

## Система подмагничивания управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора

*Л.Н. Конторович, технический директор ПАО «ЗТР», к.т.н.;*

*И.А. Широков, начальник бюро разработки систем управления реакторов ПАО «ЗТР»;*

*В.Е. Витренко, ведущий инженер-электроник по системам управления*

В статье приведено описание системы подмагничивания управляемого подмагничиванием шунтирующего реактора (УПШР) конструкции ПАО «Запорожтрансформатор», Запорожье, Украина.

УПШР производства ПАО «Запорожтрансформатор» доказали свою надежность и производительность, работая в течение многих лет (более 10) в энергосистемах России, Казахстана, Беларуси и Литвы.

Принцип действия реактора такой конструкции состоит в управляемом изменении степени насыщения полустержней его электромагнитной части путем изменения значения выпрямленного тока, протекающего по обмотке управления УПШР. Изменение степени насыщения полустержней вызывает изменение индуктивности сетевой обмотки УПШР, а, следовательно, и изменение потребляемой из сети реактивной мощности.

### **Состав системы подмагничивания**

Структурная схема системы подмагничивания УПШР приведена на рисунке 1.

Основными компонентами системы подмагничивания являются:

1. Трансформаторно-преобразовательные блоки (один или несколько), состоящие из трансформаторов и полупроводниковых преобразователей. Эти блоки подсоединяются к обмотке управления и питаются от сети собственных нужд подстанции или от компенсационной обмотки УПШР. Трансформаторно-преобразовательные блоки обеспечивают протекание по обмотке управления УПШР выпрямленного тока, значение которого определяет состояние магнитной системы электромагнитной части реактора.
2. Система автоматического управления САУ, генерирующая сигналы управления полупроводниковыми преобразователями в соответствии с заданными алгоритмами. Она может осуществлять управление с целью поддержания заданного напряжения в точке подсоединения УПШР (регулирование по напряжению) или поддержания заданной реактивной мощности, потребляемой УПШР (регулирование по току потребления).
3. Датчики постоянного тока и напряжения, обеспечивающие измерение выходных параметров полупроводниковых преобразователей.

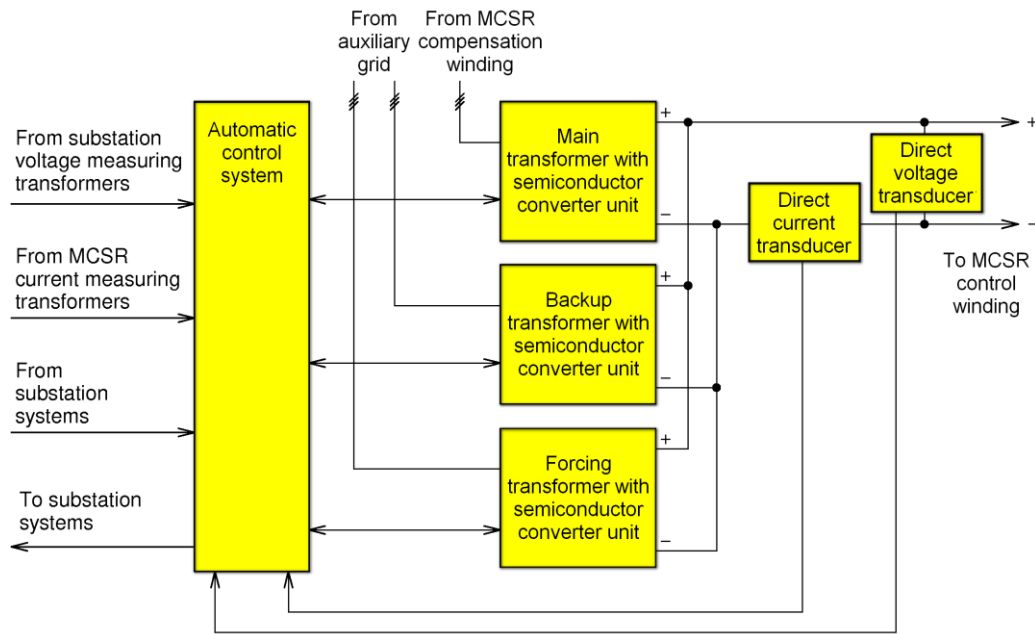


Рисунок 1 – Структурная схема системы подмагничивания УПШР

### Преобразовательные блоки

Основной и резервный преобразовательные блоки обеспечивают плавное изменение реактивной мощности, потребляемой УПШР, в основных режимах работы. При этом, в серийно выпускаемых ПАО «Запорожтрансформатор» УПШР различных напряжений и мощностей, обеспечивается изменение мощности УПШР от 5 % до 100 % и обратно за время, равное 0,7 сек. При применении дополнительного форсировочного преобразователя обеспечивается изменение мощности УПШР от 5 % до 100 % и обратно за время, равное 0,3 сек. В большинстве практических задач такое быстродействие является достаточным. В случае требований повышения быстродействия, рассматриваемые устройства подмагничивания УПШР могут быть модернизированы, что приводит к их удорожанию. Например, для повышения быстродействия в ряде случаев, можно использовать форсировочный преобразователь повышенной мощности.

Основной преобразовательный блок питается от компенсационной обмотки УПШР. Резервный и форсировочный преобразовательные блоки – от сети собственных нужд подстанции 10(6) кВ.

Начальное подмагничивание магнитной системы УПШР (при отключенном от сети реакторе) может осуществляться от резервного или форсировочного преобразовательного блока. В случае необходимости начальное подмагничивание может осуществляться от сети 0,4 кВ при помощи дополнительного маломощного выпрямительного блока.

Трехфазные согласующие трансформаторы преобразовательных блоков номинальной мощностью 1000 кВА обеспечивают понижение напряжения компенсационной обмотки УПШР и сети собственных нужд подстанции до 400 В для питания основного и резервного полупроводниковых преобразователей и до 1100 В для питания форсировочного полупроводникового преобразователя.

Магнитная система и обмотки согласующих трансформаторов размещены в маслонаполненном баке с запорной арматурой для слива и заливки масла, отбора проб масла, присоединения расширителя и газового реле. На крышке бака размещены вводы, коробки зажимов, расширитель с воздухоосушителем. В состав трансформаторов входит

следующее контрольное и защитное оборудование: указатель уровня масла в расширителе, термометр манометрический, газовое реле и предохранительный клапан сброса давления. Охлаждение трансформаторов – естественное, масляное. Габаритные размеры (длина × ширина × высота) – 2210 мм × 1430 мм × 2300 мм. Масса – 3375 кг.

Структурная схема полупроводникового преобразователя преобразовательного блока приведена на рисунке 2. Основными функциональными элементами преобразователя являются управляемый выпрямитель, шкаф сопряжения и ограничители перенапряжения.

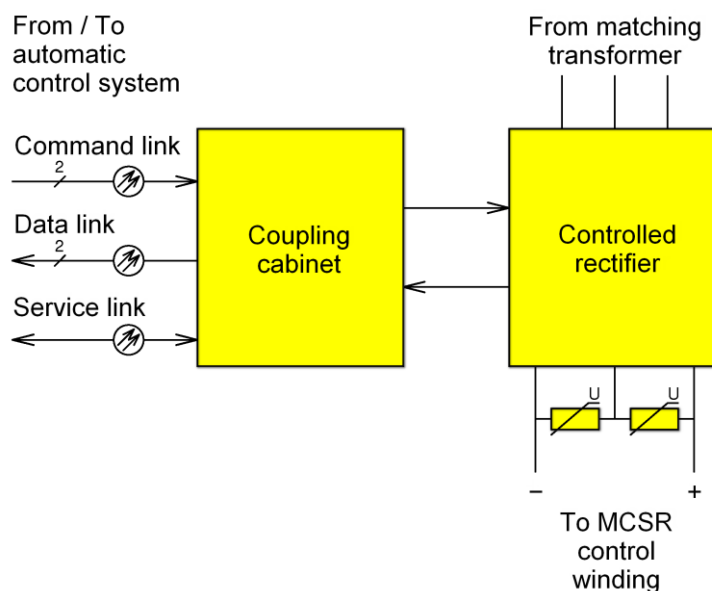


Рисунок 2 – Структурная схема полупроводникового преобразователя

Управляемый выпрямитель (рисунок 3) состоит из трехфазного управляемого тиристорного моста (шесть тиристорных ячеек), шунтирующего вентиля (две тиристорные ячейки), отсекающего диода (одна диодная ячейка) и трех трансформаторов тока.

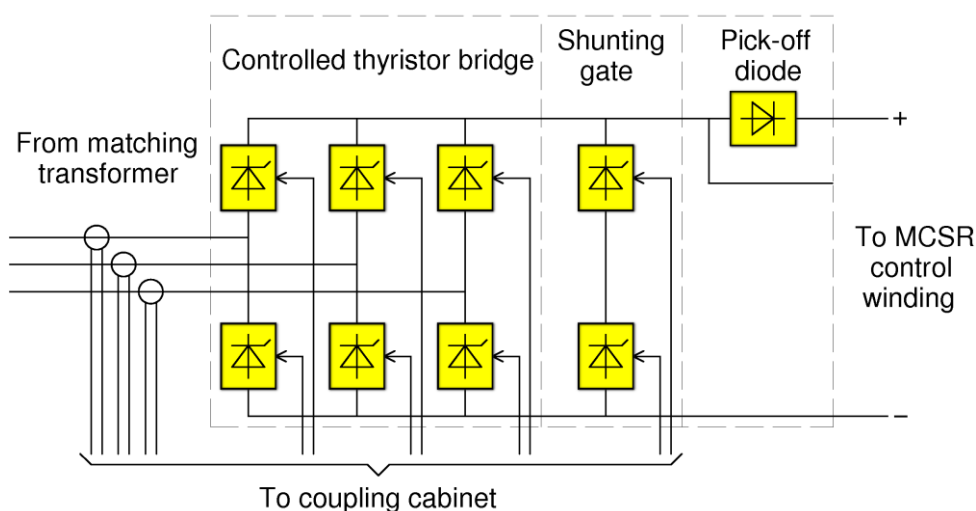


Рисунок 3 – Структурная схема управляемого выпрямителя

В состав каждой тиристорной ячейки входят:

- силовой низкочастотный тиристор таблеточной конструкции;
- импульсный узел, формирующий импульсы управления тиристором в соответствии с рекомендациями изготовителя тиристора;
- демпфирующая RC цепь;
- шунтирующий резистор;
- цепь защиты, обеспечивающая включение тиристора при приложении прямых перенапряжений и ограничение напряжений на нем до безопасного уровня при приложении обратных перенапряжений;
- дроссель насыщения для ограничения скорости нарастания анодного тока при отпирании тиристора.

В состав диодной ячейки входят:

- силовой низкочастотный диод таблеточной конструкции;
- демпфирующая RC цепь;
- шунтирующий резистор;
- цепь защиты, обеспечивающая ограничение перенапряжений на диоде до безопасного уровня.

Номинальный выпрямленный ток управляемого выпрямителя 2000 А. Максимальное выпрямленное напряжение в режиме холостого хода выпрямителей основного и резервного преобразовательных блоков 540 В, выпрямителя форсировочного преобразовательного блока 1485 В.

Силовые полупроводниковые приборы управляемого выпрямителя (тиристоры, диод) располагаются на двухсторонних цельнометаллических охладителях. Управляемый выпрямитель размещен в маслonaполненном баке с запорной арматурой для слива и заливки масла, отбора проб масла, присоединения расширителя и газового реле. На крышке бака размещены вводы, коробки зажимов, расширитель с воздухоосушителем. В состав управляемого выпрямителя входит следующее контрольное и защитное оборудование: указатель уровня масла в расширителе, термометр манометрический, газовое реле и предохранительный клапан сброса давления. Охлаждение управляемого выпрямителя – естественное, масляное.

Шкаф сопряжения полупроводникового преобразователя (рисунок 4) предназначен для:

- приема команд управления от системы автоматического управления;
- формирования сигналов управления тиристорами выпрямителя;
- сбора и передачи в систему автоматического управления данных состояния преобразователя (температура верхних слоев масла в баке выпрямителя, токи во входных шинах преобразователя);
- организации быстродействующей защиты тиристорov при коротком замыкании на выходе преобразователя.

Обмен информацией между шкафом сопряжения полупроводникового преобразователя и удаленной системой автоматического управления производится по дублированным волоконно-оптическим линиям связи (командной и информационной). Это позволяет повысить помехоустойчивость и надежность системы подмагничивания УПШР. Шкаф сопряжения размещается на наружной стенке бака полупроводникового преобразователя. Шкаф сопряжения оборудован системой климат-контроля.

На крышке бака полупроводникового преобразователя размещаются нелинейные ограничители перенапряжения, предназначенные для защиты полупроводникового

преобразователя от коммутационны перенапряжений со стороны обмотки управления УПШР.

Габаритные размеры полупроводникового преобразователя (длина × ширина × высота) – 2680 мм × 1430 мм × 2300 мм. Масса – 2500 кг.

Преобразовательный блок конструктивно выполнен виде металлической рамы с закрепленными на ней согласующим трансформатором и полупроводниковым преобразователем, соединенными системой шин (рисунок 5). Габаритные размеры преобразовательного блока (длина × ширина × высота) – 3145 мм × 2680 мм × 2450 мм. Масса – 6300 кг.



Рисунок 4 – Шкаф сопряжения полупроводникового преобразователя



Рисунок 5 – Преобразовательный блок на подстанции

### **Система автоматического управления**

Система автоматического управления (САУ) предназначена для формирования команд управления полупроводниковыми преобразователями преобразовательных блоков, в зависимости от заданного режима работы и сигналов состояния оборудования УПШР и подстанции.

САУ обеспечивает следующие режимы работы УПШР:

- начальное подмагничивание;
- автоматическое поддержание заданного напряжения в точке подсоединения УПШР (регулирование по напряжению);

- автоматическое поддержание заданной реактивной мощности, потребляемой УПШР (регулирование по току потребления);
- форсированный набор мощности УПШР,
- форсированный сброс мощности УПШР,
- ручное регулирование тока, потребляемого УПШР;
- холостой ход.

В состав САУ входят:

- устройство нормализации сигналов,
- органы управления и индикации,
- устройство регулирования и контроля,
- формирователи контактных сигналов,
- коммуникационное оборудование,
- оборудование электропитания.

**Устройство нормализации сигналов** предназначено для преобразования входных аналоговых сигналов от измерительных трансформаторов напряжения подстанции (номинальное действующее значение 100 В), измерительных трансформаторов тока УПШР (номинальное действующее значение 1 А или 5 А), датчика постоянного тока (номинальное значение  $\pm 400$  мА) и датчика постоянного напряжения (номинальное значение  $\pm 50$  мА) в напряжение в диапазоне  $\pm 10$  В, а также для преобразования входных контактных сигналов от оборудования подстанции (состояния выключателей и устройств защиты) в логические потенциальные сигналы.

**Органы управления и индикации** предназначены для управления работой САУ, а также вывода на экран информации о состоянии оборудования УПШР. Органы управления и индикации включают в себя панель оператора, выполненную на базе панельного компьютера с сенсорным устройством ввода данных, и формирователи команд (переключатели) ПУСК/СТОП и МЕСТ/ДИСТ. Панель оператора состоит из экрана УПРАВЛЕНИЕ, содержащего группы виртуальных органов управления и индикации (рисунок 6) и экрана СОСТОЯНИЕ, содержащего группы виртуальных органов индикации (рисунок 7).



Рисунок 6 – Экран УПРАВЛЕНИЕ



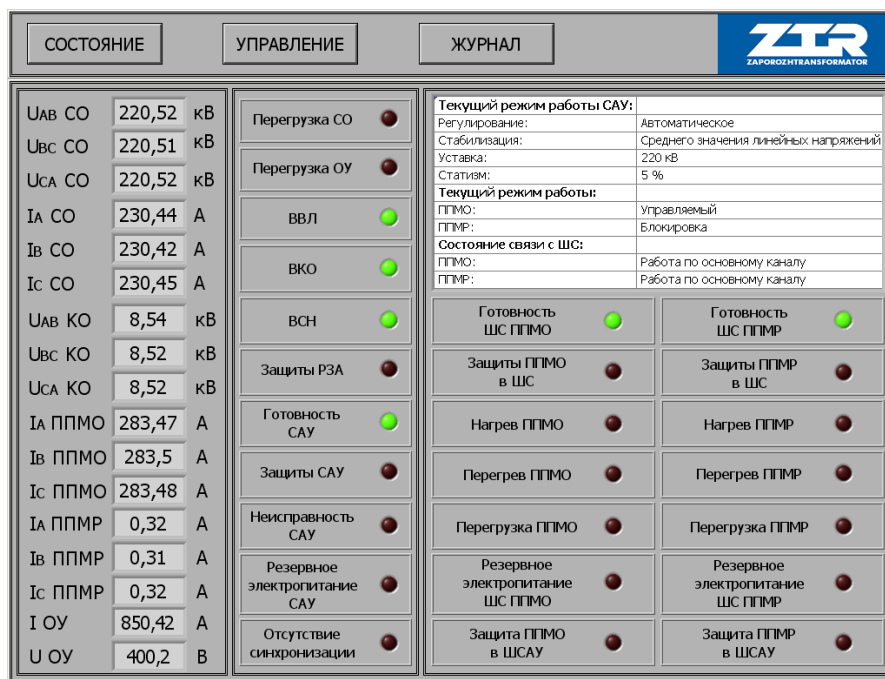


Рисунок 7 – Экран СОСТОЯНИЕ

**Устройство регулирования и контроля** предназначено для аппаратно – программной реализации алгоритмов работы САУ. Она выполнена на базе промышленного контроллера реального времени, программируемой логики и модулей ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов.

В устройстве регулирования и контроля обеспечивается выполнение следующих четырех групп функций.

1. Формирование логических потенциальных сигналов готовности УПШР к подключению к сети, неисправности САУ и срабатывания защит САУ. Сигналы выводятся в формирователи контактных сигналов. Устройство регулирования и контроля обеспечивает также местное и дистанционное управление УПШР. Выбор осуществляется с помощью формирователя команды МЕСТ/ДИСТ. В режиме местного управления данные (значения уставок регулирования и признаков режима работы УПШР) в САУ вводит оператор с помощью экрана «Управление» панели оператора. В режиме дистанционного управления данные в САУ вводятся от системы управления подстанции.

2. Формирование команд управления для обеспечения работы каждого преобразовательного блока в управляемом, диодном, шунтирующем режиме или режиме блокировки. Команды выдаются через интерфейс RS-485 в коммуникационное оборудование САУ по резервированным линиям. Моменты времени для вывода команд определяются относительно напряжений синхронизации (от измерительных трансформаторов напряжения подстанции) с учетом вычисленных углов управления тиристорами преобразователей в соответствии с алгоритмами работы САУ.

3. Определение и обработку сигналов аварийных режимов:

- отсутствие напряжения синхронизации;
- нагрев полупроводникового преобразователя (срабатывание первой ступени термометра преобразователя);
- перегрев полупроводникового преобразователя (срабатывание второй ступени термометра преобразователя);

- перегрузка полупроводникового преобразователя (среднеквадратическое значение фазных токов преобразователя превышает допустимое значение, регулируемое в пределах 100÷150 % от номинального значения);
- защита полупроводникового преобразователя (среднеквадратическое значение фазных токов преобразователя превышает допустимое значение, регулируемое в пределах 150÷200 % от номинального значения);
- перегрузка сетевой обмотки УПШР по току;
- перегрузка обмотки управления УПШР по току;
- отсутствие подтверждения успешного прохождения команды САУ до преобразовательного блока;
- сигнал срабатывания защиты от системы релейной защиты подстанции.

4. Определение и обработку сигналов режима остановки САУ. Выбор осуществляется с помощью формирователя команды ПУСК/СТОП. В режиме останова формируются команды управления полупроводниковыми преобразователями блокирующими импульсы управления тиристорами.

**Формирователи контактных сигналов** предназначены для преобразования логических потенциальных сигналов готовности, неисправности и срабатывания защит в контактные сигналы, передаваемые в системы подстанции.

**Коммуникационное оборудование САУ** включает коммутатор Ethernet и оптические медиаконвертеры.

Коммутатор Ethernet предназначен для организации локальной сети между панельным компьютером САУ, панелью устройства регулирования и контроля САУ, а также шкафами сопряжения полупроводниковых преобразователей. Сеть предназначена для штатного обмена данными между панельным компьютером САУ и панелью устройства регулирования и контроля САУ, а также для удаленного подключения технологического оборудования к шкафам сопряжения полупроводниковых преобразователей с целью установки и отладки программного обеспечения.

Оптические медиаконвертеры предназначены для организации дублированных волоконно-оптических командных линий и линий данных между САУ и шкафами сопряжения полупроводниковых преобразователей.

**Оборудование электропитания САУ** включает реле контроля напряжения электропитания и источники вторичного электропитания оборудования САУ.

Электропитание САУ осуществляется от сети переменного тока напряжением (187÷242) В и частотой (48÷52) Гц. Предусмотрена возможность автоматического перехода на электропитание от сети постоянного тока напряжением (178÷242) В при отклонении напряжения сети переменного тока свыше допустимых пределов. Для измерения напряжения сети переменного тока и автоматического перевода САУ на электропитание от сети постоянного тока служит реле контроля напряжения электропитания. Потребляемая мощность САУ не более 300 Вт.

### **Конструкция САУ**

Конструктивно САУ представляет собой электротехнический шкаф двухстороннего обслуживания с прозрачной передней дверцей (рисунок 8) и размещенной в нем электронной аппаратурой.

Габаритные размеры САУ (длина × ширина × высота) – 600 мм × 800 мм × 2200 мм. Масса – 2500 кг. Габаритные размеры САУ могут быть изменены по требованию заказчика.



## Программное обеспечение системы подмагничивания УПШР

Программное обеспечение системы подмагничивания УПШР включает в себя:

- программное обеспечение САУ;
- программное обеспечение основного преобразовательного блока;
- программное обеспечение резервного преобразовательного блока;
- программное обеспечение форсировочного преобразовательного блока.



Рисунок 8 – Внешний вид САУ

Программное обеспечение САУ предназначено для:

- организации человеко-машинного интерфейса;
- ручного ввода данных с помощью сенсорной панели;
- вывода данных на экран дисплея в графическом формате;
- ввода данных от оборудования УПШР и систем подстанции;
- передачи данных в системы подстанции;
- аппаратно-программной реализации алгоритмов работы УПШР;
- определения аварийных режимов работы;
- формирования команд управления тиристорами преобразовательных блоков;
- контроля переключения резерва командных и информационных линий;
- контроля переключения резерва преобразовательных блоков.

Программное обеспечение преобразовательных блоков предназначено для:

- приема команд управления тиристорами полупроводникового преобразователя;
- формирования сигналов управления тиристорами полупроводникового преобразователя;
- приема сигналов датчиков полупроводникового преобразователя;
- формирования данных состояния полупроводникового преобразователя;
- реализации быстродействующей защиты полупроводникового преобразователя.

## Функционирование системы подмагничивания УПШР

Перед подключением УПШР к сети система подмагничивания переводит УПШР в режим начального подмагничивания. При этом САУ формирует и передает в резервный или форсировочный преобразовательный блок команды перевода его полупроводникового

преобразователя в управляемый режим и отпираания тиристоров с углом, соответствующим протеканию в обмотке управления УПШР тока начального подмагничивания. Остальные преобразовательные блоки переводятся в режим блокировки.

После достижения током начального подмагничивания, контролируемого датчиком постоянного тока, необходимого уровня система подмагничивания УПШР формирует и передает в системы подстанции сигнал готовности УПШР к подключению к сети.

После подключения УПШР к сети система подмагничивания переводит УПШР в режим, предварительно выбранный оператором. При этом САУ переводит в управляемый режим полупроводниковый преобразователь основного преобразовательного блока.

В автоматических режимах угол управления тиристорами полупроводниковых преобразователей вычисляется в САУ в соответствии с законом управления. В ручном режиме – задается оператором. В режимах форсированного набора/сброса мощности САУ формирует команды, переводящие форсировочный преобразовательный блок в управляемый режим с фиксированными углами управления тиристорами. По окончании форсированного набора/сброса мощности САУ переводит в управляемый режим полупроводниковый преобразователь основного преобразовательного блока.

В аварийных режимах, связанных с неполадками в основном преобразовательном блоке (перегрев, превышение тока потребления по фазам, срабатывание быстродействующей защиты) САУ переводит в управляемый режим полупроводниковый преобразователь резервного преобразовательного блока.

В аварийных режимах, связанных с выходом за допустимые пределы измеряемых величин (отсутствие напряжения синхронизации, перегрузка по току сетевой обмотки или обмотки управления УПШР) САУ переводит преобразовательные блоки в шунтирующий режим.

### **Результаты испытаний системы подмагничивания УПШР**

На испытательных станциях ПАО «Запорожтрансформатор» были проведены автономные приемо-сдаточные, и типовые испытания оборудования системы подмагничивания УПШР, а также специальные совместные испытания оборудования системы подмагничивания УПШР с электромагнитными частями УПШР.

Объем приемо-сдаточных испытаний преобразовательных блоков:

- проверка на соответствие требованиям рабочих чертежей;
- проверка на герметичность бака;
- проверка сопротивления изоляции;
- испытание изоляции приложенным напряжением.

Объем типовых испытаний преобразовательных блоков:

- контроль формы импульсов управления;
- проверка функционирования при номинальном напряжении;
- проверка функционирования при номинальном токе;
- испытания на нагрев.

Объем приемо-сдаточных испытаний САУ:

- проверка на соответствие требованиям рабочих чертежей;
- проверка функционирования каналов измерения;
- проверка функционирования каналов управления;

- проверка сопротивления изоляции электрически разобщенных цепей.

Объем типовых испытаний САУ:

- проверка алгоритмов и программного обеспечения системы.

Кроме того, были проведены испытания САУ на электромагнитную совместимость в специальной независимой аккредитованной метрологической лаборатории.

Все вышеуказанные испытания подтвердили соответствие параметров оборудования системы подмагничивания УПШР заданным значениям. Для примера, на рисунках 9, 10, 11 и 12, показаны некоторые результаты измерений при этих испытаниях для УПШР 100 МВАр 220 кВ.



Рисунок 9 – Осциллограмма фазировки полупроводникового преобразователя. Импульс управления тиристором совпадает по фазе с переходом через «0» напряжения «С–А» из «+» в «–»

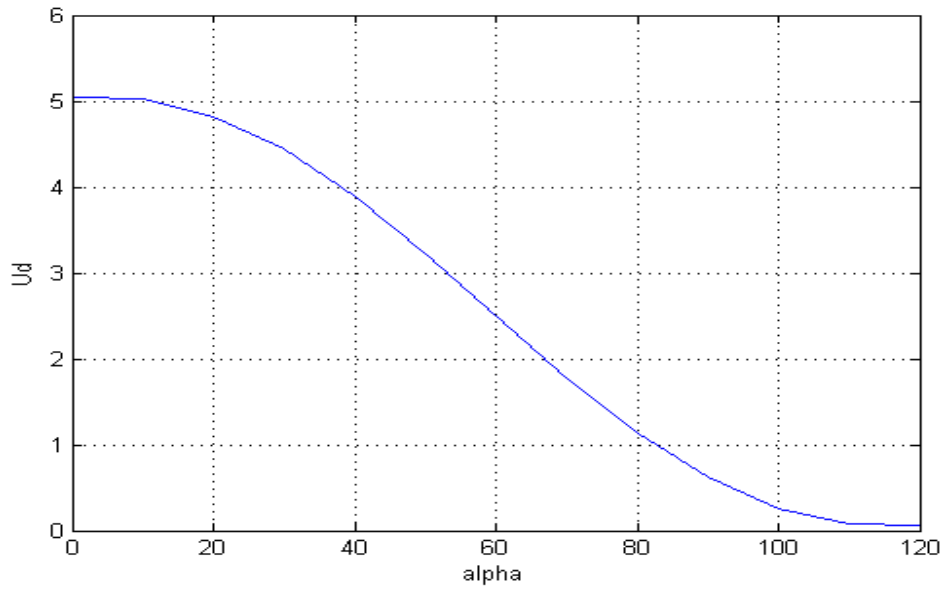


Рисунок 10 – Регулировочная характеристика полупроводникового преобразователя  $U_d = f(\alpha)$  на выходе устройства нормализации сигналов САУ без косинусоидальной коррекции

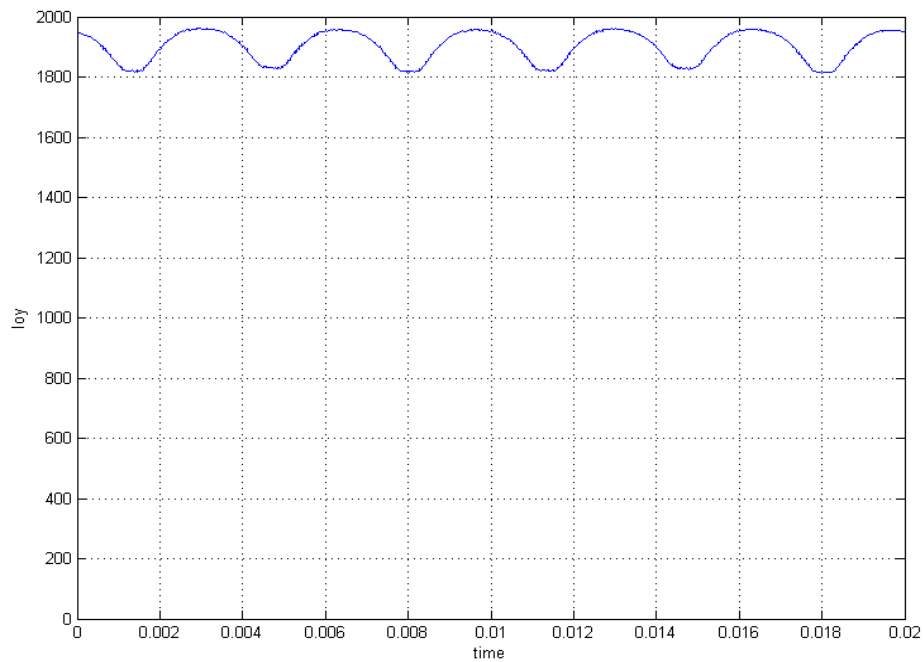


Рисунок 11 – Ток обмотки управления УПШР в режиме потребления номинальной мощности

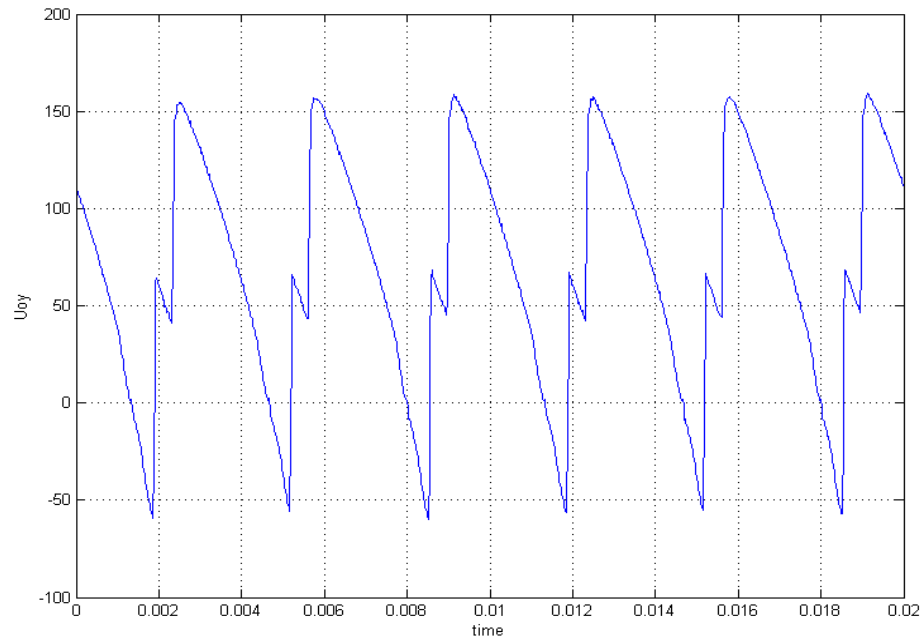


Рисунок 12 – Напряжение обмотки управления УПШР в режиме потребления номинально мощности.

*© Copyright 2014 ПАО «Запорожтрансформатор». Документ, или его части, не может копироваться, распространяться или использоваться иным образом без предварительного письменного согласия ПАО «Запорожтрансформатор».*