

Добкин И.Д., Таратута И.П., Чуприков В.С.  
АО Ансальдо-ВЭИ (г. Москва, Россия)

#### **Аннотация**

*Приводятся результаты разработки проекта преобразователя типа СТАТКОМ-10/100000. Преобразователь предназначен для подключения к шинам 10 кВ подстанции «Златоуст» вместо синхронного компенсатора КСВБ-100-11 и выполнения функций регулирования напряжения на шинах 500 кВ подстанции путем плавного быстродействующего изменения своей реактивной мощности в диапазоне от +100 до -100 Мвар.*

*СТАТКОМ реализован на базе многофазного мостового инвертора напряжения с ШИМ-управлением с параллельным включением четырех одинаковых блоков инверторов по переменному току.*

*Рассмотрены схема СТАТКОМа, характеристики и параметры оборудования, структура системы управления и основные алгоритмы регулирования, гармонический анализ и оценка потерь.*

В последние годы в мире ведутся интенсивные работы по внедрению гибких линий электропередач переменного тока (FACTS), обеспечивающих улучшение качественных и количественных характеристик передачи электроэнергии, в частности: увеличение пропускной способности линий электропередач, стабилизацию напряжения, снижение активных потерь, регулирование перетоков мощности между энергосистемами. Одним из основных элементов FACTS являются преобразователи типа СТАТКОМ, устанавливаемые на подстанциях линий передач и выполняющих функции быстродействующего регулируемого источника реактивной мощности.

Преобразователь типа СТАТКОМ представляет собой регулируемый автономный инвертор тока, выполненный на базе инвертора напряжения с емкостным накопителем и подключаемый к шинам подстанции через реактор или трансформатор. Объединяя два СТАТКОМа, подключенные к разным секциям шин подстанции, по шинам постоянного напряжения, можно получить регулируемую вставку постоянного тока.

Схемотехнические решения СТАТКОМа могут быть различными. Первые промышленные установки производства Mitsubishi Electric реализованы на базе многофазного мостового инвертора напряжения с ШИМ-управлением с параллельным включением трех-четырёх одинаковых блоков инверторов по переменному току [1]. В качестве ключевого прибора используется полностью управляемый тиристор типа IGCT, причем в каждом плече инвертора используется только один прибор. Компания АВВ отдает предпочтение мощным управляемым транзисторам IGBT, соединяя их последовательно и увеличивая при этом напряжение и мощность единичного блока инвертора [2].

В соответствии с решениями ОАО «ФСК РАО», с целью начала реализации программы гибких линий электропередач, в России ведется разработка преобразователей типа СТАТКОМ. «АО Ансальдо-ВЭИ» участвует в разработке такого преобразователя в сотрудничестве с ВЭИ и ASIRobicon. В качестве одного из

объектов установки первых преобразователей выбрана подстанция Златоуст 500кВ. Здесь СТАТКОМ должен заменить существующий синхронный компенсатор 100 Мвар 11 кВ. При этом в качестве базового элемента СТАТКОМа предлагается разработать преобразователь на напряжение 15,75 кВ мощностью 50 Мвар.

По нашему мнению, такие параметры базового преобразователя не являются оптимальными. Напряжение 15,75 кВ используется, в основном, на генерирующих станциях, где СТАТКОМ в принципе не нужен, а для его подключения к шинам с другим напряжением необходимо устанавливать согласующий трансформатор. При использовании наиболее мощных на сегодня полностью управляемых приборов типа IGBT и IGCT (с максимальным током 4000 А) преобразователь мощностью 50 Мвар должен реализовываться в одном инверторе, что не позволяет использовать многофазный принцип построения схемы и приводит к необходимости установки дополнительных фильтров высших гармоник. Любой отказ в таком преобразователе приводит к потере полной мощности.

Наше предложение заключается в использовании многофазного мостового инвертора напряжения с параллельным включением трех-четырех одинаковых блоков инверторов по переменному току, аналогично [1], с пониженным (до 5-6кВ) напряжением инверторов. Такая схема построения преобразователя имеет следующие достоинства:

- наличие нескольких одинаковых блоков инвертора, работающих параллельно, при координированном ШИМ-управлении (с использованием соответствующих временных смещений в моментах коммутации) позволяет при относительно низкой частоте коммутации каждого инвертора обеспечить высокое качество формы выходного тока преобразователя без использования гармонических фильтров;
- снижение номинального напряжения инвертора позволяет понизить уровень изоляции внутри блока и существенно упростить его конструкцию и схемную реализацию (цепи демпфирования, схемы управления и контроля, питания драйверов и т.п.), за счет чего повысить надежность и снизить стоимость преобразователя в целом
- полная независимость каждого блока инвертора по цепям управления, питания и охлаждения позволяет, при ремонте или выходе из строя одного блока, оставить в работе оставшиеся исправные, сохранив при этом большую часть номинальной мощности преобразователя;
- модульный принцип построения преобразователя существенно облегчает его конструкцию и техническое обслуживание при эксплуатации.

Необходимость установки согласующего трансформатора остается и в этом случае, при этом существует возможность подключения СТАТКОМа к шинам любого подстанционного напряжения.

Такое решение было нами предложено для СТАТКОМа мощностью 50Мвар. В то же время, для реализации конкретных задач возможны более оптимальные решения. В частности, для подстанции Златоуст-500 мы считаем целесообразным выполнять СТАТКОМ в виде единого устройства мощностью 100 Мвар, подключаемого шинам 10 кВ подстанции вместо синхронного компенсатора КСВБ-100-11. Ниже приводятся результаты разработки проекта такого преобразователя типа СТАТКОМ-10/100000, выполняющего функции регулирования напряжения на шинах 500 кВ подстанции путем плавного быстродействующего изменения своей реактивной мощности в диапазоне от + 100 до -100 Мвар.

## Схема преобразователя

При напряжении в точке подключения 10 кВ и требуемой мощности 100Мвар оптимальной, по нашему мнению, является реализация преобразователя по бестрансформаторной схеме с использованием 4-х одинаковых блоков инверторов (БИ), выполненных на напряжение 10 кВ, с их параллельным включением по переменному току. Однолинейная электрическая схема такого СТАТКОМа приведена на рис.1.

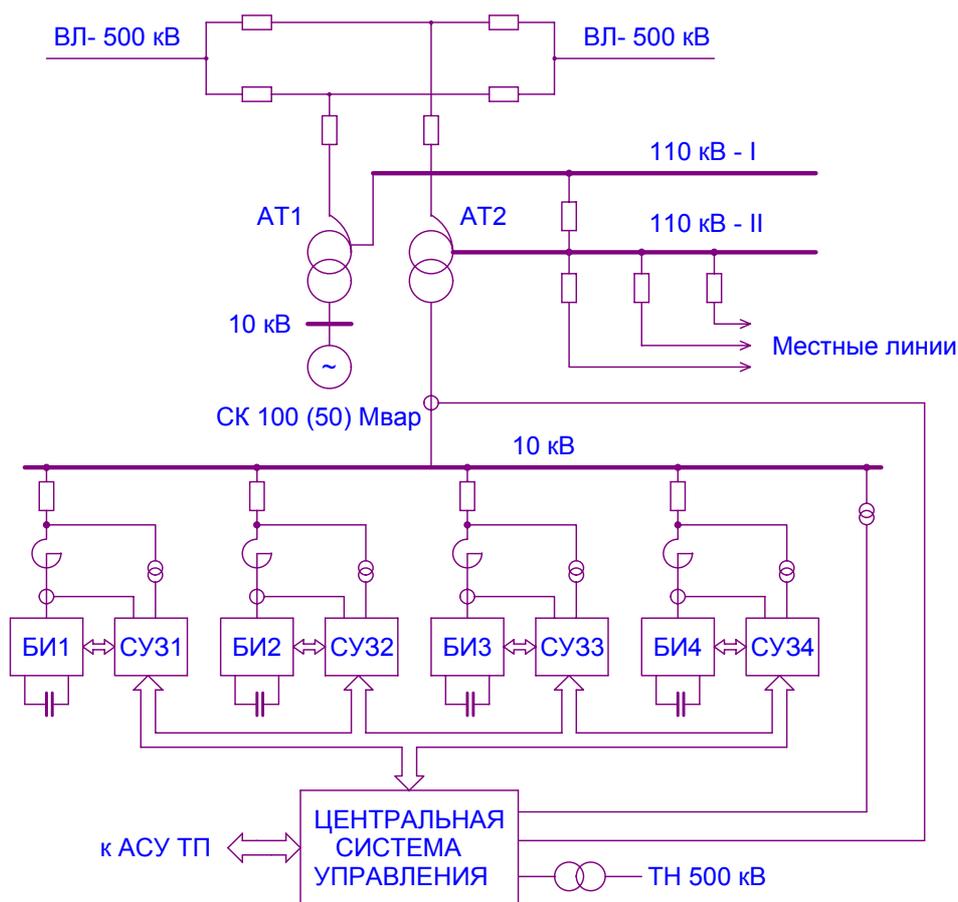


Рис.1. Однолинейная электрическая СТАТКОМ-10/100000

Входные фазные реакторы обеспечивают работу инверторов напряжения в режиме источников регулируемого тока и ограничивают токи КЗ. Мощность фазных реакторов на частоте сети должна быть не менее 20% от мощности блока инвертора для обеспечения требуемых коэффициентов несинусоидальности тока и напряжения в точке подключения и на шинах ВН подстанции.

Индивидуальные выключатели каждого блока инвертора предназначены для отключения блока при его отказе или срабатывании защит.

Блок инвертора представляет собой трехфазный мостовой инвертор, выполненный на мощных IGBT-приборах по трехуровневой NPC схеме с емкостным накопителем. В каждом плече инвертора установлено 5 последовательно соединенных приборов, один из которых является избыточным. Количество последовательных приборов выбрано из условия обеспечения длительной работы преобра-

зователя при уровне перенапряжения 1,39 и отсутствии избыточности. Номинальная мощность блока инвертора равна 25 Мвар. В режиме форсировки (10 сек) мощность блока может быть увеличена до 35 Мвар.

Выбранная схема построения преобразователя имеет следующие преимущества, помимо приведенных выше:

- отсутствие согласующего трансформатора;
- разгрузка ключевых приборов по току в длительном режиме с возможностью кратковременной форсировки выходного тока на 40%.

Для охлаждения тепловыделяющих компонентов блоков инвертора используется принудительное охлаждение деионизованной водой (этиленгликолем), обеспечивающее наиболее эффективный отбор тепла, минимальные габариты преобразователя и практически полное отсутствие шума. Утилизация тепла от деионизованной воды осуществляется в агрегатах воздушного охлаждения (АВО).

Автоматическое управление и защита СТАТКОМа осуществляется его системой управления, состоящей из четырех систем управления и защиты инвертора (СУЗ) и центральной системы управления СТАТКОМа (ЦСУ), обеспечивающей регулирование напряжения на шинах подстанции, формирование уставок реактивной мощности и координацию работы всех блоков инверторов в штатных и аварийных режимах. Все устройства системы управления СТАТКОМа реализованы полностью на цифровом уровне. Внешнее управление преобразователем может осуществляться дистанционно по сигналам от АСУ ТП станции.

### **Основные параметры преобразователя**

Номинальное напряжение - 10 кВ.

Номинальная частота сети - 50 Гц.

Номинальный ток фазы на выходе преобразователя составляет (действующее значение) - 5772 А.

Диапазон изменения полной реактивной мощности - от -100 Мвар до +100 Мвар (при номинальном фазном токе).

Ток форсировки на выходе преобразователя (действующее значение) - 8080 А в течение 10 сек.

Коэффициент полезного действия преобразователя - не менее 98,5%.

Время изменения мощности преобразователя при реверсе тока - не более 0,15 с.

Изоляция оборудования преобразователя соответствует классу напряжения 10 кВ.

Кратковременные повышения напряжения на шинах подключения в соответствии с ГОСТ 1516.3-96 (без учёта влияния СТАТКОМа):

- 12,2 кВ действующего значения длительностью не более 1200 с;
- 13,9 кВ действующего значения длительностью не более 20 с;
- 16,7 кВ действующего значения длительностью не более 1 с;
- 17,6 кВ действующего значения длительностью не более 0,1 с.

СТАТКОМ сохраняет работоспособность при провалах напряжения на шинах подключения из-за коротких замыканий в сети (симметричных и несимметричных), в том числе при провале напряжения на 50% в течение 4 сек, обеспечивая при этом выдачу реактивного тока 8080 А.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на шинах 500 кВ из-за воздействий тока СТАТКОМа – не более 2%.

Коэффициент искажения синусоидальности тока СТАТКОМа не более 1,0% при работе четырех блоков инвертора и не более 1,5% при работе трех блоков.

### Блок инвертора

Блок инвертора является наиболее важным элементом преобразователя. Его однолинейная схема приведена на рис. 2. Кроме собственно инвертора она включает устройство защиты от перенапряжений на шинах постоянного напряжения (crow-bar), заземляющий ключ, устройство предварительного заряда емкостного накопителя, разрядные резисторы, а также датчики входного тока и постоянного напряжения накопителя. Конструктивно блок инвертора состоит из двух шкафов – шкафа инвертора и шкафа ввода и вспомогательных цепей.

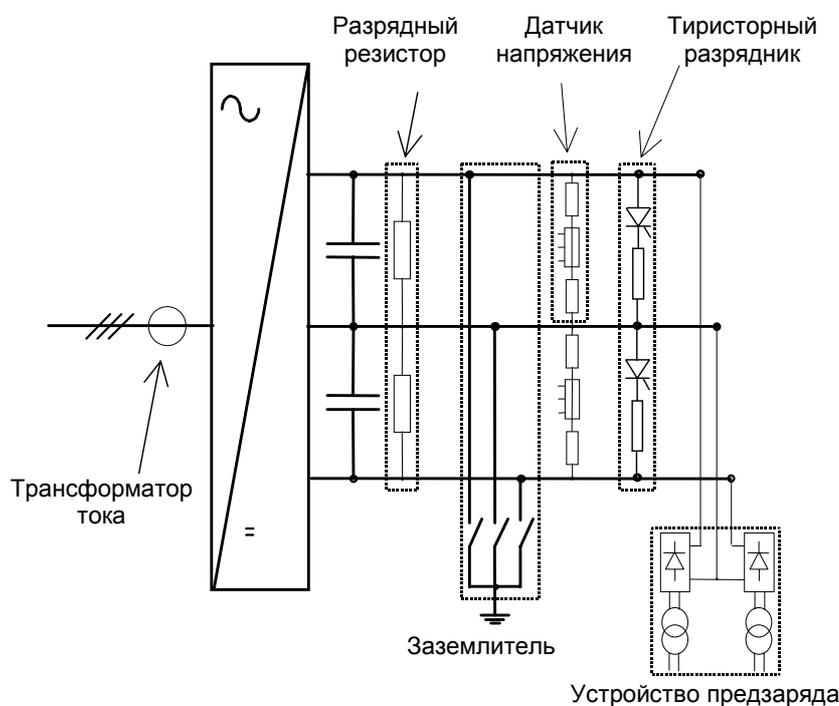


Рис. 2. Однолинейная схема блока инвертора

Инвертор реализован по NPC (neutral point clamp) схеме, обеспечивающий 3 уровня выходного напряжения в каждой фазе и, соответственно, 5 уровней линейного напряжения (рис. 3), регулируемого по частоте и амплитуде.

В качестве ключевых элементов инвертора нами были выбраны тиристоры, управляемые по затвору и интегрированные с драйвером IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristors), типа 5SHY 35L4510 (4500 В, 4000 А) производства ABB. Высоковольтный инвертор на IGCT, по нашему опыту и согласно проведенным расчетам, имеет преимущества по сравнению с аналогичным инвертором, реализованном на IGBT: по потерям, конструкции, стоимости.

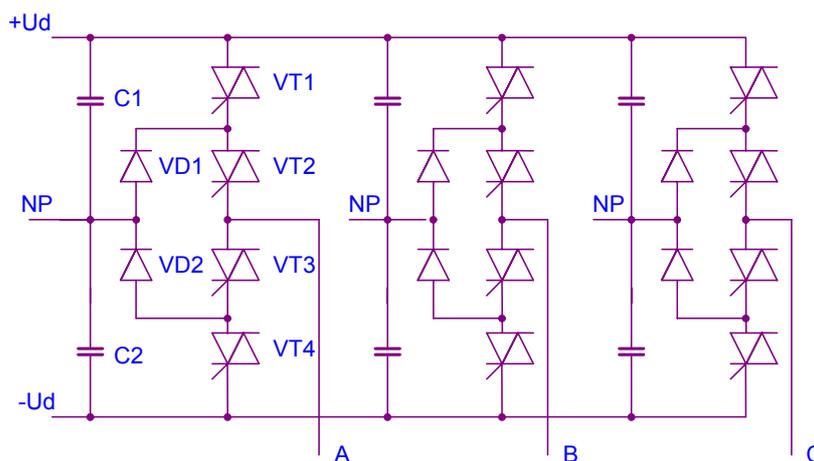


Рис. 3. Схема трехуровневого инвертора напряжения

Следует отметить, что при разработке высоковольтного инвертора на быстродействующих силовых приборах необходимо решить главную стратегическую задачу - обеспечение динамического деления напряжения между последовательно соединенными приборами. При времени включения/ отключения, составляющем около 500 нс, применение обычных демпфирующих RC-цепочек без других дополнительных мер приводит к существенному росту активных потерь. Компания ABB решила эту проблему для IGBT, разработав систему активного деления напряжения путем индивидуальной коррекции задержек в драйверах приборов. Эта технология очень дорогая и требует больших затрат времени и ресурсов на разработку.

Решить эту проблему для IGCT, по нашему мнению, возможно более простым и дешевым способом - специальным отбором приборов по ряду динамических параметров. Наша компания, в кооперации с разработчиками приборов – ABB, а также ASIRobicon, участвует в программе разработки методики отбора IGCT и оптимизации демпфирующих цепочек для их последовательного соединения, завершение которой планируется в середине 2005 г. Обеспечение надежной работы последовательно соединенных приборов IGCT является ключом не только к преобразователям типа СТАТКОМа, но и к высоковольтному асинхронному частотно-регулируемому приводу.

Второй важной задачей разработки является электрическая и механическая конструкция блока инвертора. Требования по минимизации паразитных индуктивностей всех компонентов силовой схемы и соединительных шин (для снижения уровня коммутационных перенапряжений) при высоком уровне электрической прочности изоляции обуславливают применение специальных компонентов силовой схемы и нестандартных технологических и конструктивных решений отдельных узлов.

### Система управления и защиты блока инвертора

Основные характеристики СУЗ:

- платформа – Power PC Motorola 2304 (300 МГц),
- монитор – графический в среде Windows,

- алгоритм управления – векторная ШИМ,
- внешние шины – Profibus, Ethernet.

Структурная схема системы управления и защиты блока инвертора приведена на рис. 4. СУЗ включает в себя:

- центральное процессорное устройство (ЦПУ)
- блок обработки и фильтрации сигналов
- платы аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей и цифрового ввода/вывода
- два контроллера внешнего интерфейса.

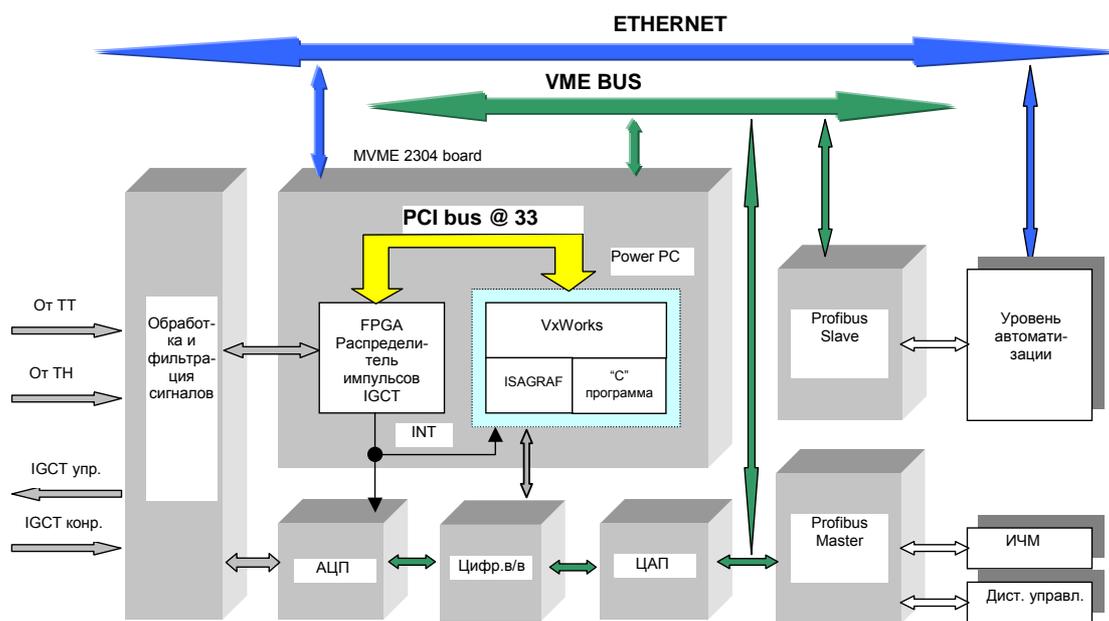


Рис. 4. Структурная схема системы управления и защиты инвертора

**Алгоритмы регулирования.** Основной регулятор преобразователя, размещенный в ЦСУ, осуществляет регулирование реактивной мощности в зависимости от величины напряжения на шинах ВН в соответствии с регулировочной характеристикой СТАТКОМа и формирует уставки реактивной мощности для каждого блока инвертора, направляемые в его СУЗ. СУЗ осуществляет непрерывное вычисление текущего значения вектора выходного напряжения инвертора, обеспечивающего отработку этой уставки. На рис. 5 приведены векторные диаграммы токов и напряжений инвертора при выдаче и потреблении активной и реактивной мощности. Управляя вектором напряжения инвертора  $U$  по амплитуде и поддерживая его фазу синфазно питающему напряжению  $E$ , можно задавать амплитуду и направление вектора тока и, соответственно, реактивной мощности инвертора.

Реально, при работе инвертора в режиме источника реактивной мощности, вектор напряжения  $U$  должен быть сдвинут по фазе относительно вектора напряжения шин  $E$  для того, чтобы ток инвертора содержал активную составляющую, величина которой должна обеспечивать компенсацию активных потерь в элементах схемы инвертора.

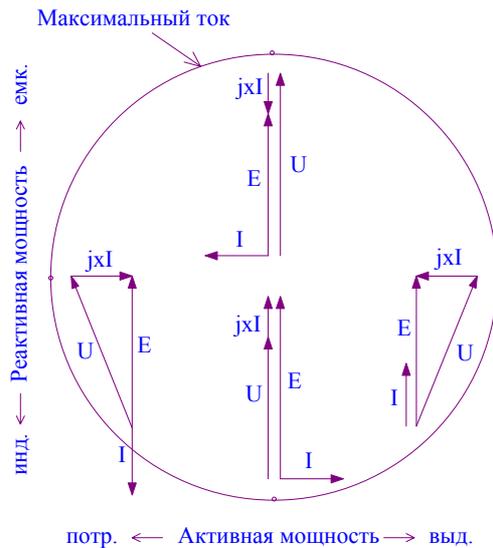


Рис. 5. Векторные диаграммы работы инвертора

Для минимизации содержания высших гармоник в токе СТАТКОМа моменты коммутации тиристоров в каждом БИ сдвинуты относительно друг друга на четверть периода частоты модуляции. На рис. 6 представлены формы фазного тока СТАТКОМа на стороне 10 кВ и суммы выходных линейных напряжений четырех блоков инверторов, работающих параллельно, полученные при математическом моделировании. Расчетное значение частоты модуляции инверторов принималось равным 700 Гц, относительная мощность фазных реакторов - 20%. Общий коэффициент несинусоидальности тока преобразователя составляет 0,69% относительно номинального тока СТАТКОМа, при этом ни одна из гармонических составляющих не превышает 0,5%.

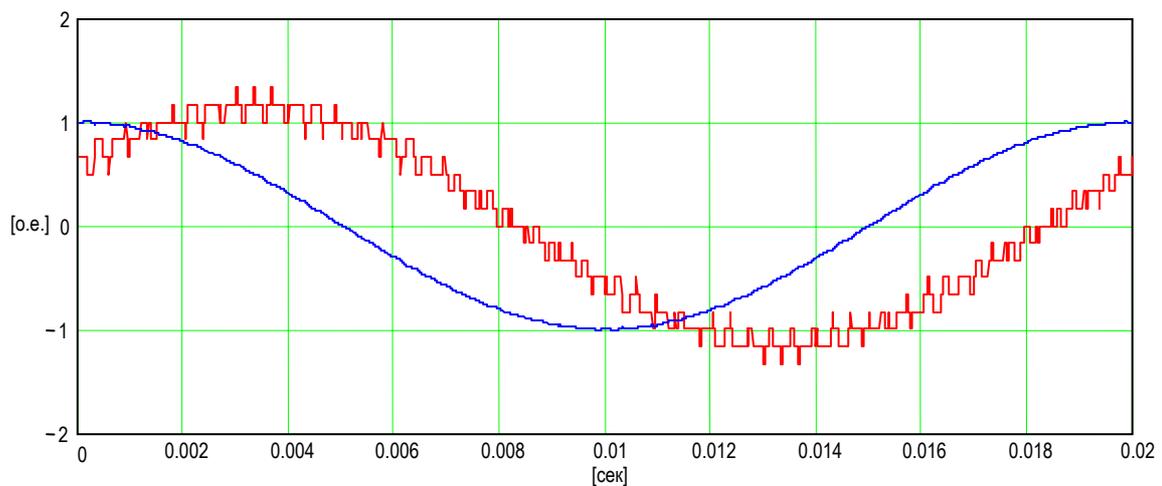


Рис.6.

## **Компоновка оборудования**

Оборудование СТАТКОМа внутренней установки может быть размещено в закрытом помещении подстанции. Помещение под оборудование одного блока инвертора должно иметь размеры не менее: длина - 10 м, ширина - 3 м, высота - 3,5 м. Агрегаты воздушного охлаждения устанавливаются на открытой площадке. В случае недостатка места они могут быть размещены на крыше здания с инверторами. Фазные реакторы устанавливаются на открытой площадке.

Возможен также вариант размещения оборудования в контейнерах. При этом каждый блок инвертора размещается в одном контейнере.

## **Литература**

1. G.Reed, R.Pape, M.Takeda. Advantages of Voltage Sourced Converter (VSC) Based Concepts for FACTS and HVDC-Link Applications. // Proceedings of the IEEE PES GM, Toronto, July 2003.
2. M.Bahram, J.Johansson, B.Nilsson. Voltage Source Converter Transmission Technologies – The Right Fit For The Application. // Там же.