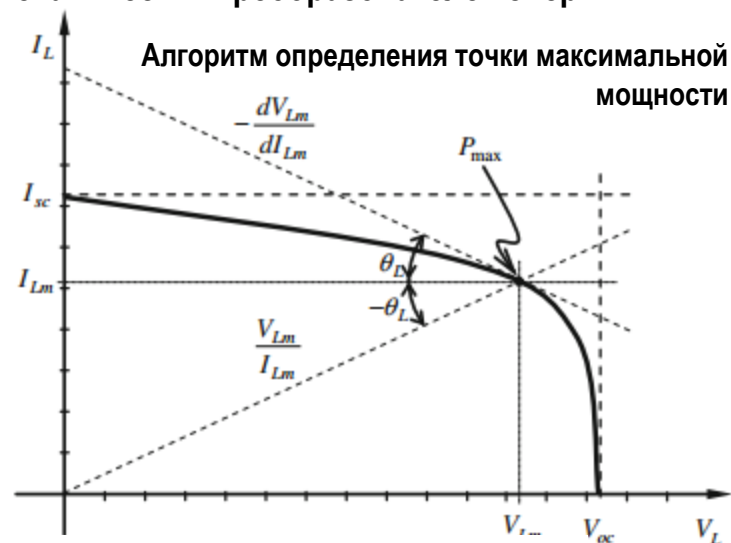


Двухуровневая схема подключения солнечных панелей с батареями

MPPT – отслеживание точки максимальной мощности

PWM – ШИМ

THD – отслеживание общего уровня искажения гармоник

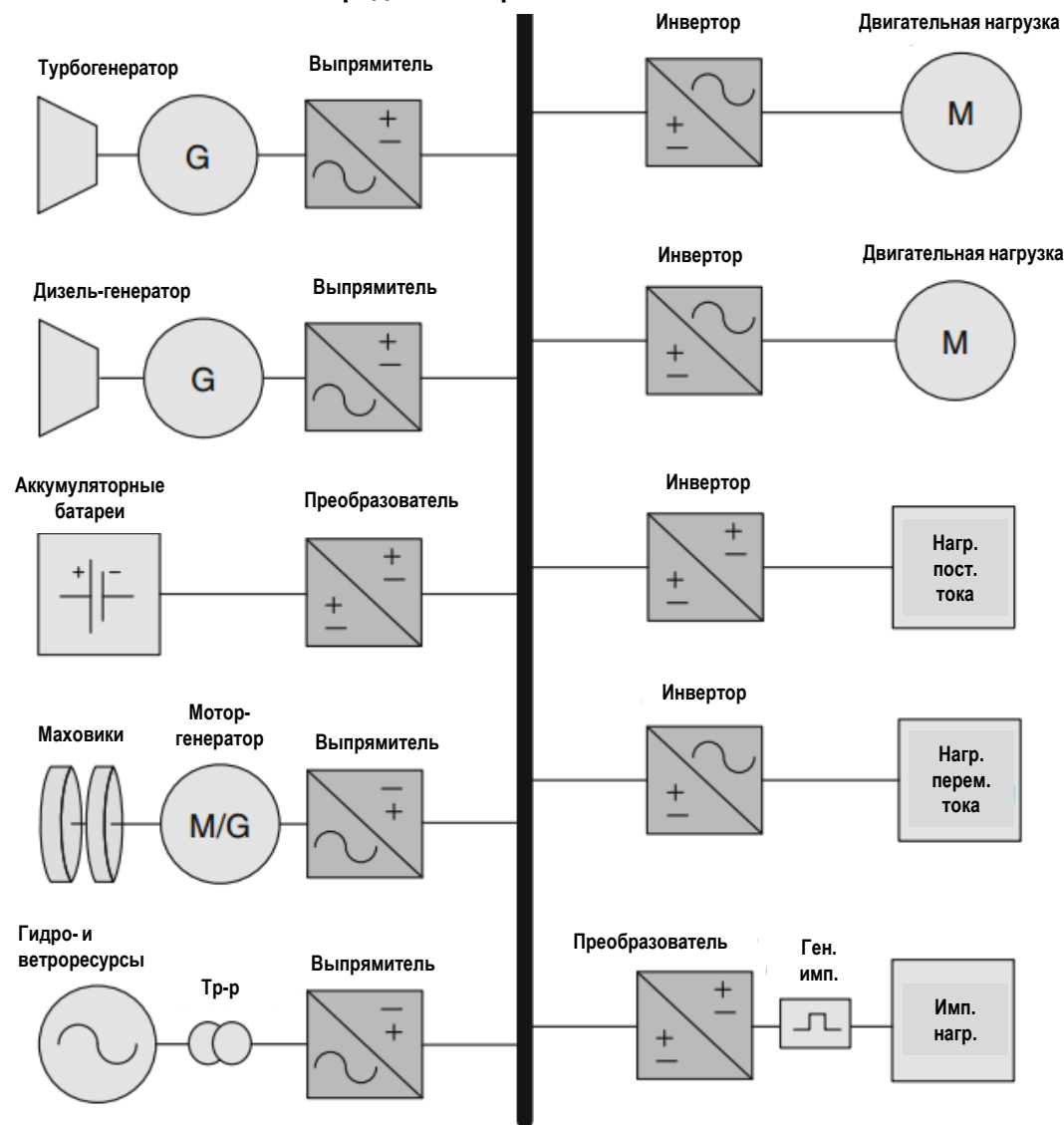


Алгоритм «подъема на холм» для определения длительности импульса ШИМ, соответствующего точке максимальной мощности



Интеграция различных источников энергии с помощью модульных преобразовательных блоков

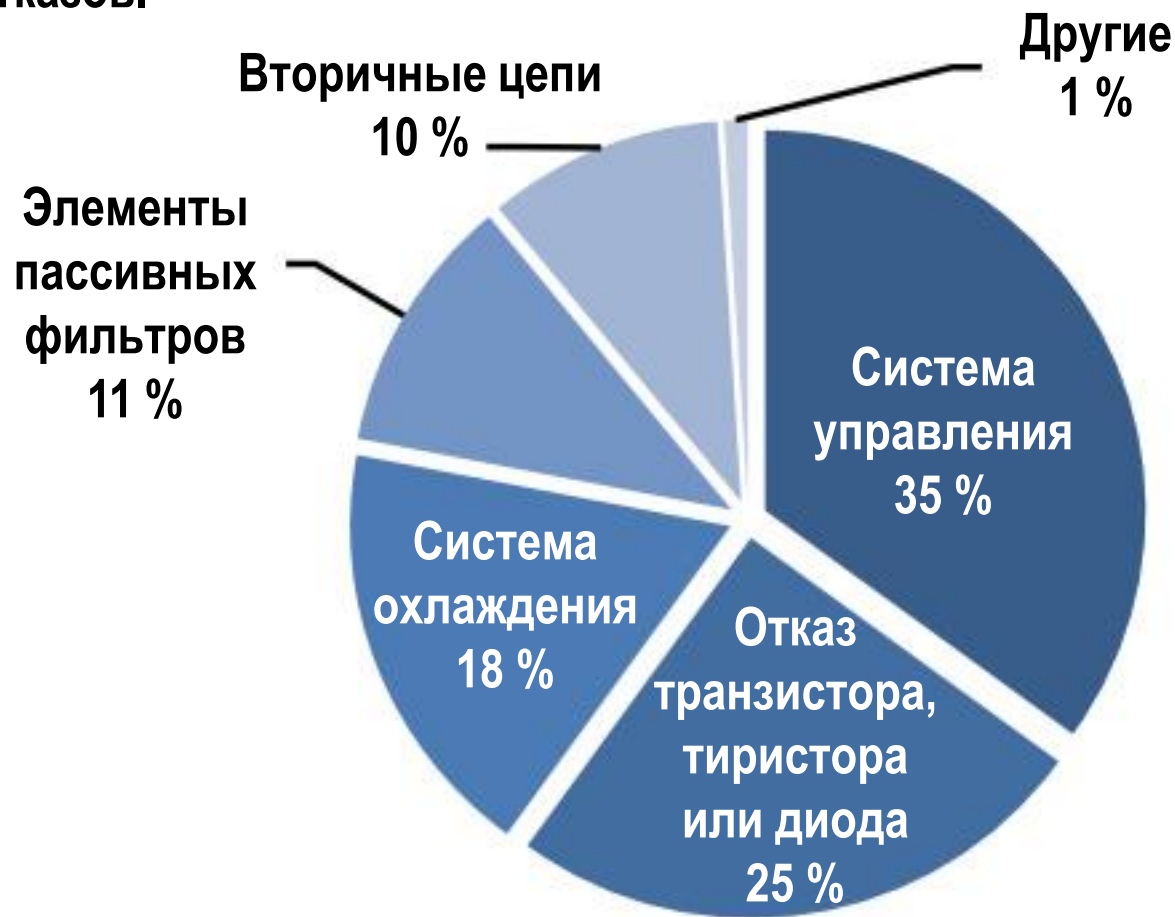
Шина постоянного тока среднего напряжения





Основные причины отказов силовых преобразователей

Универсальные полупроводниковые силовые преобразователи на полную мощность генератора массово устанавливаются с 1995 г., накоплена статистика причин отказов.



UL 1741

Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources

Underwriters Laboratories, 2005

Документ по структуре схож с ПУЭ и регламентирует:

1. Область применения стандарта;
2. Конструктивно-строительные и компоновочные решения;
3. Общие аспекты взаимодействия с сетью (ссылкой на стандарт IEEE 1547)
4. Электрические параметры, свойства и влияние на сеть преобразователя и установки в целом;
5. Формы паспорта установки по данным испытаний и заводским данным;
6. Электробезопасность, маркировку частей преобразователя;
7. Требования к накопителям в составе установки, если имеются.



Некоторые регламентируемые характеристики преобразователей:

1. Диапазоны входных и выходных сопротивлений;
2. Диапазоны напряжений и токов на входе и выходе;
3. Параметры качества электроэнергии;
4. Частотные характеристики;
5. Способность к автономной работе/работе на выделенную нагрузку;
6. Способность к работе в случае частичного отказа системы управления;
7. Электробезопасность в аварийных режимах (КЗ, перегрузки).

Стандарт нормирует в этой части только общие результирующие параметры и характеристики преобразователя, но не структурно-функциональные схемы электрических компонентов и не алгоритмы работы преобразователя.



1. Прогресс полупроводниковых силовых преобразователей обусловлен усовершенствованием полупроводниковых устройств, конденсаторов и алгоритмов управления работой преобразователей.
2. Полупроводниковые преобразователи осуществляют эффективное уменьшение негативного влияния возмущений в сети на генератор и расширение возможностей по выдаче мощности в сеть.
3. Установки с полупроводниковыми преобразователями отличаются по свойствам от синхронной генерации. В частности, улучшают характеристики по регулированию напряжения и поддержанию выдачи мощности, но ухудшают инерционные и частотные характеристики энергосистем.
4. Современные полупроводниковые преобразователи представляют многофункциональные (3-4 функции для установки) унифицированные блоки шкафного или шинного исполнения.
5. Полупроводниковые преобразователи дают возможность более эффективно использовать первичные приводы малой генерации, осуществляя развязку по частотам;
6. Большинство зарубежных полупроводниковых силовых преобразователей отвечает стандартам UL 1741 и IEEE 1547 в плане конструктива, функционала и общих особенностей работы.
7. Интеграция установки МГ через ПП со стандартизированными типовыми свойствами может облегчить процессы технологического присоединения, управления установкой и учета системного эффекта для различных субъектов электроэнергетики.

1. T. Figiel, J. Bothwell, W. Moore. Preventive Maintenance and Overhaul Experience for Rotating Brushless Exciters and other Excitation Systems / EPRI Utility Generator Predictive Maintenance and Refurbishment Conference, Phoenix, 1998. p. 1
2. РД 34.45.620-96. Правила технического обслуживания тиристорных систем возбуждения. Приложение 3: Краткая характеристика применяемых в эксплуатации тиристорных систем независимого возбуждения / Российское акционерное общество энергетики и электрификации «ЕЭС России», Департамент науки и техники, 1998.
3. Some Investigations on Recent Advances in Wind Energy Conversion Systems / IACSIT Coimbatore Conferences, IPCSIT vol. 28, Singapore, 2012. p. 1-2
4. S. Chakraborty, M. G. Simoes, W. E. Kramer (eds.). Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems / Green Energy and Technology, Springer-Verlag, London, 2013. 609 ps.
5. Н.А. Новиков. Инновационные решения по интеграции распределенной генерации, включая ВИЭ, в электроэнергетические системы / Презентация новых электросетевых технологий от 23.10.2013, М., ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2013.
6. IEEE 1547. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems / 2011.
7. UL 1741. Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources / 2005.
8. H. Grüning. IGCT Technology – A Quantum Leap for High-power Converters / ABB Industrie, Switzerland, 2003.
9. J. Weidauer. Elektrische Antriebstechnik / 3., überarbeitete Auflage, Siemens Aktiengesellschaft, Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2013. 413 ps.
10. MV4000. The compact, high performance medium voltage drive / GE Power Conversion, 2013.
11. D. Seng. Modular and Powerful Inverters up to 1MW / Power Electronics Europe, Issue 8, 2008, p.p. 25-29
12. Modular concept for tailored solutions. LOHER Dynavert XL wind converters / Siemens AG, 2012.
13. PCS 6000 for large wind turbines. Medium voltage, full power converters up to 9 MVA / ABB Automation Products GmbH, 2012.
14. ROBICON Perfect Harmony. The Water-Cooled Medium-Voltage Drive of Choice / Siemens AG, 2009.
15. R. Nelson. Active Power Control in Siemens Wind Turbines / Presentation, Siemens Energy, 2011.
16. H. Yildirim. Siemens NetConverter. The enabling technology for the integration of wind power in the grid / Presentation, Siemens AG, 2009.
17. B. Backlund, S. Ebner. The wind power converter for tomorrow is already here / ABB Switzerland Ltd., 2009.
18. Caterpillar – Россия: Спецификации дизельных электрогенераторных установок / <http://rossiya.cat.com/cda/layout?m=333515&x=97>.
19. Caterpillar – Россия: Спецификации газопоршневых электрогенераторных установок / <http://rossiya.cat.com/cda/layout?m=333535&x=97>.
20. В.П. Федотов, Л.А. Федотова. Проектирование микропроцессорных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор / Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 200 с.
21. Start-up inverter of gas turbo-sets. Integrated compact units / AEG Industrial Engineering GmbH, 2007.
22. J. M. Fogarty, R. M. LeClair. Converting Existing Synchronous Generators into Synchronous Condensers / Power Engineering, October, 2011.
23. Medium voltage for wind power. PCS 6000 full-scale converters up to 9 MVA / ABB Automation Products GmbH, 2009.
24. Oceans of opportunities. Complete solutions for the entire life cycle of offshore wind farms / Siemens AG, 2011.
25. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, Z. Chen and M. Liserre. Power Converters and Control of Renewable Energy Systems / Aalborg University, Institute of Energy Technology, Denmark; Politecnico di Bari, CEMD research group Italy, 2006.
26. С.Г. Обухов. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук, специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, Томск, 2013.
27. S. Bala, J. Pan, D. Das, O. Apeldoorn and S. Ebner. Lowering Failure Rates and Improving Serviceability in Offshore Wind Conversion-Collection Systems / ABB Corporate Research, Raleigh, USA; ABB Power Electronics and Medium Voltage Drives, Switzerland, 2013.

Спасибо за внимание!