

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТИРИСТОРНЫХ ВЕНТИЛЕЙ СТАТИЧЕСКИХ VAR КОМПЕНСАТОРОВ

А.Л. Шитов<sup>1</sup>, А.Н. Буров<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> ЧАО “Завод ”Преобразователь”,

ул. Днепровское шоссе, 9, Запорожье, 69069, Украина,

e-mail: [shashy@ukr.net](mailto:shashy@ukr.net)

<sup>2</sup> ЧАО “Запорожтрансформатор”,

ул. Днепровское шоссе, 3, Запорожье, 69600, Украина,

e-mail: [o.m.burov@i.ua](mailto:o.m.burov@i.ua)

*Рассмотрена работа специализированного стенда с улучшенными технико-экономическими характеристиками для эквивалентных испытаний симметрично управляемых тиристорных вентилях, используемых в статических VAr компенсаторах. Силовая часть стенда оснащена традиционным низковольтным токовым контуром и энергоэффективным высоковольтным колебательным контуром, выполненным в виде последовательного резонансного инвертора по полумостовой схеме. На основе анализа структурной схемы стенда и схем замещения его контуров с испытуемым вентилях получены аналитические выражения для описания электромагнитных процессов, протекающих в контурах, определены параметры стенда, необходимые для проведения испытаний вентилях в эквивалентном режиме и выявлены оптимальные алгоритмы управления стендом. Разработаны рекомендации по испытанию вентилях тиристорно-управляемых реакторов и приведены результаты натурных исследований при заданных параметрах вентилях и стенда. Библи. 6, рис. 5.*

**Ключевые слова:** испытательный стенд, тиристорный вентиль, последовательный резонансный инвертор, тиристорно-управляемый реактор.

**Введение.** Статические VAr компенсаторы (SVC), проектируемые для электрических сетей промышленных предприятий и энергосистем, традиционно комплектуются тиристорно-коммутируемыми конденсаторами (TSC) или реакторами (TSR), тиристорно-управляемыми реакторами (TCR) и другим оборудованием для компенсации реактивной мощности, в котором проводимость ёмкостных и индуктивных компонентов регулируется дискретно или плавно тиристорными вентилями. Последние являются основными и наиболее сложными компонентами оборудования, выход из строя которых приводит к частичному или полному отказу SVC, что в итоге отрицательно влияет на качество электроэнергии сети и может привести к ущербу, вызванному перерывами в электроснабжении.

Для сетей высокого напряжения вентилях выполняются в виде последовательно соединённых тиристорных ступеней. Каждая ступень содержит симметричный тиристор или два встречно параллельно включенных тиристора, RC-снаббер для демпфирования коммутационных перенапряжений, драйверы для управления и защиты тиристоров, охладители и т. д. Ограничение скорости нарастания тока  $di_T/dt$  через тиристоры обеспечивается дросселями насыщения.

Создание данных вентилях является непростой задачей, главным образом, из-за их конструктивных особенностей. Компановка большого количества тиристоров и защитных цепей, выделяющих тепло, в сборку, имеющую высоковольтные потенциалы разной величины, требует применения малогабаритных охладителей с мощными прижимными устройствами, изоляционных деталей и узлов с высокой механической и электрической прочностью и др. Требуются эффективные средства подготовки хладагента (воздуха, воды и др.) по температуре и электрической прочности до рабочего уровня, доставки хладагента к тиристорам, резисторам RC-снабберов и дросселям насыщения для их охлаждения и последующего его отвода и т.д.

Можно считать, что тиристорные вентилях разработаны на высоком техническом уровне и обладают достаточной надёжностью, если их проектные параметры соответствуют заданным и подтверждаются, например, типовыми, заводскими (приёмо-сдаточными) и выборочными испытаниями, осуществляемыми согласно рекомендациям международной электротехнической комиссии [1].

Эксплуатационные типовые и выборочные испытания, проводимые при непрерывной максимальной рабочей нагрузке, кратковременной предельно допустимой перегрузке и аварийных воздействиях тока и напряжения, являются основными при оценке надёжности работы вентилях. Для проведения таких испытаний необходимы стенды, которые обеспечивают напряжение на вентилях и

ток через них, идентичные условиям эксплуатации, а также своевременные отключения вентилях при возникновении в них неисправностей для исключения значительных аварийных разрушений. Установленная и потребляемая мощности этого оборудования должны быть минимальными, что достигается в большей мере при структуре стенда с низковольтным токовым и высоковольтным колебательным контурами.

Вопросам эквивалентных испытаний тиристорных вентилях SVC посвящены работы [2-4] и др., в которых описаны схемы стендов с высоковольтным колебательным контуром, выполненным в виде LC-цепи, коммутируемой тиристорным вентилях. Однако технические характеристики этих стендов не полностью отвечают вышеуказанным требованиям. Не обеспечивается симметричная загрузка по напряжению и току испытуемого вентиля в двух направлениях его проводимости. Для высоковольтного колебательного контура необходим источник питания, выполненный на полное напряжение испытуемого вентиля, что обуславливает дополнительные материальные затраты при реализации стенда и энергетические потери при его работе. Временной диапазон для коммутаций испытуемого вентиля ограничен из-за того, что процесс подзаряда конденсаторной батареи колебательного контура должен быть разнесён по времени с запасом относительно окончания предыдущего и начала последующего процессов колебаний контура для исключения сбоев в работе стенда.

Вышеуказанные недостатки для схем [2-4] исключаются, если высоковольтный колебательный контур выполнить в виде последовательного резонансного инвертора [5]. Такой инвертор способен повышать напряжение на испытуемом вентилях относительно питающего напряжения, обладает работоспособностью и свойством самоограничения тока при коротких замыканиях. Симметричная работа инвертора на положительных и отрицательных полярностях напряжения и тока эффективно сочетается с симметричным отпиранием вентилях SVC. Подзаряд конденсаторной батареи колебательного контура осуществляется от двухполярного источника питания низкого напряжения в процессе её перезаряда на обеих полярностях без сбоев и не требуют каких-либо ограничений по времени. При этом реализация стенда упрощается.

**Цель данной работы** – выявление особенностей работы специализированного стенда для эквивалентных испытаний симметрично управляемых вентилях, анализ электромагнитных процессов в силовых цепях стенда для поиска эффективных алгоритмов его управления и разработки рекомендаций по оптимальному параметрированию силовых цепей и системы управления.

**Материалы исследования.** На рис. 1, а показана схема эквивалентных испытаний тиристорного вентиля  $VST$ , являющегося общей нагрузкой для высоковольтного колебательного контура  $HVC$  и низковольтного токового контура  $LVC$ .

Контур  $HVC$  выполнен на основе полумостового резонансного инвертора, в котором напряжения  $u_p$  и  $u_N$  конденсаторных батарей  $C1$  и  $C2$  переключаются с помощью тиристорных вентилях  $VS3$  и  $VS4$  на последовательно соединённые защитный реактор  $L2$  или  $L3$ , конденсаторную батарею  $CB$ , реакторную батарею  $RB$  и тиристорные вентилях  $VS5$  и  $VST$ . При отпирании вентилях  $VS5$  и  $VST$  между ёмкостью  $C_V = C_{CB}C_F / (C_{CB} + C_F)$  и индуктивностью  $L_V = L_p + L_{RB}$  контура  $HVC$  осуществляются колебания тока и напряжения. Здесь  $C_{CB}$  и  $C_F$  – ёмкости конденсаторных батарей соответственно  $CB$  и  $C1$  или  $C2$ ;  $L_p$  и  $L_{RB}$  – индуктивности защитного реактора  $L2$  или  $L3$  и реакторной батареи  $RB$  соответственно;  $C_{CB} \ll C_F$  и  $L_p \ll L_{RB}$ . Амплитуда этих колебаний регулируется автотрансформатором  $T1$ , заряжающим через диодные вентилях  $VD1$  и  $VD2$  конденсаторные батареи  $C1$  и  $C2$  до напряжений соответственно  $+U_F$  и  $-U_F$  перед каждым циклом коммутаций.

В инверторе обратные диоды тиристорных вентилях  $VS3$  и  $VS4$  не влияют на процесс накопления энергии в конденсаторной батарее  $CB$ , так как её разряд после каждого коммутационного цикла блокируется тиристорными вентилями  $VST$  и  $VS5$ , к которым прикладывается основное напряжение контура  $HVC$ . Работа инвертора физически аналогична работе последовательного резонансного инвертора без обратных диодов.

Основная токовая загрузка испытуемого вентиля  $VST$  обеспечивается контуром  $LVC$ , в котором трансформатор  $T3$  через токоограничивающий реактор  $L1$  формирует импульсы тока  $i_C$  при включении разделительного вентиля  $VS2$ . Вторичная обмотка трансформатора  $T3$  выполнена низковольтной на ток 5 кА. Контур же  $HVC$  создаёт небольшой ток  $i_V$ . Значительная часть мощности, потребляемой контурами  $HVC$  и  $LVC$ , является реактивной и компенсируется SVC.

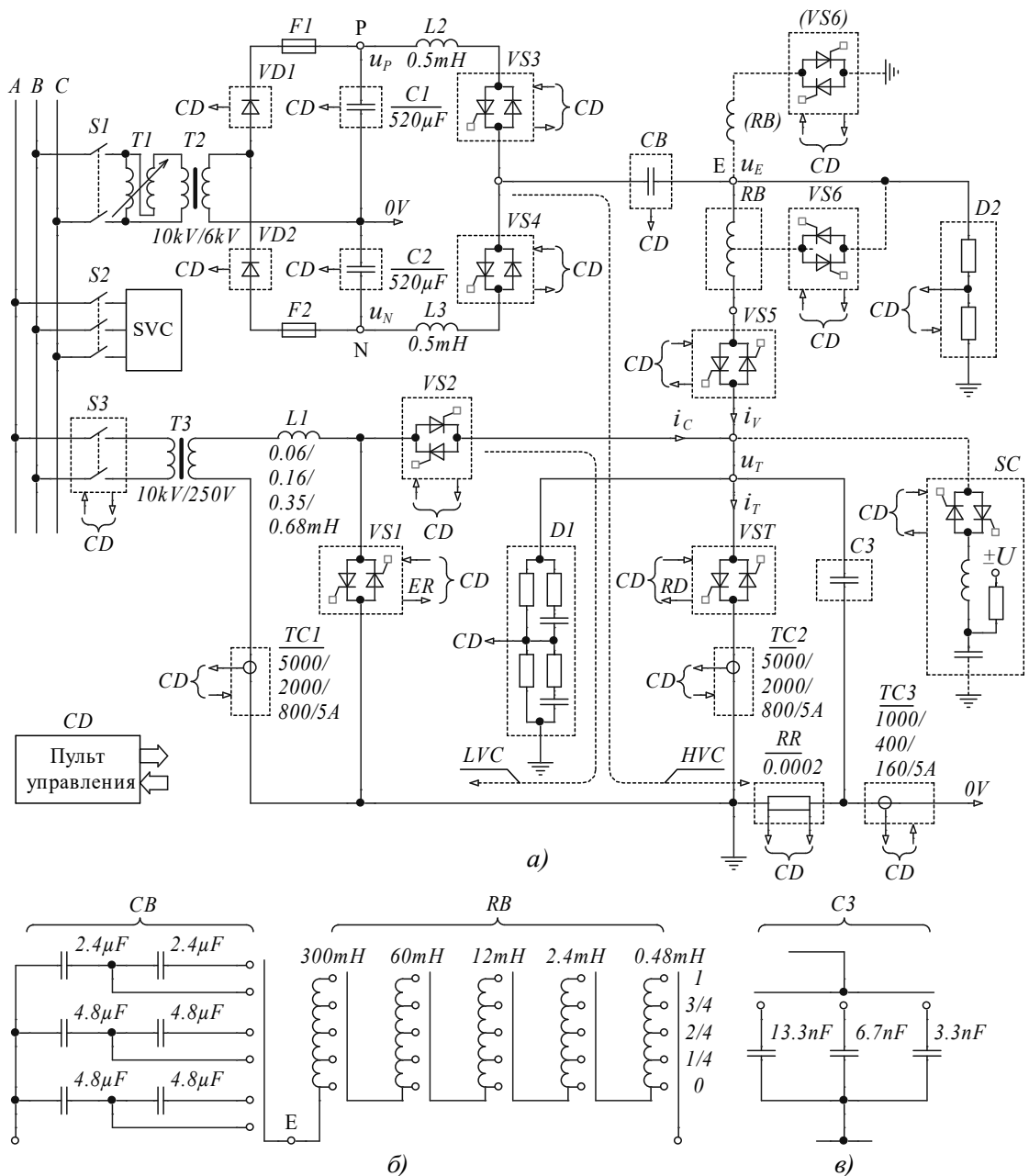


Рис.1

Для отпирания тиристоров вентилей  $VS1 - VS6$  и ударной цепи  $SC$  применены драйверы, питание которых осуществляется от трансформаторов тока с продетым через их сердечники высоковольтным кабелем. Необходимый ток кабеля задаётся специальным реактором под действием гармонического напряжения от изолирующего трансформатора. Параллельно выходу этого трансформатора включен конденсатор для компенсации индуктивной составляющей тока. В вентилях  $VS2, VS5, VS6$  и ударной цепи  $SC$  жила кабеля соединена с общей точкой соединения двух частей вентиля, имеющей электрический потенциал средней величины, для снижения воздействующего напряжения на кабель. Для этих вентилей изолирующие трансформаторы выполнены на рабочее напряжение изоляции  $72\text{ kV}$  в корпусе от стандартных трансформаторов тока. Для вентилей  $VS1, VS3$  и  $VS4$  использован единый заземлённый высоковольтный кабель и общий низковольтный изолирующий трансформатор.

Все драйверы имеют пороговые элементы для формирования сигналов готовности при наличии питания на них и допустимых напряжениях на тиристорах. Пороговые элементы, используемые в защитных цепях диодных вентилей  $VD1, VD2$  и конденсаторных батарей  $C1, C2$  и  $CB$ , формируют сигналы ошибки при недопустимых на них напряжениях. Запуск драйверов от пульта управ-

ления  $CD$  обеспечивается при наличии на  $CD$  всех сигналов готовности и отсутствии сигналов ошибки. Передача сигналов запуска, готовности и ошибки осуществляется через световоды.

Ограничение коммутационных перенапряжений на диодах и тиристорах вентилей стенда осуществляют RC-снабберы и варисторы. Вспомогательный вентиль  $VSI$ , имеющий одну тиристорную ступень, дополнительно снабжён защитой от перенапряжений, выполненной на BOD модуле (Break Over Diode), включенном между управляющими выводами тиристорov. В случае сбоя управления вентилей  $VS2$ ,  $VS5$  и  $VST$  высокое напряжение контура  $HVC$  шунтируется вентилем  $VSI$  и не попадает на низковольтные элементы контура  $LVC$ . Оптопередатчик, включенный в цепи BOD модуля, формирует сигнал ошибки  $ER$  на пульт  $CD$ , который прекращает управление всеми вентилями и сигналом  $OFF$  отключает выключатель  $S3$  трансформатора  $T3$ .

Тиристоры вентилей  $SVC$  на напряжение 20 kV и более обычно комплектуются драйверами, энергия для питания которых отбирается от силовых цепей тиристорov. При испытании таких вентилей первоначальный запуск контура  $HVC$  осуществляют через вентили  $VS2$  и  $VSI$  контура  $LVC$  при обесточенном с помощью выключателя  $S3$  трансформаторе  $T3$ . Когда колебания напряжения на вентилей  $VS2$  и  $VSI$  и, следовательно, на испытуемом вентиле  $VST$  достигают величины, достаточной для питания драйверов, последние выдают сигнал готовности  $RD$  на пульт  $CD$ , который снимает с вентилей  $VSI$ ,  $VS2$  и одновременно подаёт на вентиль  $VST$  импульсы управления для продолжения работы контура  $HVC$ . Причём разделительный вентиль  $VS2$  мало влияет на процессы коммутации контура  $HVC$ , поскольку величина ёмкости последовательно соединённых его RC-снабберов значительно меньше, чем у вентилей  $VST$ . После подачи напряжения сети  $u_{AB}$  на трансформатор  $T3$  выключателем  $S3$  контур  $LVC$  готов к работе.

Одновременная работа контуров  $HVC$  и  $LVC$  в установившемся режиме при оптимальном (с точки зрения авторов) алгоритме управления вентилями иллюстрируется диаграммами тока и напряжения на рис. 2. На интервалах времени  $t_3 \div t_8$ ,  $t_9 \div t_{14}$ , ... через испытуемый вентиль  $VST$  протекают полуволны тока  $i_T = i_C + i_V$ , а на интервалах времени  $(t_2 + \Delta t) \div t_3$ ,  $(t_8 + \Delta t) \div t_9$ , ... к этому вентилю прикладываются полуволны напряжения  $u_T$ .

Ток  $i_C$  контура  $LVC$  (рис. 2) в зависимости от угла  $\alpha$  управления вентилем  $VS2$ , включаемого синхронно с вентилем  $VST$  (задержка  $t_D \approx 50 \mu s$ ), можно определить на интервале  $(t_0 + \alpha/\omega) \div (t_0 + (\alpha + \sigma)/\omega)$ , где  $\omega$  – угловая частота сети, считая  $t_0 = 0$ , и распространить на другие интервалы проводимости

$$i_C = \frac{V_C}{R_C}(\xi - 1) + \frac{U_{m3}}{R_C^2 + \omega^2 L_C^2} [R_C \sin \omega t - \omega L_C \cos \omega t + (\omega L_C \cos \alpha - R_C \sin \alpha)\xi], \quad (1)$$

где  $V_C = V_{TO2}n_2 + V_{TOT}n_T$ ,  $R_C = R_{T3} + R_{R1} + r_{T2}n_2 + r_{TT}n_T$ ,  $R_{R1} = \omega L_1/q_1$ ,  $L_C = X_{T3}/\omega + L_1$ ,  $\xi = \exp[(\alpha - \omega t)R_C/\omega L_C]$ ;  $V_{TO2}$ ,  $V_{TOT}$ ,  $r_{T2}$ , и  $r_{TT}$  – пороговые напряжения и динамические сопротивления тиристорov вентилей  $VS2$  и  $VST$ ;  $n_2$  и  $n_T$  – количество тиристорных ступеней вентилей  $VS2$  и  $VST$ ;  $U_{m3}$ ,  $R_{T3}$  и  $X_{T3}$  – амплитуда напряжения сети, активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора  $T3$ , приведённые к его вторичной обмотке;  $L_1$  и  $q_1$  – индуктивность реактора  $L1$  и его добротность на частоте сети. Угол управления  $\alpha$  отсчитывается от момента прохождения через ноль напряжения сети  $u_{AB}$ .

Минимальный угол  $\alpha_1$  управления вентилем  $VS2$  контура  $LVC$  определяется из выражения (1) при  $\omega t = \alpha_1 + \pi$  и  $i_C = 0$

$$\alpha_1 = \arcsin \left[ x \sqrt{\frac{1}{1+x^2} - \left( \frac{V_C}{U_{m3}} \tanh \frac{\pi}{2x} \right)^2} - \frac{V_C}{U_{m3}} \tanh \frac{\pi}{2x} \right], \quad (2)$$

где  $x = \omega L_C/R_C$ . При угле  $\alpha_1$  среднее значение тока контура  $LVC$  из (1) и (2) имеет максимум

$$I_{CA} = \frac{U_{m3}x}{\pi R_C} \left\{ \frac{V_C}{U_{m2}} \left( 1 - \frac{\pi}{x} - e^{-\frac{\pi}{x}} \right) + \frac{\cos \alpha_1}{x} + \frac{1}{1+x^2} \left[ \sin \alpha_1 + \frac{\cos \alpha_1}{x} + (\sin \alpha_1 - x \cos \alpha_1) e^{-\frac{\pi}{x}} \right] \right\}.$$

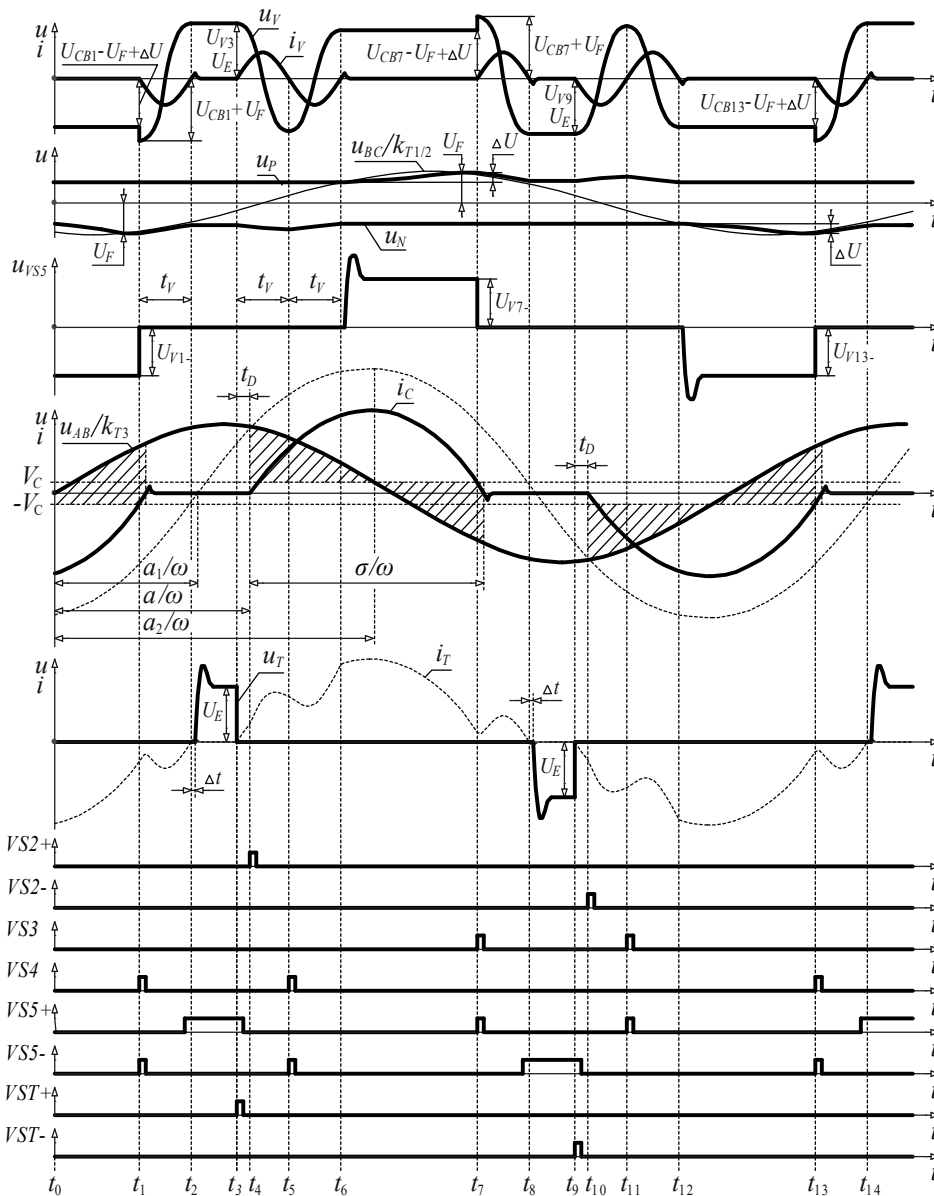


Рис.2

Управление вентилем  $VS2$  контура  $LVC$  осуществляется на интервалах  $(\alpha_{\min} + \pi k) \div (\alpha_{\max} + \pi k)$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Здесь минимальное ограничение угла управления  $\alpha_{\min} \geq \alpha_1 + 0.5\omega(t_V + t_D)$ , где  $t_V$  – длительность полуволны тока  $i_V$  контура  $HVC$ . Максимальное ограничение  $\alpha_{\max}$  угла управления задаётся меньше угла управления  $\alpha_2$ , при котором вторичное напряжение трансформатора  $T3$   $u_{AB}/k_{T3} = V_C$ ;  $\alpha_{\max} < \alpha_2 = \pi - \arcsin V_C/U_{m3}$ , где  $k_{T3}$  – коэффициент трансформации  $T3$ .

Управление вентилями  $VS3 - VS5$  контура  $HVC$  и испытуемого вентиля  $VST$  осуществляется синхронно. Напряжение  $u_V = (u_P \text{ или } u_N) + u_{CB}$  на ёмкости  $C_V$  и ток  $i_V$  контура  $HVC$  при включении этих вентилях на  $k$ -ом интервале проводимости  $t_k \div (t_k + t_V)$  определяются из расчётной схемы рис. 3

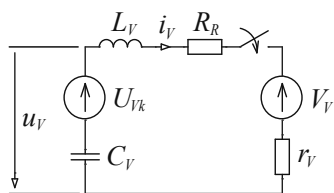


Рис. 3

$$u_V = \frac{u_{V_k}}{U_{V_k}} \left[ V_V + (U_{V_k} - V_V) \exp(-\delta t) \left( \cos \omega_V t + \frac{\delta}{\omega_V} \sin \omega_V t \right) \right]; \quad (3)$$

$$i_V = \frac{u_{V_k}}{U_{V_k}} \frac{U_{V_k} - V_V}{\omega_V L_V} \exp(-\delta t) \sin \omega_V t, \quad (4)$$

где  $\omega_V = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ,  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_V C_V}$ ,  $\delta = R_V / 2L_V$ ,  $t_V = \pi/\omega_V$ ;  $U_{V_k} = |u_{V_k}|$  – модуль напряжения на ёмкости  $C_V$  в момент времени  $t_k$ ;  $V_V \approx V_{TO3/4} n_{3/4} + V_{TO5} n_5 + V_{TOT} n_T m$ ;  $R_V = R_R + r_V$ ,  $R_R \approx \sqrt{\omega \omega_0} \sum_j (L_j / q_j)$ ,  $r_V \approx r_{T3/4} n_{3/4} + r_{T5} n_5 + r_{TT} n_T$ ;  $V_{TO3/4}$ ,  $V_{TO5}$ ,  $r_{T3/4}$  и  $r_{T5}$  – пороговые напряжения и динамические сопротивления тиристоров или диодов вентилях  $VS3/VS4$  и  $VS5$ ;  $n_{3/4}$  и  $n_5$  – количество ступеней в вентилях  $VS3/VS4$  и  $VS5$ ;  $L_j$  и  $q_j$  – индуктивность и добротность  $j$ -го реактора контура  $HVC$  на частоте сети;  $m = 1$  – для первой и третьей полуволн и  $m = -1$  – для второй полуволны тока  $i_V$  на каждом интервале полуволны тока  $i_C$  контура  $LVC$  (рис. 2). Здесь амплитудные значения колебаний напряжения  $u_V$  и тока  $i_V$  определяются модулем напряжения  $U_{V_k}$ , который в установившемся режиме работы контура  $HVC$  для каждого повторяющегося момента времени стабилизируется на уровне, определяемом величиной активных потерь в вентилях и реакторах. При этом напряжение  $u_{CB}$  на конденсаторной батарее  $CB$  в моменты времени  $t_1, t_7, t_{13}, \dots$  (рис. 2) имеет равные модули:  $U_{CB1} = U_{CB7} = U_{CB13} = \dots = U_{CB}$ .

Ниже даны рекомендации по расчёту и выбору параметров контура  $HVC$  стенда с учётом обеспечения эквивалентных воздействий тока и напряжения на вентиль TCR или его секцию.

Индуктивность  $L_V$  устанавливается с дискретностью 0.12 мН путём последовательного соединения соответствующих реакторов батареи  $RB$  (рис. 1, б). Для обеспечения эквивалентной скорости изменения тока через вентиль  $VST$  необходимо, чтобы индуктивность батареи  $RB$   $L_{RB} = L_V - L_P$ , где  $L_V = L_{TCR} n_T / n_{TCR}$ ;  $L_{TCR}$  и  $n_{TCR}$  – индуктивность реактора и количество тиристорных ступеней вентиля  $TCR$ .

Величина ёмкости  $C_V$  контура  $HVC$  зависит от схемы соединения конденсаторной батареи  $CB$  (рис. 1, б), ёмкость  $C_{CB}$  которой устанавливается с дискретностью 1.2 мкФ в диапазоне (2.4÷24) мкФ для напряжений  $U_{CB} \leq 40$  кВ и в диапазоне (1.2÷6) мкФ – для  $U_{CB} \leq 80$  кВ. Здесь  $U_{CB} \geq U_{V_k} + U_F$ . Для надёжного запирающего контуром  $HVC$  тиристоров вентиля  $SV2$  необходимо выполнить условие:  $C_{CB} \geq C_F t_q^2 / (\pi^2 L_V C_F - t_q^2)$ , где  $t_q$  – время выключения тиристоров  $SV2$ .

Ёмкость батареи  $C_3$  (рис. 1, в) для имитации  $di_T/dt$  устанавливается с дискретностью 3.3 нФ в диапазоне (3.3÷23.3) нФ равной  $C_3 = C_{SW} n_{TCR} / n_T$ , где  $C_{SW}$  – паразитная ёмкость оборудования TCR, коммутируемая вентилем.

Напряжение коммутации для испытуемого вентиля или его секции в контуре  $HVC$  и в сети TCR должны быть эквивалентными. Для этого с помощью омического делителя  $D2$ , подключенного к точке E схемы стенда (рис. 1, а), фиксируются мгновенные значения напряжения  $u_E$  в моменты времени  $t_{3-}, t_{9-}, \dots$  (рис. 2). Модули этих значений устанавливаются автотрансформатором  $T1$  равными  $U_E = U_{TCR} K_V = \sqrt{2} U_{W \max} \sin \alpha K_V$ , где  $U_{TCR}$  – напряжение коммутации вентиля TCR в сети с наибольшим рабочим напряжением  $U_{W \max}$ ;  $K_V = 1$  – в случае испытания целого вентиля, при этом шунтируются перемычкой  $n_R$  резервных тиристорных ступеней, и  $K_V = n_T / (n_{TCR} - n_R)$  – при испытании части вентиля (секции). Для оценки этого решения проанализируем процесс выключения вентиля  $VST$ , используя экспоненциальную модель тока обратного восстановления тиристоров (рис. 4, а), как наиболее простую: ток спадает с максимального значения  $I_{RM}$  до нуля по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau$ . Из схемы замещения в операторной форме (рис. 4, б) напряжение на тиристорном вентиле

$$U_T(p) = \frac{(pR_S C_S + 1) [pC_V (\tau U_V + L_V I_{RM}) + C_V U_V - \tau I_{RM}]}{p(p\tau + 1) (p^2 L_V C_V C_S + pR_S C_V C_S + C_V + C_S)} = \frac{M(p)}{N(p)}$$

или

$$u_T = \sum_{k=1}^4 \frac{M(p_k)}{N'(p_k)} \exp(p_k t) = \frac{C_V U_V - \tau I_{RM}}{C_V + C_S} + \sum_{k=2}^4 \frac{M(p_k)}{N'(p_k)} \exp(p_k t), \quad (5)$$

где  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = -\tau^{-1}$ ,  $p_{3,4} = -\frac{R_S}{2L_V} \pm i \sqrt{\frac{C_V + C_S}{L_V C_V C_S} - \frac{R_S^2}{4L_V^2}}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ;  $R_S$  и  $C_S$  – эквивалентные значения

сопротивления и ёмкости последовательно соединённых RC-снабберов вентиля  $VST$ ;  $U_V$  – напряжение коммутации вентиля  $VST$  в контуре  $HVC$ , которое является результирующим воздействием напряжений конденсаторных батарей  $CB$  и  $CI$  или  $C2$  в моменты времени  $t_2 + \Delta t$ ,  $t_8 + \Delta t$ , ...;  $\Delta t = I_{RM} / (di_T/dt)$ . На рис. 4, а  $\tau = Q_{rr} / I_{RM} - I_{RM} / (2 di_T/dt)$ , где заряд  $Q_{rr}$  и амплитуда тока  $I_{RM}$  обратного восстановления являются справочными данными, которые определены при конкретных значениях  $di_T/dt = U_V / L_V$ , температуры полупроводниковой структуры и амплитуды прямого тока тиристора.

По завершению переходного процесса запираания тиристоры вентиля  $VST$  напряжения  $u_T$  и  $u_V$  устанавливаются равными постоянной составляющей выражения (5), которая равна измеренному напряжению  $U_E$ . Поэтому напряжение коммутации вентиля  $VST$  в контуре  $HVC$

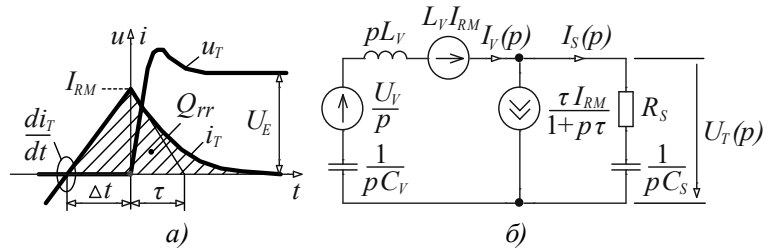


Рис. 4

$$U_V = U_E (1 + C_S / C_V) + \tau I_{RM} / C_V. \quad (6)$$

Поскольку  $U_V > U_E$ , то и  $di_T/dt > U_{TCR} / L_{TCR}$ . Из выражения (6) следует требование к величине ёмкости  $C_V$ . При  $C_V \geq 40C_S$  и  $C_V \geq 0.002\tau I_{RM}$  воздействие напряжения на испытуемый клапан практически эквивалентное и имеет превышение не более 5%, что также подтверждается расчётом переходного процесса по выражению (6). Невыполнение указанных условий ведёт к более жёсткому воздействию на клапан. Это допускается в испытаниях при наличии у клапана дополнительного запаса по напряжению.

В контуре  $HVC$  величина напряжения  $U_E$  в установившемся режиме определяется активными потерями, которые пропорциональны изменению энергии  $\Delta W$  на конденсаторной батарее  $C2$  ( $CI$ ) ёмкостью  $C_F$  при её разряде на  $\Delta U$  в интервалах  $(t_1 \div t_7)$ ,  $(t_7 \div t_{13})$ , ... :  $P_V = 2f\Delta W = f\Delta U [2U_F - \Delta U] C_F$ , где  $f$  – частота сети. Если изменение напряжения  $\Delta U$  приравнять к величине разряда конденсаторной батареи  $C2$  ( $CI$ ) на интервалах  $(t_1 \div t_2)$ ,  $(t_7 \div t_8)$ , ...

$$\Delta U = \frac{1}{C_F} \int_0^{t_r} i_V dt = \frac{C_{CB}}{C_F + C_{CB}} (U_F + U_{CB} - V_V) (1 + \chi),$$

где  $\chi = \exp(-\pi R_V / 2\rho)$ ;  $\rho = \sqrt{L_V / C_V}$  – волновое сопротивление контура  $HVC$  и принять  $U_F + U_{CB} - V_V \approx U_V$ , то необходимое напряжение питания контура  $HVC$

$$U_F = \frac{P_V}{2fU_V} \cdot \frac{C_F + C_{CB}}{C_F C_{CB}} \cdot \frac{1}{1 + \chi} + \frac{U_V}{2} \cdot \frac{C_{CB}}{C_F + C_{CB}} (1 + \chi).$$

Оценим активные потери мощности  $P_V$  в контуре  $HVC$ . Если принять форму полуволн тока в контуре  $HVC$  синусоидальной:  $i_V = (E_V / \rho) \sin \omega_0 t$ , то протекание этого тока вызывает потери мощности в реакторах и вентилях  $P_{RV} \approx 3fC_V E_V (E_V \pi R_V / \rho + 4V_V)$ . При заряде и разряде конденсаторов RC-снабберов клапанов  $VS3$ ,  $VS4$ ,  $VS5$  и  $VST$ , а также в процессе рассеяния энергии, накопленной в индуктивности  $L_V$  при выключениях этих клапанов, активные потери

$$P_{LC} \approx fU_F^2 (C_{S3} + C_{S4}) / 2 + 2fE_V^2 (C_{S5} + C_{ST}) + f(I_{RM}^2 + I_{RM5}^2) L_V.$$

В итоге имеем  $P_V = P_{RV} + P_{LC}$ .

Надёжное функционирование вентиля гарантируется при допустимой температуре полупроводниковых структур его тиристоры, нагрев которых обусловлен статическими потерями  $P_{ST}$ , вызванными током, протекающим через тиристоры во включенном их состоянии, и динамическими потерями  $P_{SW}$ , возникающими при их включении и выключении. Потери  $P_{SW}$  в реальных условиях и испытаниях совпадают достаточно точно, если значения  $E_V$ ,  $L_V$  и  $C_3$  эквивалентны рабочим.

В стенде статические потери тиристоры вентиля  $VST$  определяются по выражению

$$P_{ST} = \frac{1}{T} \int_0^T (|i_T| U_{TO} + i_T^2 r_T) dt, \quad (7)$$

где  $U_{TO}$  и  $r_T$  – пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристоры соответственно. Эти потери сравниваются с заданием  $P_R$ , заранее вычисленным по выражению (7) для каждого режима TCR, и по ошибке  $\Delta P = P_R - P_{ST}$  эти потери стабилизируются на заданном уровне путём регулирования тока  $i_C$  контура  $LVC$  [6].

Таким образом, предложенные в работе алгоритмы управления стендом, базирующиеся на оптимальной логике переключения силовыми ключами контуров  $HVC$  и  $LVC$ , а также способе регулирования тока контура  $LVC$  при условии выполнения рекомендаций по параметрированию стенда, позволяют повысить точность эквивалентных испытаний тиристорных вентилях и не требуют реализации громоздких вычислений.

В качестве примера использования стенда ниже приведены результаты испытания секции тиристорного вентиля, изготовленного по документации фирмы RONGXIN POWER ELECTRONIC (Китай) на TCR SVC мощностью 250 MVA и напряжением 66 kV для сети, питающей оборудование ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Индуктивность реакторы TCR равна 112 мН. Номинальный угол управления тиристорами  $\alpha = 105$  эл. градуса.

Вентиль содержит две секции, соединённые последовательно. Каждая секция включает последовательно соединённые дроссель насыщения и тринадцать ступеней из встречно-параллельно включённых тиристоры LTT типа T1503N (Infineon,  $V_{BO} = 7500$  V,  $V_{TO} = 1.24$  V,  $r_T = 0.44$  мΩ), параллельно которым включены RC-снабберы (120 Ω, 2.6 μF). Вентиль имеет две резервные ступени. Тиристоры LTT управлялись через оптоволоконные кабели лазерными светодиодами типа SPL-PL90 (OSRAM), осциллограмма импульса тока  $i_D$  через которые показана на рис. 5, а. Для охлаждения тиристоры и резисторы RC-снабберов использовалась деионизированная вода.

В испытаниях вентиляльная секция проверялась на функционирование, определялись её нагрузочные характеристики по току и напряжению, коммутационные, тепловые и другие параметры в эквивалентном режиме при наибольших рабочих напряжении и токе, в том числе, при двойной перегрузке по току. Контур  $HVC$  имел  $C_V = 2.4$  μF,  $L_V = 56$  мН и  $E_V \cong 51.2$  kV. Контур  $LVC$  имел  $L_C = 0.167$  мН для рабочего режима и  $L_C = 0.067$  мН – для токовой перегрузки секции.

Для отвода тепла от вентиляльной секции использовался агрегат водяного охлаждения LOU-F-150/50-W/A (150k W, 333 L/min, 0.4 MPa, 48 °C) предприятия Sanhe City Tongfei Refrigeration Equipment Co., Ltd. С помощью датчиков агрегата измерялись перепады давления  $\Delta p$  (Bar) и температуры  $\Delta t$  (K) воды в секции, расход  $Q$  (L/min) воды и др. Суммарные тепловые потери в тиристоры и резисторы RC-снабберов секции составляли (92–96) kW при их оценке как  $P_{\Sigma} = c m \Delta t c m \Delta t Q / 60000$ , где  $c$  и  $m$  – удельные теплоёмкость (J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) и масса (kg m<sup>-1</sup>) воды.

Ток и напряжение в рабочем режиме (рис. 5, б) и токовая перегрузка (рис. 5, в) вентиляльной секции регистрировались осциллографом Tektronix TPS2024 с помощью демпфированного ёмкостно-омического делителя напряжения  $DI$ , малоиндуктивного шунта  $RR$  и трансформатора тока  $TC2$  в соответствии со схемой на рис. 1, а. Недопустимо перегретые элементы, шины, контактные соединения и др. секции определялись с помощью тепловизора FLIR T250 (FLIR Systems).

Испытание вентиля  $VST$  в аварийном режиме, который протекает, например, при пробое секции реактора фазы TCR, осуществляется после предварительной его загрузки контурами  $LVC$  и  $HVC$ . Затем отключается контур  $LVC$ , и посредством низковольтной ударной цепи  $SC$  формируется через вентиль  $VST$  аварийная полуволна тока. На спаде этой полуволны вентилем  $VT6$  шунтируется часть



реакторной батареи  $RB$ . В результате контур  $HVC$  формирует импульс тока с аварийным  $di_T/dt$  и соответствующее ему коммутационное перенапряжение на вентиле  $VST$ .

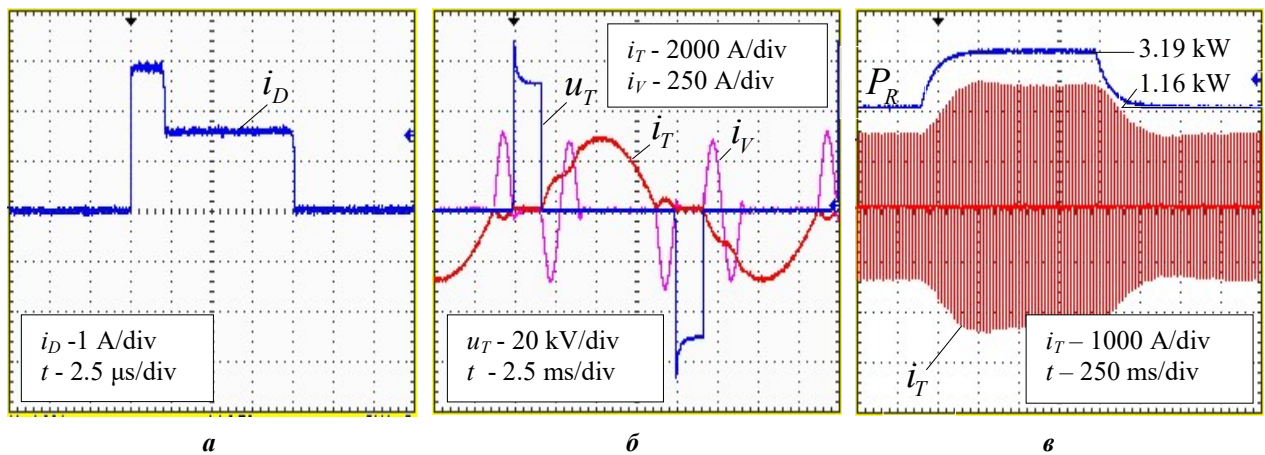


Рис. 5

С помощью стенда можно организовать также испытание вентиля TSC. В этом случае последовательно соединённые вентиль  $VT6$  и часть реакторной батареи  $RB$ , указанные на рис. 1, а индексами в скобках, включаются между точкой Е схемы и общей точкой питания для участия их в работе инвертора. Первоначально испытуемый вентиль  $VST$  в закрытом состоянии подвергается воздействию номинального напряжения, поступающего с вывода Е схемы ( $U_E$ ) через открытый вентиль  $VS5$ . При включении токового контура  $LVC$  запирается вентиль  $VS5$ , и вентиль  $VST$  загружается номинальным током. Аварийный режим создаётся ударной цепью  $SC$ , формирующей одну или две полуволны аварийного тока через вентиль  $VST$ , и контуром  $HVC$ , включаемым в момент спада последней полуволны тока для создания соответствующего коммутационного перенапряжения на вентиле и т.д.

#### Выводы.

1. Схема стенда на основе последовательного резонансного инвертора имеет гибкую структуру и может быть эффективно использована для эквивалентных испытаний симметричных тиристорных вентилях SVC и других применений в рабочих и аварийных режимах.
2. Выполненный в статье анализ электромагнитных процессов, протекающих в силовых цепях стенда при испытаниях вентиля TCR, позволил сформулировать требования к параметрам стенда для его работы в эквивалентном режиме с данным типом вентиля. Данная методика определения параметров может быть применена при испытаниях других типов вентилях.
3. Используемые в стенде алгоритмы управления не требуют сложных вычислений и обеспечивают высокую точность эквивалентных испытаний вентиля в стационарных и переходных режимах загрузки.

1. Static var compensators (SVC) – Testing of thyristor valves. International standard IEC 61954:2011+AMD1:2013+AMD2:2017. 90 p.

2. Sheng B., Oliveira M., Bjarne H.-O. Synthetic test circuits for the operational tests of TCR and TSC thyristor valves. *Conf. and Exposition IEEE/PES*, April 21-24 2008, Chicago, Illinois, USA. Pp. 1–5.

3. Woodhouse M.L., Simanwe T. A new facility for testing HVDC and SVC thyristor valves. *CIGRE 2006*, B4-309. Pp. 1–9.

4. Tang G., Zha K., He Z., Wang H. Study on Operational Tests for FACTS Thyristor Valves. *IEEE Trans. Power Del.* 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1525-1532.

5. Shytov O., Xu Beibei, Zhang Xiaohui, Si Mingqi. Test station for detecting thyristor valve group. Patent WO 2013/113188 A1. 2013.

6. Шитов О.Л., Буров О.М. Спосіб керування стендом для випробування напівпровідникових вентилях. Патент України № 116260. 2017.

## ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТИРИСТОРНИХ ВЕНТИЛІВ СТАТИЧНИХ VAR КОМПЕНСАТОРІВ

О.Л. Шитов<sup>1</sup>, О.М. Буров<sup>2</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> ПрАТ “Запорізький завод ”Перетворювач”,

вул. Дніпровське шосе, 9, Запоріжжя, 69069, Україна,

e-mail: [shashy@ukr.net](mailto:shashy@ukr.net)

<sup>2</sup> ПрАТ “Запоріжтрансформатор”,

вул. Дніпровське шосе, 3, Запоріжжя, 69600, Україна,

e-mail: [o.m.burov@i.ua](mailto:o.m.burov@i.ua)

*Розглянуто роботу спеціалізованого стенда із покращеними техніко-економічними характеристиками для еквівалентних випробувань симетрично керованих тиристорних вентилів, які використовуються в статичних VAR компенсаторах. Силова частина стенда оснащена традиційним низьковольтним струмовим контуром і енергоефективним високовольтним коливальним контуром, виконаним у вигляді послідовного резонансного інвертора за напівмостовою схемою. На основі аналізу структурної схеми стенда і схем заміщення його контурів з випробуваним вентилем отримано аналітичні вирази для опису електромагнітних процесів, що протікають у контурах, визначено параметри стенда, необхідні для проведення випробувань вентилів у еквівалентному режимі, та виявлено оптимальні алгоритми управління стендом. Розроблено рекомендації щодо випробування вентилів тиристорно-керованих реакторів і наведено відповідні результати натурних досліджень у разі заданих параметрів вентиля і стенда. Бібл. 6, рис. 5.*

**Ключові слова:** випробувальний стенд, тиристорний вентиль, послідовний резонансний інвертор, тиристорно-керований реактор.

## TECHNICAL FEATURES OF EQUIVALENT TESTS OF THYRISTOR VALVES OF STATIC VAR COMPENSATORS

O. Shytov<sup>1</sup>, O. Burov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PrJSC Zaporozhye plant Preobrazovatel,

str. Dneprovskoe Shosse, 9, Zaporozhye, 69069, Ukraine,

e-mail: [shashy@ukr.net](mailto:shashy@ukr.net)

<sup>2</sup> PrJSC Zaporozhtransformator,

str. Dneprovskoe Shosse, 3, Zaporozhye, 69600, Ukraine,

e-mail: [o.m.burov@i.ua](mailto:o.m.burov@i.ua)

*The work of a specialized station with improved technical and economic characteristics for equivalent testing of symmetrically controlled thyristor valves used in static VAR compensators has been considered. Its power unit is equipped with a traditional low-voltage current circuit and an energy-efficient high-voltage oscillating circuit, made as a series resonant inverter according to a half-bridge circuit. On the basis of analysis of block diagram of the test station and equivalent schemes of the indicated circuits with the test thyristor valve analytical expressions for describing the electromagnetic processes occurring in its circuits were obtained, the parameters of the test station, necessary for testing the valves in the equivalent mode, were determined and the optimal control algorithms of the station were identified. The recommendations for testing the valves of thyristor-controlled reactors are developed and the corresponding results of field studies for given valve and station parameters are given. References 6, figures 5.*

**Keywords:** test station, thyristor valve, serial resonant inverter, thyristor-controlled reactor.

1. Static var compensators (SVC) – Testing of thyristor valves. International standard IEC 61954:2011+AMD1:2013+AMD2:2017. 90 p.

2. Sheng B., Oliveira M., Bjarne H.-O. Synthetic test circuits for the operational tests of TCR and TSC thyristor valves. In Proc. T&D Conf. and Exposition IEEE/PES, April 21-24 2008, Chicago, Illinois, USA. Pp. 1–5.

3. Woodhouse M.L., Simanwe T. A new facility for testing HVDC and SVC thyristor valves. CIGRE 2006, B4-309. Pp. 1–9.

4. Tang G., Zha K., He Z., Wang H. Study on Operational Tests for FACTS Thyristor Valves. *IEEE Trans. Power Del.* 2013. Vol. 28. No 3. Pp. 1525-1532.

5. Shytov Oleksandr, Xu Beibei, Zhang Xiaohui, Si Mingqi. Test station for detecting thyristor valve group. Patent WO 2013/113188 A1. 2013.

6. Shytov O.L., Burov O.M. The method of control the station for testing semiconductor valves. Patent UA No 116260. 2017. (Ukr)

Надійшла 26.11.2018  
Остаточний варіант 02.05.2019