

**АО АНСАЛЬДО-ВЭИ**

**Плавный пуск двигателей при помощи  
тиристорного пускового устройства разработки  
«АО Ансальдо-ВЭИ»**

(на примере пуска компрессоров НИЦ ЦИАМ от ТПУ-6/20000-14)

Москва

2010 г.

# 1. Назначение ТПУ

Тиристорное пусковое устройство типа ТПУ-6/20000-14, именуемое далее ТПУ, предназначено для:

- плавного поочередного пуска 14-ти ненагруженных синхронных электродвигателей на напряжение 6 кВ мощностью 3700, 6000, 7000, 15000 и 18000 кВт, обеспечивающих электропривод воздушных компрессоров НИЦ ЦИАМ;
- синхронизации с питающей сетью частоты вращения электродвигателей и последующего их переключения на питание от промышленной сети 6 кВ.

# 2. Схема преобразования

Основу ТПУ составляет трехфазная, шестипульсовая схема преобразователя выпрямитель–инвертор со звеном постоянного тока.

Однолинейная электрическая схема ТПУ и электроприводов компрессоров (с указанием обменных сигналов) приведена на рис.2.1.

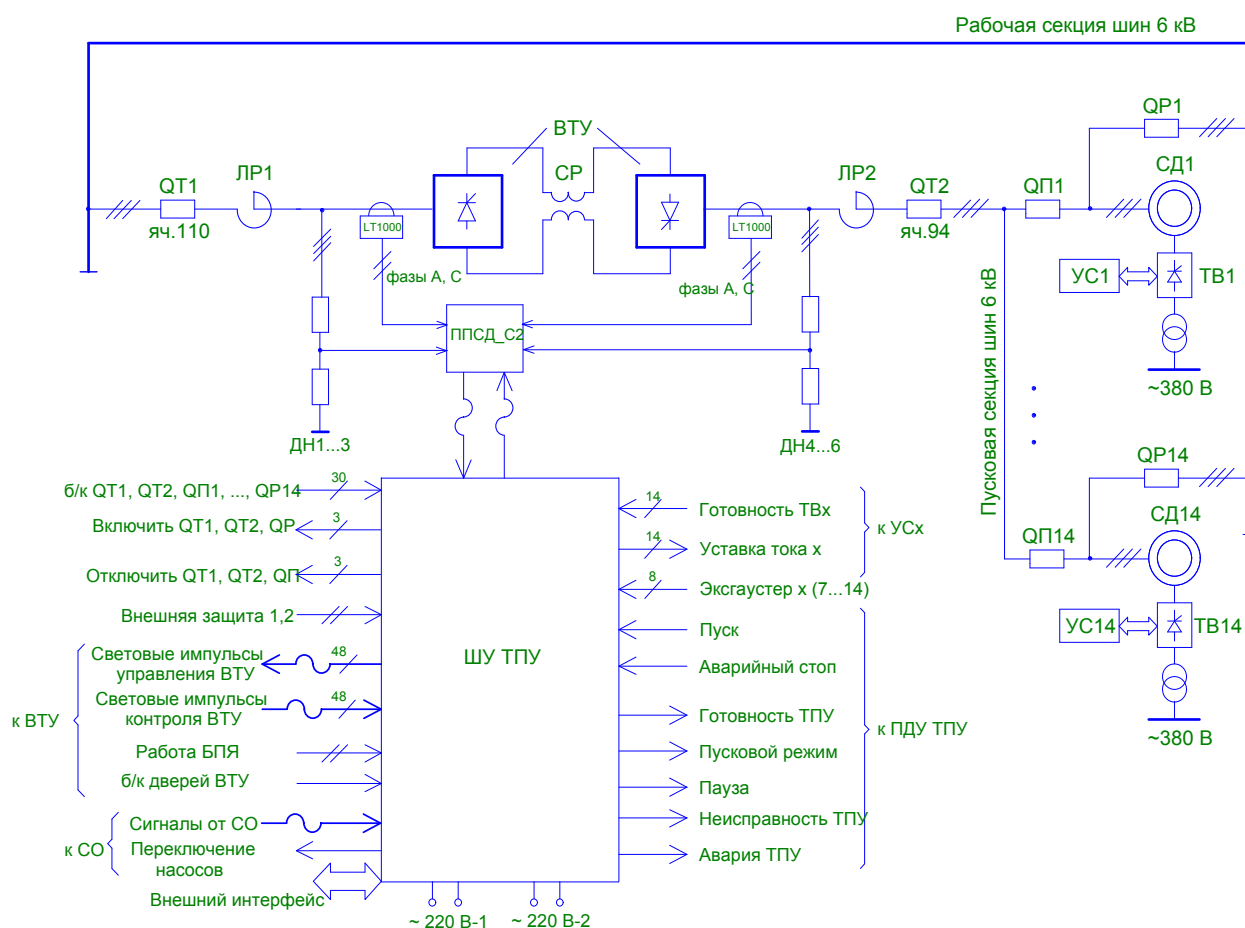


Рис. 2.1. Однолинейная электрическая схема подключения ТПУ-6/20000-14 к объекту

Высоковольтное тиристорное устройство (ВТУ) содержит два преобразовательных моста (выпрямитель и инвертор). Каждый мост состоит из трех тиристорных модулей. Модуль

включает в себя два плеча преобразовательного моста, а каждое плечо состоит из 4-х последовательно соединенных тиристорных ячеек, причем одна является избыточной.

Подключение ТПУ к рабочим шинам 6 кВ осуществляется через выключатель QT1 и входной линейный реактор ЛР1. Выходное напряжение подключается к пусковым шинам через выходной линейный реактор ЛР2, служащий для ограничения токов КЗ и блокирования емкости силовых кабелей, идущих к двигателям, и выключатель QT2. Каждый двигатель имеет два выключателя – пусковой QПх и рабочий QRх. Перед пуском двигателя "х" включаются выключатели QПх, QT1 и QT2, после окончания разгона и синхронизации с сетью двигатель "х" подключается к шинам 6 кВ рабочим выключателем QRх, а выключатель QПх отключается.

Непосредственное управление и защиту преобразователя выполняет шкаф управления ТПУ (ШУ ТПУ). Пуск и останов двигателей осуществляется дистанционно с пульта дистанционного управления ТПУ (ПДУ), связанного контрольными сигналами с ШУ ТПУ и с существующими схемами пуска двигателей.

Управление тиристорными возбудителями осуществляется через специальное устройство сопряжения (УС), встраиваемое в каждый тиристорный возбудитель.

### 3. Технические данные

#### 3.1. Параметры синхронных двигателей

№ двигателя	1, 2	3	4	5, 6	7-10	11-14
Тип двигателя	АТ-1 51 АА 41	СТМ- 6000-2	АТ-1 53 АА 68	3В 248- 02Н	АТ-1 53 АВ 00	ЕВТ135- 200-2
Номинальная мощность, кВт	3700	6000	7000	15000	18000	18000
Номинальная частота, об/мин	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Номинальный ток, А	408	665	780	1483	1650	1650
Пусковой ток, А	400	600	600	600	600	600
Длительность пуска, с	15	20	15	40	45/250 <sup>*)</sup>	45/250 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> Примечания:

- 1) 45 сек – при компрессорной нагрузке, 250 сек – при нагрузке на эксгаустер
- 2) Полное время пуска от момента нажатия кнопки ПУСК превышает время, указанное в таблице, на 10-15с, которые необходимы для включения выключателей ТПУ и определения положения ротора перед пуском.

### 4. Этапы пуска

Интервал пуска синхронного двигателя из состояния покоя может быть разбит на несколько характерных участков:

- Определение положения ротора,
- Разгон в импульсном режиме работы преобразователя,
- Разгон в непрерывном режиме работы преобразователя,

- Синхронизация напряжения статора двигателя с напряжением сети, на которую двигатель будет переключен после его разгона, и переключение двигателя на сеть

#### 4. 1. Определение положения ротора

Для плавного начала движения ротора двигателя из состояния покоя в требуемом направлении необходимо знать положение возбужденного ротора, чтобы подать первый импульс тока в нужные фазы обмотки статора. Принцип определения положения ротора основан на интегрировании э.д.с. фаз статора, наведенных при подаче скачком в ротор номинального тока возбуждения. Алгоритм, разработанный «АО Ансальдо-ВЭИ» позволяет определить положение ротора с точностью до единиц эл. Градусов. На Рис. 1 показаны осциллограммы наведенных на статоре напряжений, вызванных скачком тока возбуждения ротора (зашумленные кривые), и сигналы интегралов от линейных напряжений статора. В зависимости от положения ротора интегралы имеют разную величину и знак, что позволяет определить положение ротора по отношению к положению векторов напряжений статора, принятому за нулевое. Интеграторы включаются через 40мс после момента подачи в ротор тока возбуждения. При этом предыдущие значения интегралов обнуляются.

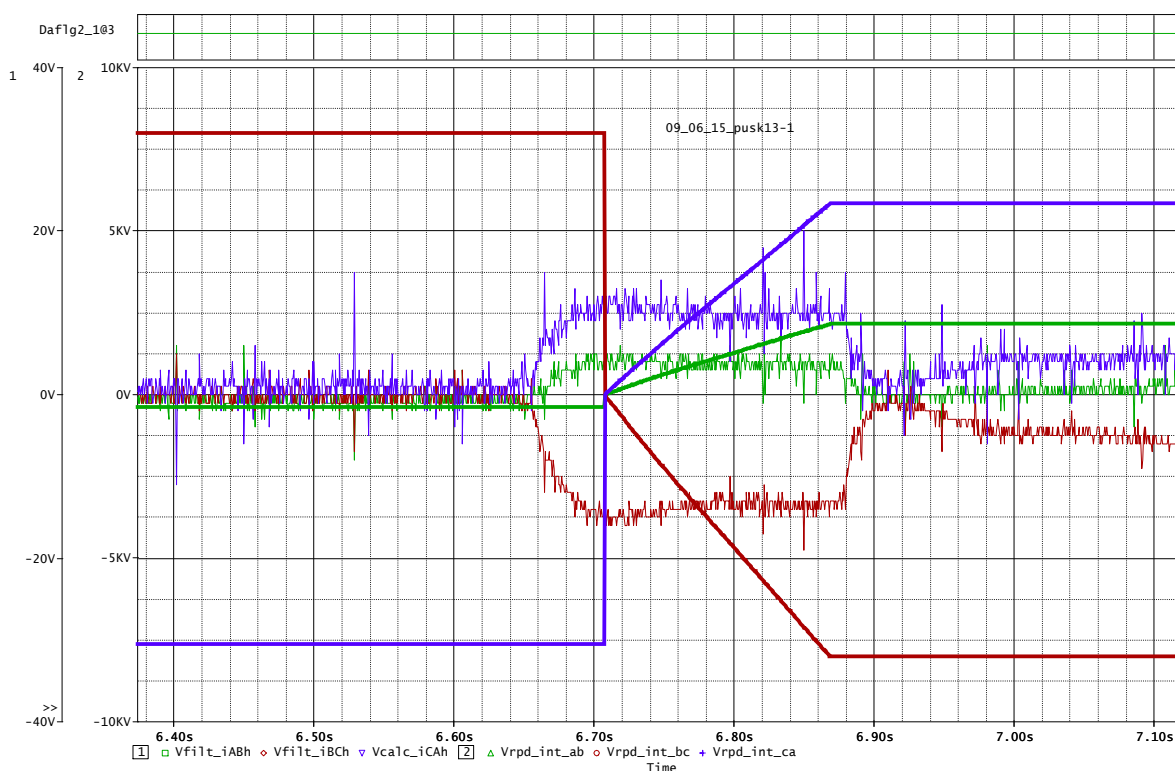


Рис.1

#### 4. 2. Разгон в импульсном режиме работы

При низкой скорости вращения ротора, э.д.с., наведенная в обмотках статора, недостаточна для обеспечения естественной коммутации вентиля инвертора. Поэтому разгон двигателя на начальном участке производится толчками путем поочередной подачи блоков тока от ТПУ в нужные пары фаз статора. При подаче блока тока в статоре создается магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем ротора, поворачивает ротор на некоторый

угол. Для дальнейшего движения ротора необходимо подать блок тока в другую пару фаз статора и т.д. Но для этого необходимо снять предыдущий блок тока. Это осуществляется путем перевода выпрямителя в инверторный режим, благодаря чему энергия, накопленная в индуктивностях ТПУ и двигателя, возвращается в сеть, ток блок уменьшается до нуля и тиристоры ТПУ запираются. Через паузу (10-15мс), необходимую для восстановления запирающих свойств тиристоров, на статор, но уже в другие фазы, подается новый блок тока и т.д. до достижения достаточного для естественной коммутации напряжения статора. Длительность блока тока и выбор очередной пары тиристоров инвертора (и соответственно фаз статора) осуществляется по напряжению системы ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты), которая подтягивается к реальному напряжению статора, наведенному на нем вращающимся магнитным полем ротора. На рис.2 и 3 (в увеличенном масштабе в зоне перехода в непрерывный режим работы) показан процесс перехода работы инвертора из импульсного режима работы в непрерывный.

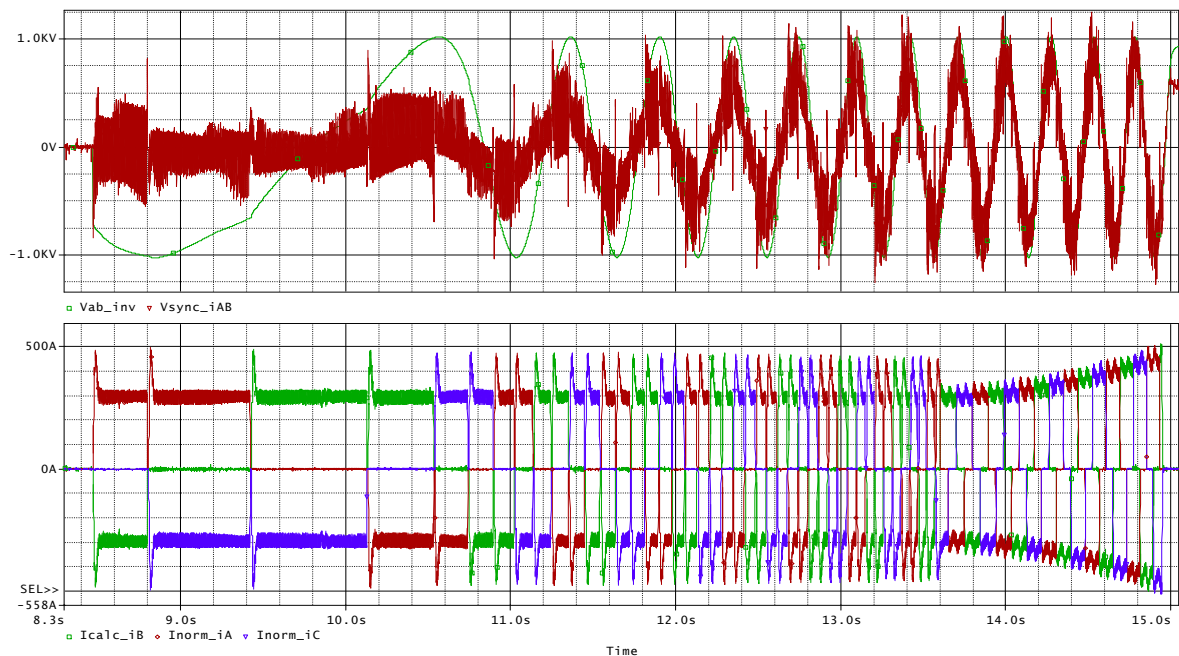


Рис.2

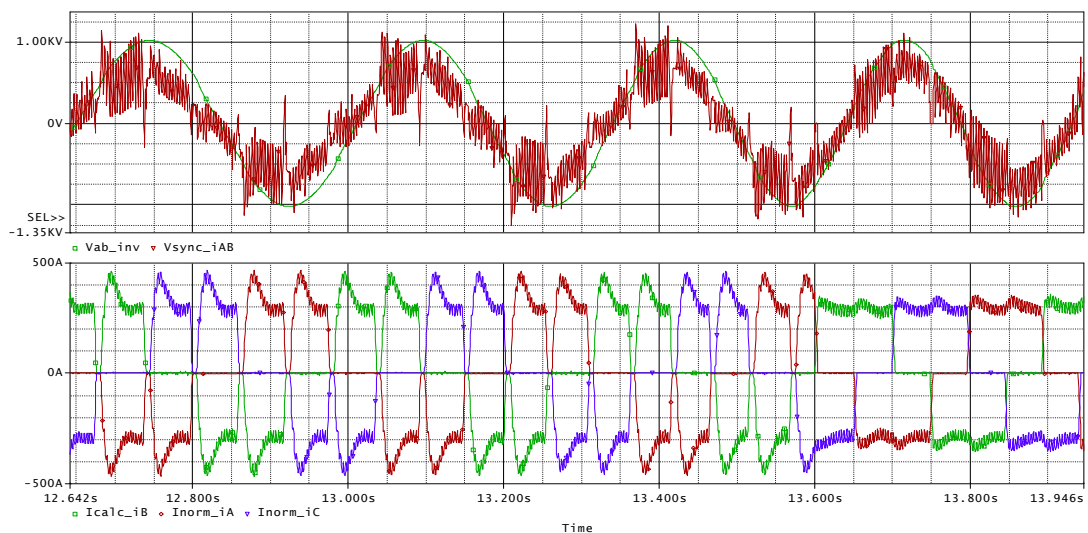


Рис.3

На верхней осциллограмме зеленая кривая – напряжения ФАПЧ фазы АВ, красная – напряжение  $U_{ав}$  статора. Видно, что напряжение ФАПЧ достаточно быстро синхронизируется с «живым» напряжением статора. На нижней осциллограмме показаны токи фаз статора. В конце виден переход в непрерывный режим работы, когда токи статора не прерываются. По обеим осциллограммам видно плавное повышение частоты, как в прерывистом, так и в непрерывном режиме.

### 4. 3. Разгон в непрерывном режиме работы преобразователя

На рис. 3 показан длительный пуск компрессора, нагруженного на эксгаустер, с ограничением тока пуска до  $0,37 \cdot I_{ном}$ . В непрерывном режиме работы инвертора разгон двигателя происходит в соответствии с заданной тахограммой пуска (синяя кривая на рис.3). По изломам этой кривой видно, что она содержит 4 участка. Последний участок соответствует режиму начала подгонки частоты двигателя к частоте сети, к которой двигатель подключается после пуска. Отклонение реальной скорости вращения ротора (красная кривая на рис.3) от скорости, заданной тахограммой на первых трех участках, связано с ограничением тока статора регулятором тока ТПУ. Для совпадения этих кривых на всем протяжении разгона двигателя можно либо снять ограничение по току ТПУ, либо изменить тахограмму пуска. В начале режима синхронизации скорость, задаваемая тахограммой, приравнивается к реальной скорости вращения ротора. Зеленая кривая (зеленое поле) на рис. 3 – это ток фазы В статора двигателя. Видно, что на 40-й секунде пуска ток ТПУ выходит на верхнее ограничение и до начала синхронизации поддерживается на этом уровне.

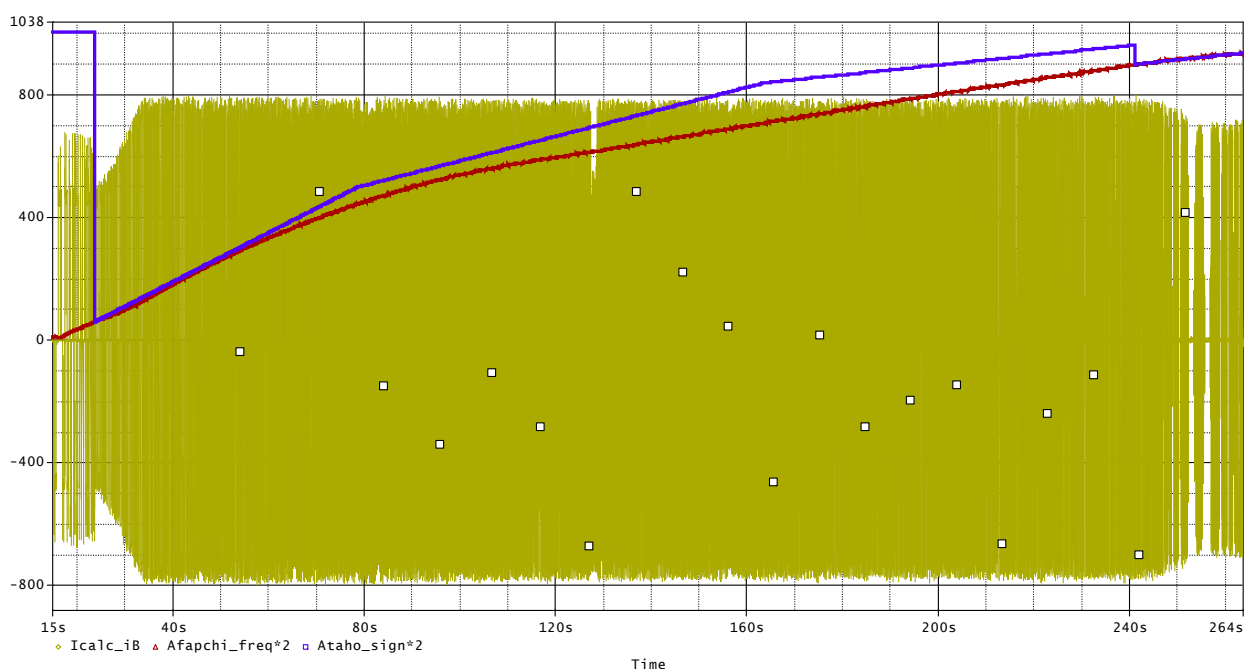


Рис. 3

#### 4. 4. Синхронизация напряжения статора двигателя с напряжением сети и переключение двигателя на сеть

При достижении частоты вращения ротора 45 Гц задающая тахограмма пуска совмещается с реальной тахограммой, а при частоте вращения ротора 49,8 Гц выставляется флаг синхронизации, по которому СУ ТПУ производит точную подгонку частоты, фазы и амплитуды напряжения статора к напряжению сети, на которую переключается двигатель. Значения параметров синхронизации, при которых выдается команда на включение рабочего выключателя двигателя, задаются с учетом их изменения за время от момента выдачи команды на выключатель до момента замыкания его силовых контактов. Если двигатель переключается на сеть на выбеге (т.е. после отключения ТПУ), то для нагруженного двигателя эти изменения могут быть заметными. Если ТПУ отключается от двигателя только после его подключения к рабочей сети, то изменения параметров синхронизации незначительны (при этом сеть и ТПУ на интервале переключения работают на двигатель вместе).

На рис. 4 приведена осциллограмма напряжений двигателя и сети до и после замыкания силовых контактов выключателя сети.

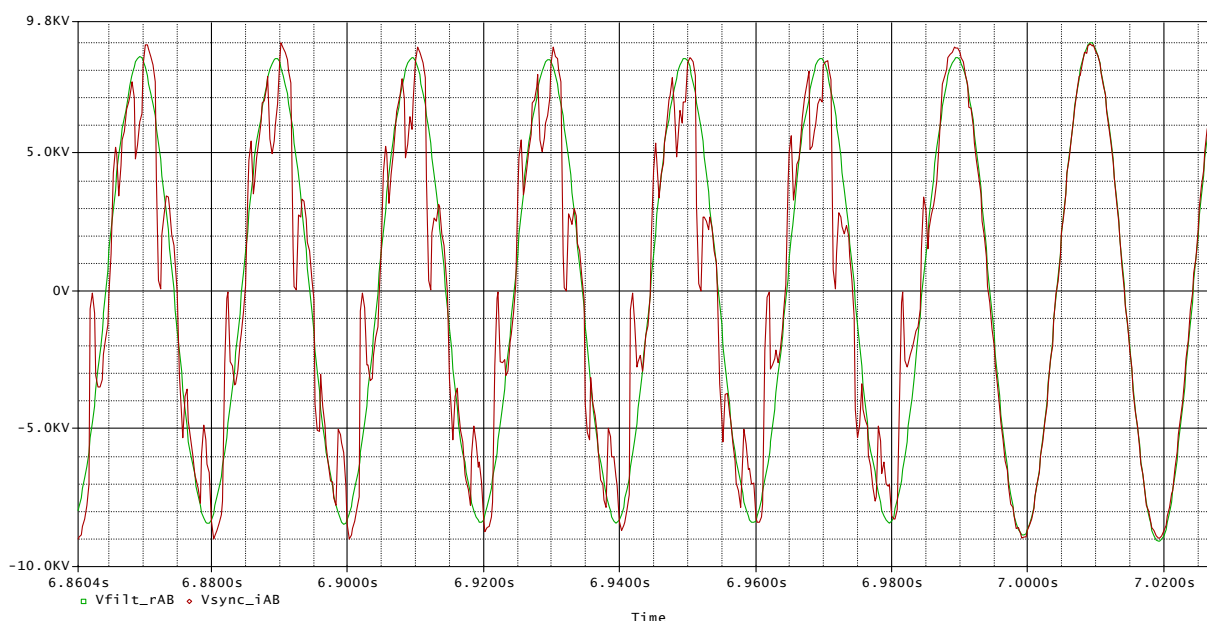


Рис. 4

Красная кривая с коммутационными искажениями, вызванными работой инвертора, - это линейное напряжение  $U_{ав}$  двигателя, зеленая кривая – это напряжение  $U_{ав}$  сети. Из осциллограмм видно, что напряжения двигателя и сети практически совпадают по амплитуде и фазе до подключения сети. После подключения к сети они совпадают абсолютно. Момент замыкания силовых контактов выключателя происходит в момент времени, когда кривые начинают совпадать абсолютно.