

DOI: 10.34831/EP.2021.57.41.005
УДК 62.83:621.314.26

Мощные частотно-регулируемые электроприводы газоперекачивающих агрегатов компрессорной станции «Павелецкая» ООО «Газпром Трансгаз Москва»

МУСТАФА Г. М., канд. техн. наук
ЛЕВЧЕНКО А. В., СЕННОВ Ю. М., ЧИСТИЛИН С. В.
ГУСЕВ С. И., канд. техн. наук; gusev-si@lm-inverter.ru
ООО «НПП ЛМ Инвертор»
111250, Москва, Красноказарменная ул., 12



Г. М. Мустафа



А. В. Левченко



Ю. М. Сеннов



С. В. Чистилин



С. И. Гусев

Приведены результаты выполненного комплекса работ по модернизации частотно-регулируемых синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) № 1 и № 2 компрессорной станции «Павелецкая» Путятинского линейного производственного участка магистрального газопровода филиала ООО «Газпром Трансгаз Москва». В рамках модернизации электроприводов на компрессорной станции установлены и введены в эксплуатацию два тиристорных преобразователя частоты ТПЧ-10/25000, предназначенные для плавного частотного пуска и регулирования скорости вращения синхронных электродвигателей типа 4В 284-02Н мощностью 25 МВт каждый. Преобразователи частоты разработаны и изготовлены научно-производственным предприятием ООО «НПП ЛМ Инвертор» с применением современных отечественных силовых компонентов и микропроцессорной системы управления собственной разработки, позволившей реализовать эффективные принципы регулирования производительности ГПА, контролировать параметры и состояние всех узлов ТПЧ, архивирование событий и обмен информацией с АСУ ТП газоперекачивающих агрегатов. В настоящее время преобразователи ТПЧ-10/25000 являются наиболее мощными в России тиристорными преобразователями частоты для регулируемого синхронного электропривода среднего напряжения, разработанными и изготовленными отечественным предприятием.

Ключевые слова: частотно-регулируемый синхронный электропривод, тиристорный преобразователь частоты, микропроцессорная система управления.

На газоперекачивающих агрегатах (ГПА) № 1 и № 2 компрессорной станции «Павелецкая» в эксплуатации находились два комплекта частотно-регулируемых электропривода производства ЧКД (Чехия), в состав каждого из которых входил синхронный двигатель, выполненный с двумя обмотками на статоре по схеме «двойная звезда» со сдвигом 30 эл. град., два двухзвенных

тиристорных преобразователя частоты (ТПЧ) [по одному на каждую обмотку статора] и входной четырёхобмоточный трансформатор. Необходимость модернизации электроприводов ГПА была обусловлена исчерпанием эксплуатационного ресурса, морального и физического износа тиристорных преобразователей частоты. В соответствии с техническим заданием в электропри-

воде каждого ГПА заменялись только ТПЧ. При этом сохранялись входной согласующий четырёхобмоточный трансформатор, сглаживающие реакторы звена постоянного тока преобразователей частоты и синхронный двигатель. В соответствии с техническим заданием ООО «НПП ЛМ Инвертор» разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию два тиристорных преобразователя частоты ТПЧ-10/25000. Каждый преобразователь частоты ТПЧ-10/25000 состоит из двух обратимых преобразователей, содержащих выпрямительные и инверторные тиристорные мосты со сглаживающими реакторами в звене постоянного тока (рис. 1). Их питание осуществляется от энергосистемы через четырёхобмоточные согласующие трансформаторы, обеспечивающие создание двух трёхфазных систем напряжения 10 кВ со сдвигом 30 эл. град. При этом в сетевой обмотке трансформатора формируется ток, соответствующий режиму работы 12-пульсного управляемого выпрямителя, что практически снимает проблему негативного влияния высших гармоник на сеть электроснабжения и обеспечивает требуемое значение коэффициента искажения синусоидальности напряжения сети [1].

Параллельная синхронная работа преобразователей частоты на две группы обмоток электродвигателя обеспечивается общей системой управления, которая реализует функционирование электропривода ГПА в следующих основных режимах:

- трогание неподвижного двигателя в заданном направлении вращения;
- разгон двигателя до частоты напряжения статора, соответствующей заданию оператора;
- регулирование частоты электродвигателя в диапазоне 43 – 65 Гц;
- штатное отключение преобразователя ТПЧ-10/25000 снятием импульсов управления тиристорами с естественным торможением электродвигателя и ГПА на выбеге;
- аварийное отключение ТПЧ-10/25000 с принудительным торможением электродвигателя до полной остановки с заданным темпом (7 Гц/с) с рекуперацией энергии в сеть;
- экстренное отключение ТПЧ-10/25000 по сигналам защит с прекращением подачи импульсов управления тиристора-

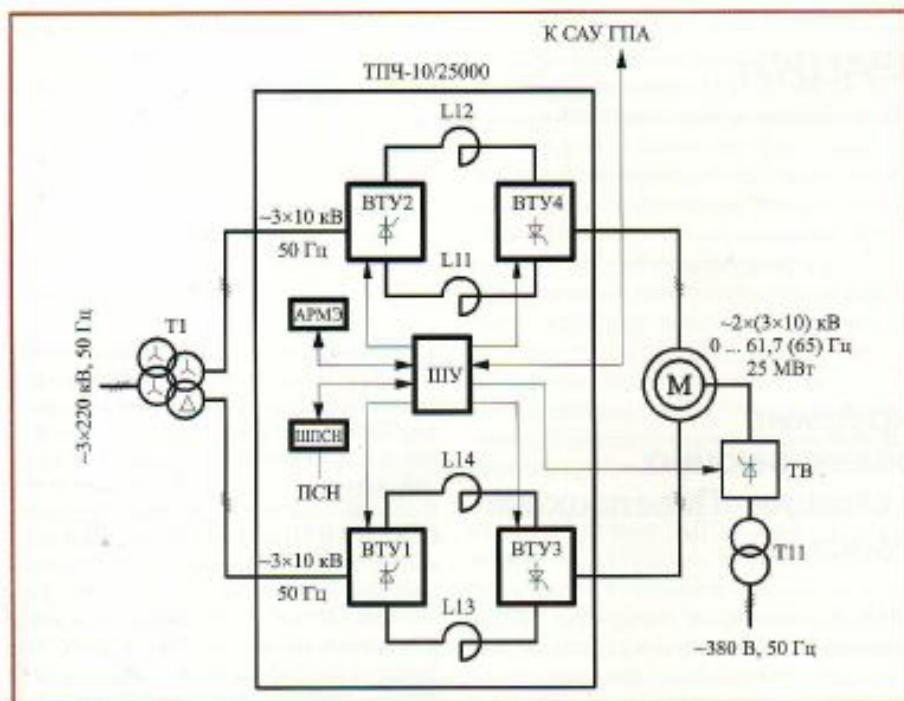


Рис. 1. Однолинейная структурная схема ТПЧ-10/25000:

ВТУ — высоковольтное тиристорное устройство; ШУ — шкаф управления; ШПСН — шкаф питания собственных нужд; АРМЭ — автоматизированное рабочее место энергетика; ТВ — тиристорный возбудитель; М — синхронный электродвигатель; L11 — L14 — сглаживающие реакторы

ми и выдачей сигнала на отключение входного выключателя 10 кВ;

— работа ТПЧ-10/25000 на низких оборотах двигателя со скоростью вращения 360 об/мин (5–6 Гц);

— «подхват» двигателя при частоте напряжения 7–9 Гц и разгон до минимальной частоты диапазона регулирования 43 Гц.

Характеристики ТПЧ-10/25000 приведены ниже.

Особенности конструкции ТПЧ-10/25000

Преобразователь частоты ТПЧ-10/25000 состоит из четырёх высоковольтных тиристорных устройств (ВТУ): двух выпрямительных — ВТУ1, ВТУ2 и двух

инверторных — ВТУ3, ВТУ4 (рис. 1). Каждое ВТУ размещено в трёх шкафах размерами 1200 × 1250 × 2500 мм каждый. Один шкаф ВТУ содержит в себе анодный и катодный вентили тиристорного моста, собранные на тиристорах Т173-1000-60-71 60 класса на ток 1000 А производства ОАО «Электровыпрямитель» [2]. Тиристорный вентиль состоит из семи последовательно соединённых съёмных тиристорных блоков, в состав которых входят тиристор с воздушным охладителем, драйвер, делитель напряжения на тиристоре, защитная RC-цепь тиристора. Также в каждом вентиле предусмотрен один избыточный тиристорный блок, что обеспечивает сохранение работоспособности преобразо-

вателя во всех режимах работы при выходе из строя одного тиристора (принцип $N - 1$). Охладители тиристорных размещены в двух вертикальных каналах шкафов ВТУ, продуваемых основным и резервным блоком вентиляторов. Каждый воздушный канал охлаждения шкафа ВТУ оснащён реле давления для контроля протока воздуха и датчиками контроля температуры воздуха на входе воздушного канала, что обеспечивает реализацию автоматического переключения на резервный вентилятор или защитное отключение при долговременном отсутствии протока воздуха в канале.

Учитывая значительный срок эксплуатации синхронных двигателей ГПА, а также что ресурс изоляции обмотки статора в серьёзной степени зависит от пикового напряжения на ней, определяемого суммой фазного напряжения на выходе инвертора и напряжения на нейтрали двигателя, в проекте приняты меры по снижению напряжения на изоляции статора. С этой целью ёмкости защитных RC-цепей, установленных на выходе инверторов ВТУ3, ВТУ4 и на входе выпрямителей ВТУ1, ВТУ2, выбраны в отношении 1:4,5 (0,073 мкФ/0,33 мкФ). В результате отношение пикового напряжения нейтрали на стороне двигателя к пиковому напряжению нейтрали на стороне сети составило 1 кВ к 5,3 кВ. Тем самым было достигнуто компромиссное распределение напряжения, приложенного к изоляции статора двигателя и обмоткам силового питающего трансформатора.

Фотография ТПЧ-10/25000, установленного на компрессорной станции «Павелецкая», приведена на рис. 2.

Система управления

Управление ТПЧ-25000 осуществляется системой управления, регулирования, защит и автоматики типа *ulicon*¹, расположенной в отдельном шкафу управления. Система *ulicon* — это управляющая платформа, спроектированная в ООО «НПП ЛМ Инвертор», применяемая для управления средневольтными (6, 10, 15 кВ) преобразователями. Она представляет собой масштабируемый комплекс блоков и ячеек управления, построенных на основе современных быстродействующих сигнальных процессоров (Texas Instruments), быстродействующих микросхем программируемой логики (Altera) и оптоволоконной пересылки сигналов управления и измеренных величин (Avago).

Основные вычислительные задачи по формированию заданий, обработке сигналов обратных связей, многоконтурному регулированию, формирова-

¹ Официальный сайт ООО «НПП ЛМ Инвертор». <http://www.lm-inverter.ru>.

Характеристики ТПЧ-10/25000

Входные параметры

Номинальное напряжение питающей сети, кВ	10 ± 0,5
Номинальная частота напряжения питающей сети, Гц	50
Номинальное напряжение питания собственных нужд, В:	
— трёхфазное частотой 50 Гц (основное)	380 ± 38
— трёхфазное частотой 50 Гц (резервное)	380 ± 38
— постоянное (резерв)	220 ± 33

Выходные параметры

Номинальная активная мощность нагрузки, кВт	25 000
Номинальная полная мощность нагрузки, кВА	29 400
Коэффициент мощности (cosφ)	0,85
Номинальное выходное напряжение (трёхфазное, переменное), кВ	2 × 10
Номинальная частота выходного напряжения, Гц	61,7
Диапазон изменения частоты выходного напряжения, Гц	0 ... 65
Режим работы	длительный
Способ охлаждения	Воздушное, принудительное



Рис. 2. Общий вид ТПЧ-10/25000, установленного на компрессорной станции «Павелецкая»

нию импульсов управления в системе *uliscop* выполняет одна или несколько ячеек цифрового сигнального процессора. Расчёт алгоритмов управления осуществляется в цифровых сигнальных процессорах с тактом счёта 111 нс, что соответствует 2 эл. град. сетевой частоты 50 Гц.

Все сигналы защит и блокировок суммируются в ячейке контроля и защит с запоминанием хронологии событий при защитном отключении. Предусмотрены средства ведения протоколов работы ТПЧ, регистрации осциллограмм нормальных и аварийных процессов, сохранения их во встроенной энергонезависимой памяти, реализованной на основе встроенного промышленного компьютера ICOP формата PC104.

В процессе работы обеспечивается непрерывная связь с системой верхнего уровня (центром управления) по одному из доступных интерфейсов: оптоволокну, RS-485, CAN, Ethernet. При необходимости каналы связи дублируются для повышения надёжности.

Передача импульсов управления от системы управления (СУ) ТПЧ-10/25000 к драйверам тиристоров и информации о состоянии каждого тиристора (пробой тиристора, перегрев, срабатывание защиты по превышению допустимого напряжения на тиристоре) от драйверов к СУ осуществляется в цифровой форме посредством одномодовых оптоволоконных кабелей. В драйверах тиристоров реализована функция принудительного включения тиристора при превышении критического уровня прямого напряжения на тиристоре (функция VOD), равного $5 \text{ кВ} \pm 5\%$.

Мгновенные значения входных и выходных напряжений и токов, выпрямленных напряжений и токов передаются в СУ в цифровой форме по оптоволоконным кабелям на основе использования 16- или 24-битных АЦП фирмы AnalogDevices и ПЛИС Altera. Цифровая связь между платами управления

осуществляется на основе интерфейсов RS-485, CAN и высокоскоростной последовательной передаче кодированных сигналов на скорости до 100 Мбит/с.

Наличие в составе системы *uliscop* GPRS-модема позволяет в автоматическом режиме передавать данные о режимах работы или диагностическую информацию на сервер в сети Internet с доступом к ним в любое время с любого компьютера, подключённого к сети. Тем самым обеспечивается возможность оперативного дистанционного обслуживания оборудования предприятием-изготовителем на основании полученных на сервер данных. Реализована связь системы управления с автоматизированным рабочим местом энергетика (АРМЭ) и АСУ ТП верхнего уровня на основе резервированного интерфейса RS-485 по стандартному протоколу Modbus.

В системе управления ТПЧ-10/25000 предусмотрен набор программных и аппаратных защит для предупреждения развития аварийных событий, а также сигнализация о неисправностях, не требующих экстренной остановки привода.

Поскольку ни сеть, питающая ТПЧ-10/25000, ни обмотки статора двигателя не имеют заземлённой нейтрали, предусмотрена возможность сохранения штатной работы в случае возникновения короткого замыкания на землю одной из фаз входного или выходного напряжения ТПЧ-10/25000 с выдачей предупредительной сигнализации.

Особенности алгоритма управления

Управление электроприводом осуществляется без применения датчиков скорости или положения ротора (*sensorless*) с помощью встроенной в программу управления подстраиваемой модели электропривода (ПМЭП). Подстройка ПМЭП осуществляется по измеряемым значениям тока и напря-

жения двигателя. При этом ПМЭП выявляет текущее значение момента и ускорения электропривода. Определённые таким образом значения используются далее в подчинённом контуре регулирования момента электропривода и последующих регуляторах.

Отработка структуры регуляторов и определение их параметров проводилась на основе математической модели электропривода в программном комплексе ЭЛТРАН [3]. Комплекс ЭЛТРАН обеспечивает отображение электрических систем, содержащих многообмоточные трансформаторы, вращающиеся электрические машины, а также вентильные преобразователи с их системами управления и регуляторами. В ЭЛТРАН-модели электропривода отображены:

- 4-обмоточный сетевой трансформатор;
- 2-обмоточная вращающаяся машина с обмоткой возбуждения и демпфирующей обмоткой ротора;
- по два вентильных преобразователя с сетевой и двигательной стороны;
- вентильные преобразователи возбуждения;
- резонансные фильтрокомпенсирующие цепи на третичной обмотке сетевого трансформатора;
- ЭДС и реактанс питающей сети;
- система импульсно-фазового управления (СИФУ) вентильных мостов;
- подстраиваемая модель двигателя; подчинённый регулятор момента и регуляторы скорости/ускорения и регулятор тока;
- конечные автоматы смены режимов системы.

В модели многообмоточной машины отображаются взаимоиндуктивности обмоток и учитывается явление насыщения магнитной системы. И то, и другое необходимо для обеспечения адекватности модели при определении параметров регуляторов и системы импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорными преобразователями. ЭЛТРАН позволяет также учесть взаимоиндуктивности и насыщение магнитной системы сетевого трансформатора, что необходимо при рассмотрении процессов в резонансных фильтрокомпенсирующих цепях. Использование полной адекватной ЭЛТРАН-модели электропривода — необходимое условие для оперативного и быстрого выполнения пусконаладочных работ и ввода его в эксплуатацию. Можно отметить три особенности, выявленные при моделировании и учтённые при определении структуры и параметров системы управления:

1) Импульсы коммутации вентильных мостов двигательной стороны передаются через взаимоиндуктивности обмотки статора с одного моста на другой, сокращая интервал отрицательного напряжения вентилей. Такое явление осо-

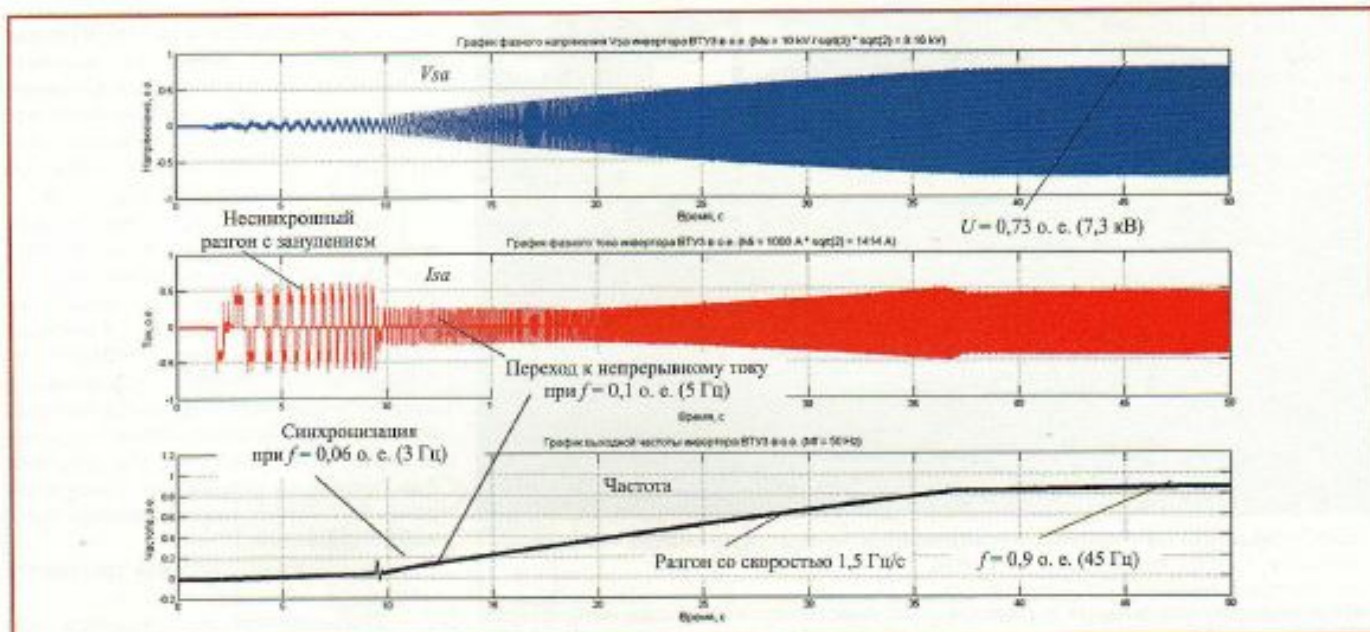


Рис. 3. Этапы процесса плавного пуска двигателя (плечи VTU1 – VTU3):

$U_{s\alpha}$ — фазное напряжение на выходе VTU3 (напряжение статора); $I_{s\alpha}$ — фазный ток VTU3 (ток статора)

бенно существенно при повышении частоты до 62,5 Гц и учтено в параметрах СИФУ.

2) При разгоне двигателя с заданным (высоким) ускорением в момент достижения заданной скорости неизбежно происходит резкий спад мощности двигателя. Этот спад сопровождается выбросом напряжения двигателя. Величина выброса зависит от насыщения магнитной системы двигателя, что учтено в модели. Величина выброса может быть определена по диаграмме Потье [4] и может достигать 30 %. Для уменьшения выброса в СУ ТПЧ предусмотрен контур динамического регулирования реактивной мощности, воздействующий на углы опережения (управления) инверторных мостов. Повышение реактивной мощности осуществляется кратковременно и снимается затем более медленным регулятором возбуждения.

3) Техническое задание на ТПЧ предусматривало особый технологический режим длительной работы на весьма низкой частоте (5 – 7 Гц). При этом возникают проблемы с RC-цепями выпрямительных мостов. Углы управления выпрямителями при низких скоростях приближаются к 90 эл. град. Скорости коммутации и потери в RC-цепях при этом достигают высоких значений; потери в RC-цепях превышают основные потери проводимости в тиристорах. Для исключения этого явления был разработан и использован в ТПЧ специальный режим регулирования выпрямительными мостами — режим зануления отрицательных выбросов. Система импульсно-фазового управления выпрямителя при этом вырабатывает дополнительные импульсы включения при переходах ЭДС выпрямителя через ноль. Алго-

ритм зануления способен действовать в диапазоне углов управления от 60 до 90 эл. град., т. е. в зоне наибольших потерь в RC-цепях, а также в зоне наибольшей величины пульсаций потоко-сцепления сглаживающих реакторов. Действие алгоритма зануления снижает и потери в RC-цепях, и пульсации выпрямленного тока приблизительно в 4 раза. Действие алгоритма зануления видно на осциллограмме (см. рис. 4), снятой на объекте.

Результаты испытаний

На рис. 3 приведены осциллограммы, иллюстрирующие процесс плавного пуска двигателя. Здесь и далее приведены осциллограммы для одного плеча ТПЧ-10/25000 VTU1 – VTU3 или VTU2 – VTU4, так как процессы в обоих плечах аналогичны.

Осциллограммы показаны в относительных величинах с масштабами, приведёнными в таблице. При штатной работе ТПЧ-10/25000 в автоматическом режиме проводится определение начального положения ротора синхронного двигателя, плавный пуск и разгон двигателя до частоты 43 Гц с последу-

ющей возможностью регулирования частоты в диапазоне 43 – 65 Гц.

Регулирование электродвигателя осуществляется по закону управления $U/f = \text{const}$. Отслеживание величины напряжения на электродвигателе согласно закону управления происходит путём регулирования тока возбуждения двигателя.

Этапы процесса плавного пуска двигателя (рис. 3):

- несинхронный разгон двигателя до частоты 3 Гц с фиксированным значением тока 0,4 о. е. и принудительным занулением выпрямленного тока для коммутации тиристоров инверторов VTU3 и VTU4;
- синхронизация СУ с напряжениями на статорных обмотках двигателя при частоте 3 Гц активация регулятора тока;
- переход к непрерывному выпрямленному току при достижении частоты напряжения электродвигателя 5 Гц;
- разгон двигателя до нижнего значения диапазона регулирования 43 Гц со скоростью 1,5 Гц/с.

Осциллограммы режима перехода к занулению отрицательных участков выпрямленного напряжения приведены на рис. 4. При достижении частоты напряжения электродвигателя, равной 5 Гц, происходит переход к непрерывному выпрямленному току VTU1 – VTU3 с коммутацией тиристоров инвертора VTU3, осуществляемой ЭДС двигателя.

На рис. 5 приведены осциллограммы режима подхвата двигателя «на выбеге». После подачи команды «Стоп» происходит сброс тока двигателя до нуля, при этом возможно отключение сетевого напряжения. Торможение двигателя происходит на выбеге с плавным снижением скорости вращения. В про-

Масштабы относительных единиц переменных

Наименование переменной	Масштаб
Ток, А	$M_i = 1000\sqrt{2} = 1414$
Линейное напряжение, кВ	$M_{U_{\text{лн}}} = 10\sqrt{2} = 14,14$
Фазное напряжение, кВ	$M_{U_{\text{ф}}} = 10/\sqrt{3}\sqrt{2} = 8,17$
Частота, Гц	$M_f = 50$
Угол управления, град.	$M_{\alpha/\beta} = M_{\beta/\alpha} = 180$

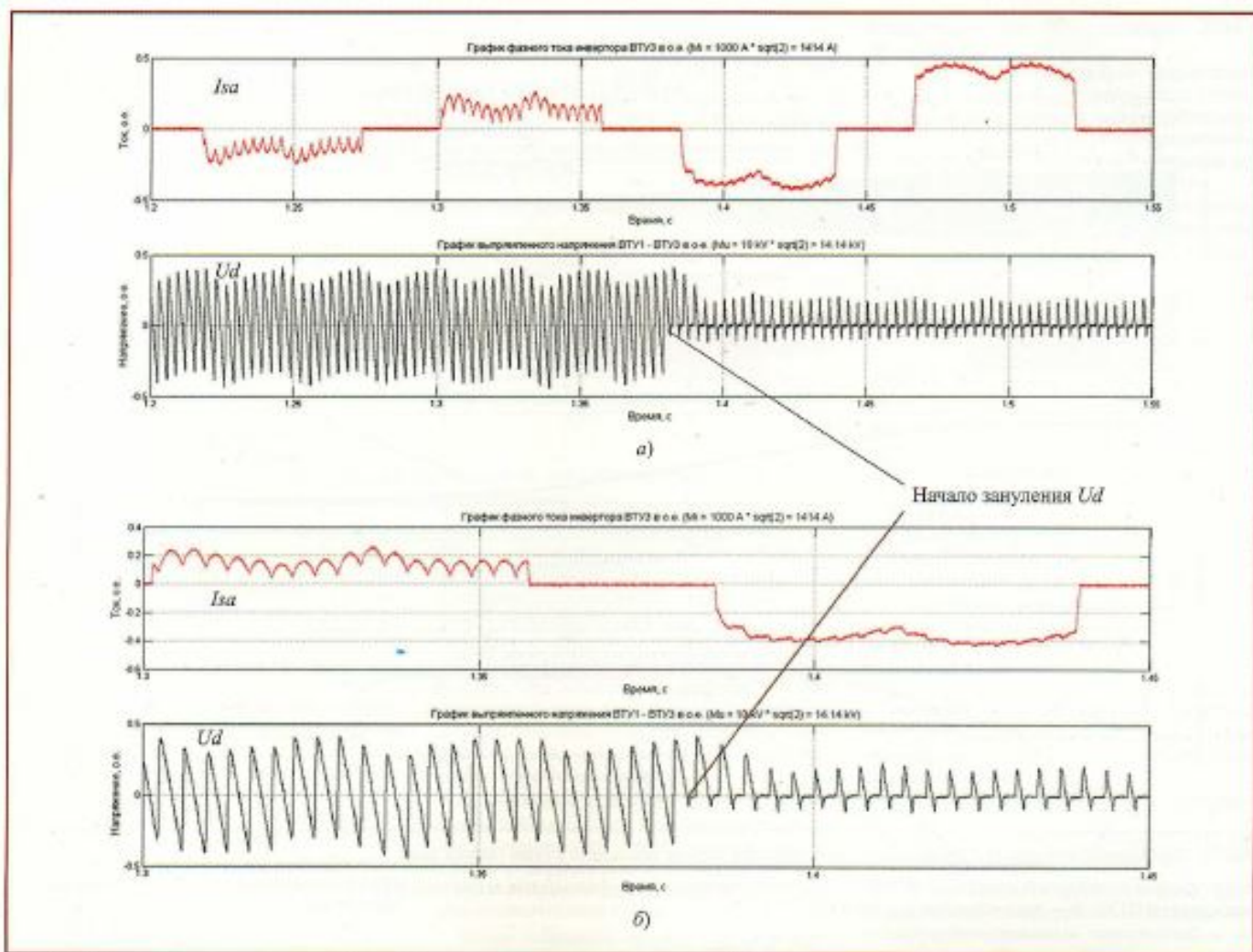


Рис. 4. Осциллограммы режима перехода к загрузке выпрямленного напряжения:

а — общий вид; б — подробно; I_{sa} — фазный ток инвертора ВТУЗ (ток статора), U_d — выпрямленное напряжение звена постоянного тока ВТУ1 — ВТУ3

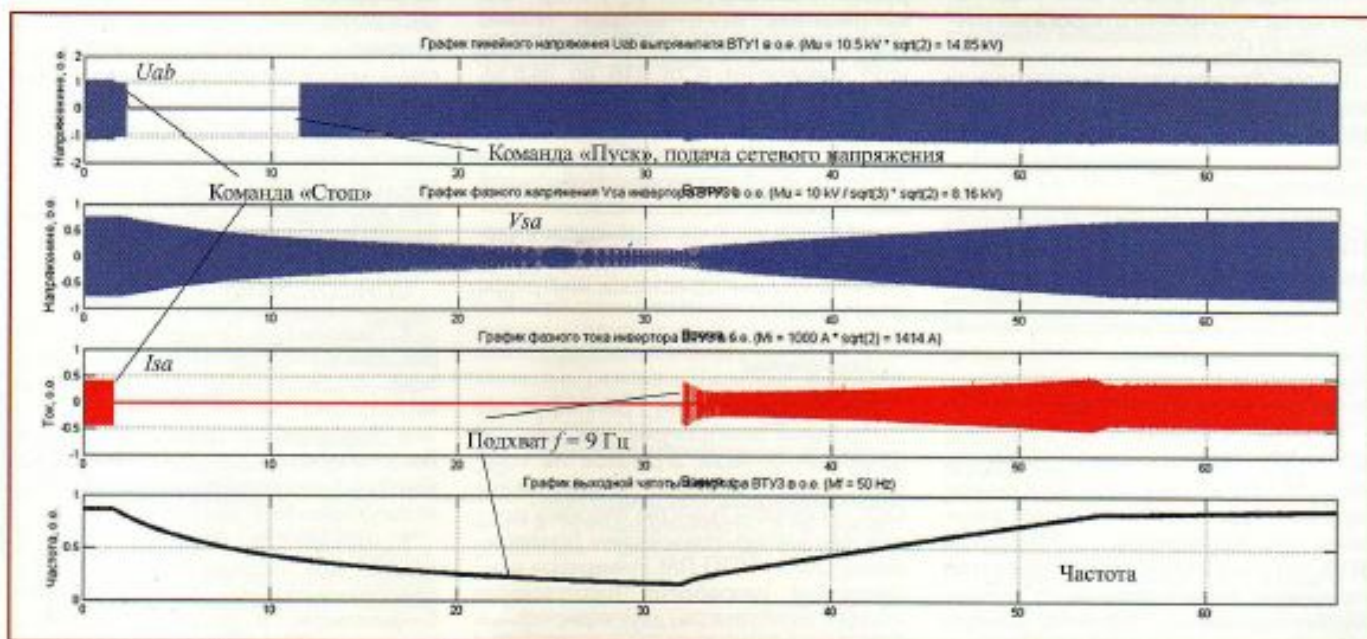


Рис. 5. Подхват двигателя на выезде (общий вид):

U_{ab} — линейное напряжение выпрямителя ВТУ1; V_{sa} — фазное напряжение инвертора ВТУЗ (напряжение статора); I_{sa} — фазный ток инвертора ВТУЗ (ток статора)

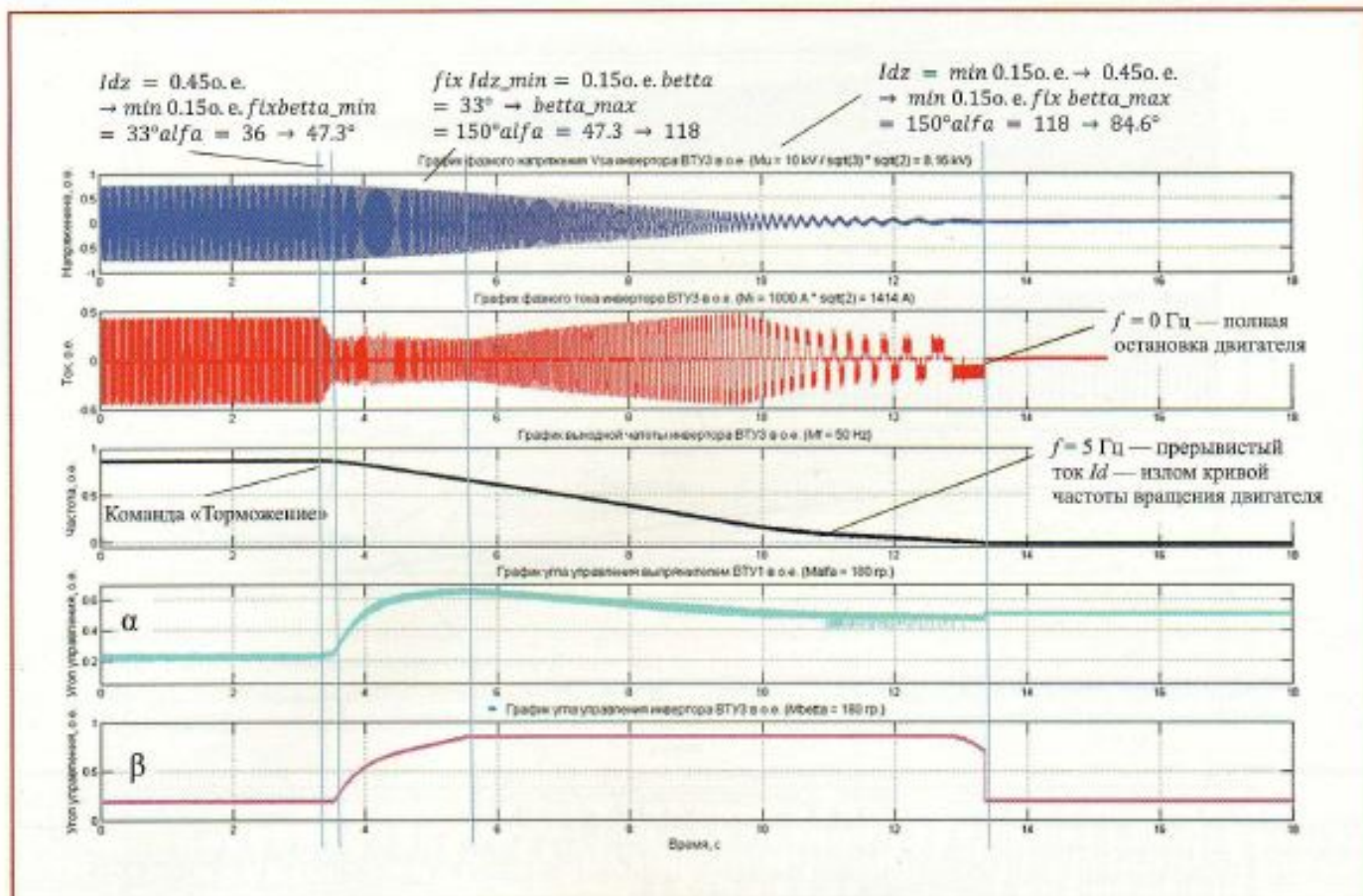


Рис. 6. Торможение двигателя с рекуперацией механической энергии двигателя в сеть (общий вид):

U_{sa} — фазное напряжение инвертора ВТУЗ (напряжение статора); I_{sa} — фазный ток инвертора ВТУЗ (ток статора); α — угол управления выпрямителем ВТУ1; β — угол управления инвертором ВТУЗ

цессе выбега подана команда «Пуск», возобновлено питание ТПЧ от сетевого напряжения, и при достижении частоты напряжения на статоре 9 Гц осуществляется подхват и разгон электродвигателя до частоты нижнего порога регулирования 43 Гц.

На рис. 6 приведены осциллограммы режима торможения двигателя с рекуперацией энергии в сеть.

Процесс торможения двигателя состоит из трёх этапов:

- угол управления инвертором ВТУЗ — $\beta = 33$ эл. град., фиксированный, регулятор тока инвертора уменьшает задание тока до минимального значения $I_{dz_{min}} = 0,15$ о. е., регулятор тока выпрямителя ВТУ1 обрабатывает это задание, увеличивая угол управления выпрямителем α от 36 до 47,3 эл. град.;

- после снижения тока инвертора ВТУЗ до минимального значения $I_{dz_{min}} = 0,15$ о. е., регулятор тока инвертора блокируется и активируется регулятор угла управления α инвертором ВТУЗ, который плавно увеличивает угол управления инвертором β до максимально возможного значения, равного 150 эл. град., при этом регулятор тока выпрямителя ВТУ1 поддерживает задание по току $I_{dz_{min}} = 0,15$ о. е., плавно увеличивая угол α от 47,3 до 118 эл. град.;

- после того, как угол управления инвертором ВТУЗ достигает максимального значения $\beta = 150$ эл. град., регулятор угла управления инвертором блокируется и активируется регулятор тока выпрямителя ВТУ1, который плавно увеличивает задание по току, уменьшая угол управления α от 118 до 84,6 эл. град., обеспечивая рекуперацию энергии двигателя в сеть. Торможение двигателя в описанном режиме происходит до его полной остановки. Небольшой излом кривой изменения частоты в районе 5 Гц обусловлен переходом в режим прерывистого выпрямленного тока для коммутации тиристорov инвертора ВТУЗ.

Заключение

Для модернизации регулируемых синхронных электроприводов двух газоперекачивающих агрегатов на компрессорной станции «Павелецкая» ООО «Газпром Трансгаз Москва» российским научно-техническим предприятием ООО «НПП ЛМ Инвертор» осуществлена разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию двух тиристорных преобразователей частоты ТПЧ-10/25000, выполненных на отечественных силовых компонентах, которые являются в настоящее время наиболее мощ-

ными разработанными и изготовленными в России тиристорными преобразователями для частотно-регулируемого синхронного электропривода среднего напряжения. Микропроцессорная система управления с программным обеспечением, разработанным специалистами «НПП ЛМ Инвертор», позволяет гибко управлять производительностью компрессорных агрегатов и контролировать параметры и состояние всех узлов ТПЧ, архивирование событий и обмен информацией с АСУ ТП газоперекачивающих агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев С. А. Применение инверторов тока в высоковольтном электроприводе // Экспозиция Нефть Газ. 2013. № 4(29). С. 78 – 80.
2. Электронный каталог тиристорov: ПАО «Электровыпрямитель», 2018. http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/nizkochast_tabl.php.
3. Мустафа Г. М., Шаранов И. М. Программа для моделирования устройств преобразовательной техники ЭЛТРАН. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015618734, 2015 г.
4. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Часть вторая. — Л.: Энергия, 1973. — 648 с.