

УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ТИРИСТОРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В MATLAB 7

Жемеров Г.Г., д.т.н., проф., Колесник В.Ю.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника"
тел. (057) 7076609, (057) 7076312, E-mail: zhemerov@online.kharkiv.net

У статті розглянута уточнена модель одноопераційного тиристора для пакету Matlab 7.0. Запропонована модель, на відміну від наявної в бібліотеці Simulink, враховує наявність заряду зворотного відновлення тиристора. На прикладі моделі шестипульсного керуваного випрямляча показаний вплив заряду зворотного відновлення на величину перенапруги, що повторюється, на тиристорі. Приведений алгоритм розрахунку ланцюгів захисту від перенапруження, що повторюється.

В статье рассмотрена уточненная модель однооперационного тиристора для пакета Matlab 7.0. Предложенная модель, в отличие от имеющейся в библиотеке Simulink, учитывает наличие заряда обратного восстановления тиристора. На примере модели шестипульсного управляемого выпрямителя показано влияние заряда обратного восстановления на величину повторяющихся перенапряжений на тиристоре. Приведен алгоритм расчета цепей защиты от повторяющегося перенапряжения.

ВВЕДЕНИЕ

В библиотеке Simulink 7.0 и более поздних версий для пакета Matlab 7 отсутствует модель однооперационного тиристора, учитывающая заряд обратного восстановления и, соответственно, обратный ток тиристора при выключении. Имеющаяся модель "Detailed thyristor" отличается от модели "Thyristor" наличием параметра Turn-off time (T_q), который становится доступным, если задать индуктивность тиристора (Inductance L_{on}) отличной от нуля и открыть окно с параметрами тиристора повторно [1].

В справке указано следующее:

The thyristor device turns off when the current flowing in the device becomes 0 ($I_{ak} = 0$) and a negative voltage appears across the anode and cathode for at least a period of time equal to the turnoff time T_q . If the voltage across the device becomes positive within a period of time less than T_q , the device turns on automatically even if the gate signal is low ($g = 0$) and the anode current is less than the latching current. Furthermore, if during turn-on, the device current amplitude stays below the latching current level specified in the dialog box, the device turns off after the gate signal level becomes low ($g = 0$).

Таким образом, под временем выключения подразумевается интервал времени, в течение которого тиристор при подаче прямого напряжения останется открытым. Однако проводимость тиристор при этом не сохраняет.

Для полноценного анализа электромагнитных процессов в компьютерных моделях вентильных преобразователей с тиристорами в пакете Matlab необходимо ввести уточненную модель тиристора, учитывающую величину заряда обратного восстановления.

В статье рассматривается уточненная модель тиристора.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ БЕЗ УЧЕТА ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРОВ

Для исследования модели Matlab-тиристора составлена модель шестипульсного мостового управляемого выпрямителя, нагруженного на активно-индуктивную нагрузку с противоЭДС. Параметры модели следующие:

- действующее значение линейного напряжения сети $U = 710$ В;
- номинальный ток нагрузки – $I_{дн} = 1000$ А;
- напряжение короткого замыкания фазы сети –

$$e_k = 0,06.$$

Ток нагрузки поддерживается постоянным с помощью ПИ-регулятора.

На рис. 1 приведены осциллограммы, характеризующие электромагнитные процессы в УВ. Показаны напряжения и ток на тиристоре анодной вентильной группы фазы А. На осциллограммах а) показаны ток тиристора и напряжение на тиристоре на интервале четырех периодов напряжения сети в установившемся режиме. На осциллограммах б) показан процесс выключения тиристора (напряжение и ток) в увеличенном масштабе по оси времени.

Видно, что обратное напряжение на тиристоре начинает нарастать сразу после перехода тока через ноль. Обратный ток, который виден на осциллограмме, представляет собой ток заряда конденсатора снабберной RC-цепочки, защищающей тиристор от перенапряжения. Таким образом, подтверждается приведенная в справке информация, что учет времени закрывания сводится к возможности открытия тиристора при подаче прямого напряжения и никак не влияет на токи и напряжения в силовой схеме, если напряжение на тиристоре останется отрицательным.

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ОБРАТНОГО ТОКА

Физически причиной протекания обратного тока тиристора является наличие заряда обратного восстановления Q_{rr} в структуре, который рассасывается под действием обратного тока, при этом прибор остается открытым и падение напряжения на нем близко к нулю. Когда обратный ток достигает некоторого максимального значения I_0 , заряд обратного восстановления полностью рассасывается и тиристор закрывается [2].

Величина обратного тока, в общем случае зависит от заряда обратного восстановления Q_{rr} и скорости изменения тока:

$$I_0 = \sqrt{2Q_{rr} \frac{di}{dt}}. \quad (1)$$

Для управляемого выпрямителя выражение (1) имеет вид:

$$I_0 = \sqrt{2Q_{rr} \frac{e_a}{2L_\phi}}. \quad (2)$$

где e_a – мгновенное значение анодного напряжения тиристора.

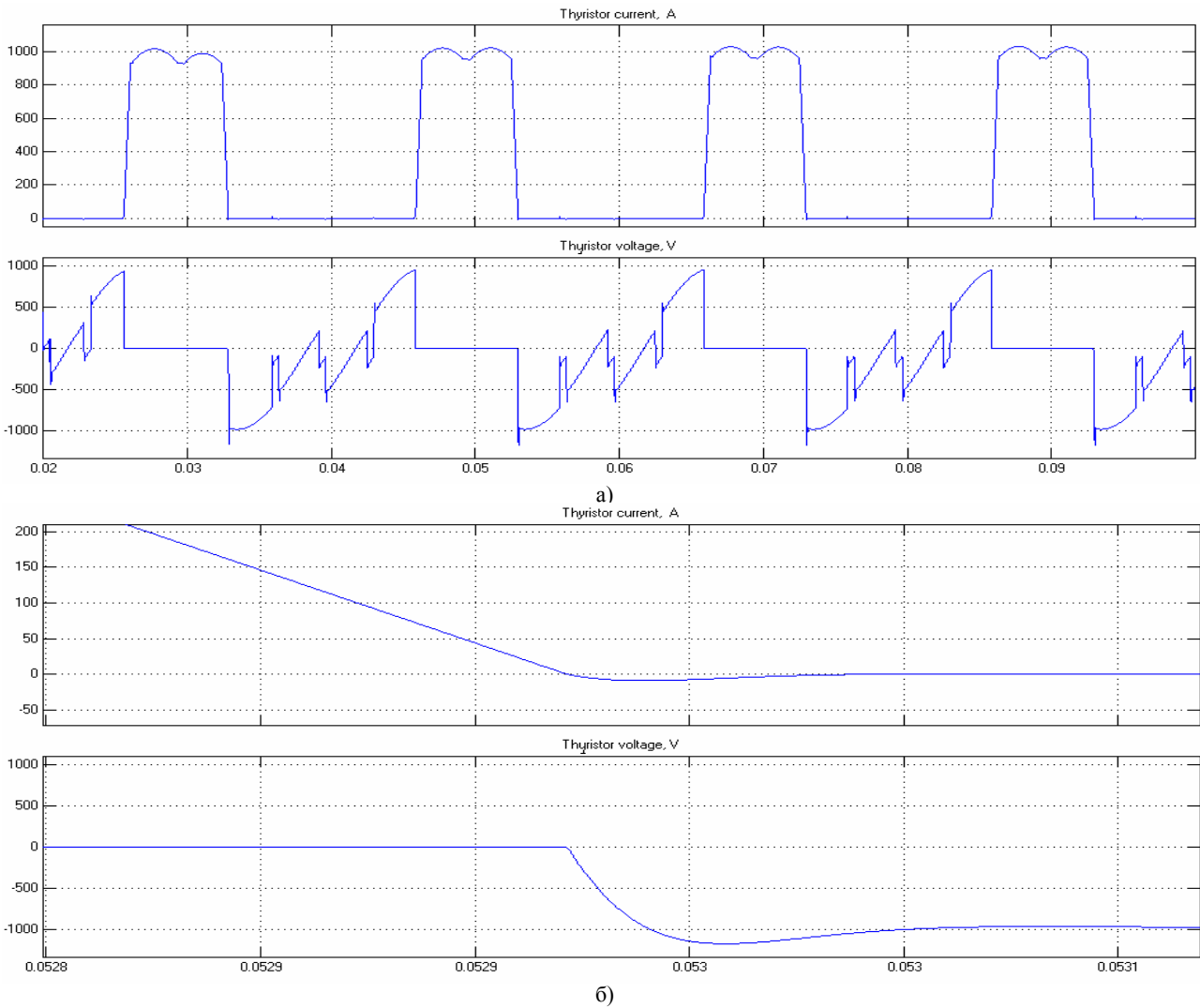


Рис. 1. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре без учета заряда обратного восстановления

В соотношении (2) Q_{rr} – величина заряда обратного восстановления. Это справочная величина для конкретного прибора, зависящая от скорости изменения тока при коммутации и величины тока перед началом коммутации $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$.

Для рассматриваемого примера модели выбираем тиристор фирмы Semikron типа SKT551, рекомендованный для шестипульсного УВ с номинальным выходным током 1000 А [3].

Зависимость $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$ для этого прибора приведена на рис. 2.

Рассчитаем максимальную скорость изменения тока:

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max} = \frac{E_{am}}{2L_{\phi}} \quad (4)$$

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max} = \frac{710 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 2.4 \cdot 10^{-4}} = 2.1 \text{ A}/\mu\text{s}.$$

Как видно из рис. 2 для возможных в схеме скоростей изменения тока зависимость $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ линейна. При токах в диапазоне 10-1000 А и скорости

изменения тока менее $3 \text{ A}/\mu\text{s}$ зависимость величины заряда обратного восстановления от тока можно аппроксимировать следующим выражением:

$$Q_{rr} = Q_{rr0} \lg I, \quad (5)$$

где Q_{rr0} – заряд обратного восстановления при токе 10 А и скорости изменения тока $1 \text{ A}/\mu\text{s}$.

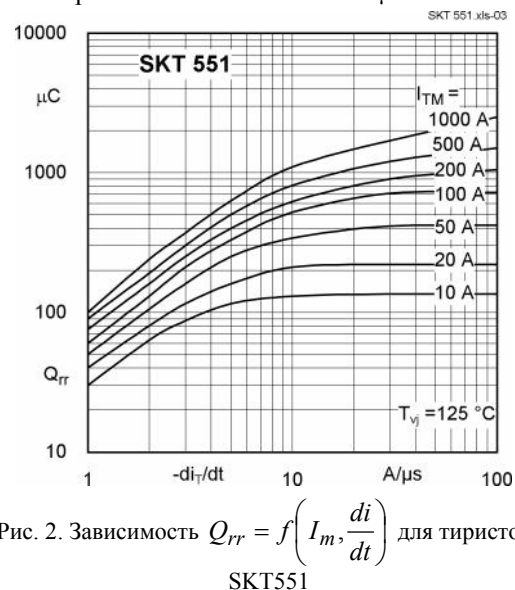


Рис. 2. Зависимость $Q_{rr} = f\left(I_m, \frac{di}{dt}\right)$ для тиристора SKT551

Зависимость величины заряда обратного восстановления от скорости изменения тока $Q_{rr} = f\left(\frac{di}{dt}\right)$ практически линейна при скорости изменения тока менее $3 \text{ A}/\mu\text{s}$.

Таким образом, для моделирования можно использовать следующее выражение:

$$Q_{rr} = Q_{rr0} \lg I \frac{di}{dt} \cdot 1 \cdot 10^{-6}. \quad (6)$$

Величина скорости изменения тока в (6) в $\text{A}/\mu\text{s}$. Для тиристора SKT551 $Q_{rr0} = 30 \text{ } \mu\text{C}$, поэтому выражение (6) упрощается:

$$Q_{rr} \approx 3 \cdot 10^{-11} \lg I \frac{di}{dt}.$$

При токе 1000 A $Q_{rr} \approx 1 \cdot 10^{-10} \frac{di}{dt}$. Максимально-

му значению скорости изменения тока $\left.\frac{di}{dt}\right|_{\max}$ соответствует максимальное значение заряда обратного восстановления $Q_{rr \max} = 0,21 \text{ mC}$; L_Φ – индуктивность фазы сети. Выразим ее через известные значения амплитуды фазного напряжения E_{am} , напряжения короткого замыкания сети e_k и тока нагрузки I_{dn} :

$$L_\Phi = \frac{E_{am} e_k}{\sqrt{\frac{2}{3}} I_{dn} 100\pi}. \quad (7)$$

$$L_\Phi = \frac{1004 \cdot 0,06}{\sqrt{\frac{2}{3}} 866 \cdot 100\pi} = 0,24 \text{ mH}.$$

Тогда максимальная величина обратного тока составит:

$$I_{0 \max} = \sqrt{2 \cdot 0,21 \cdot 10^{-3} \frac{710 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}} = 30 \text{ A}.$$

Рассчитанное значение соответствует максимальному значению обратного напряжения ($\alpha = 90$ эл. град.).

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СНАББЕРНОЙ ЦЕПочки

Когда величина обратного тока тиристора достигает значения I_0 , тиристор закрывается, и индуктивный ток в контуре коммутации вызывает перенапряжения которые могут привести к пробоем пибора. Поэтому тиристор шунтируют снабберной RC-цепочки, защищающей от повторяющихся коммутационных перенапряжений.

Приведем расчет элементов снабберной цепочки, согласно методике, описанной в [4].

Зададимся значением величины падения напряжения на резисторе в первый момент времени, после закрывания тиристора $(I_0 R)_* = 1,2$ и определим величину эквивалентного сопротивления R_3 :

$$R_3 = (I_0 R)_* \frac{E_{am}}{I_0}, \quad (8)$$

$$R_3 = 1,2 \frac{1004}{30} = 40 \text{ } \Omega.$$

Выбираем величину $\beta T = 1$ [4].

Определяем емкость эквивалентного конденса-

тора C_3 :

$$C_3 = \frac{8L_\Phi}{(1 + (\beta T)^2) R_3^2}, \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{8 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}{(1 + 1^2) 40,8^2} = 0,57 \text{ } \mu\text{F}.$$

Для шестипульсной мостовой схемы УВ реальные значения элементов снабберной цепи определяются по следующим соотношениям:

$$R = \frac{5}{3} R_3; \quad C = \frac{3}{5} C_3, \quad (10)$$

$$R = \frac{5}{3} 40 = 66,7 \text{ } \Omega; \quad C = \frac{3}{5} 0,57 \cdot 10^{-6} = 0,34 \text{ } \mu\text{F}.$$

Выбираем близкие стандартные значения: $R = 68 \text{ } \Omega$, $C = 0,33 \text{ } \mu\text{F}$.

Находим уточненные значения эквивалентного сопротивления и емкости

$$R_{\text{эkv}} = \frac{3}{5} R = \frac{3}{5} 68 = 40,8 \text{ } \Omega,$$

$$C_{\text{эkv}} = \frac{5}{3} C = \frac{5}{3} 0,33 \cdot 10^{-6} = 0,55 \text{ } \mu\text{F}.$$

Уточняем значение βT

$$\beta T = \sqrt{\frac{8L_\Phi}{R_3^2 C_3} - 1}, \quad (11)$$

$$\beta T = \sqrt{\frac{8L_\Phi}{R_3^2 C_3} - 1} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}{40,8^2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-6}} - 1} = 1,05.$$

Уточняем величину $(I_0 R)_*$:

$$(I_0 R)_* = \frac{I_0 R_3}{E_{am}}, \quad (12)$$

$$(I_0 R)_* = \frac{30 \cdot 40,8}{1004} = 1,22.$$

По полученным значениям определяем величину перенапряжения на тиристоре $\Delta U_T = 0,45$.

Максимальная мощность, рассеиваемая в резисторе снабберной цепи составит: [4]

$$P_{R \max} = 3,5 f_0 C U_L^2, \quad (13)$$

$$P_{R \max} = 3,5 \cdot 50 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 710^2 = 30 \text{ W}.$$

А суммарная мощность потерь в снабберах:

$$P_{\Sigma R \max} = 6 P_{R \max}, \quad (14)$$

$$P_{\Sigma R \max} = 6 \cdot 30 = 180 \text{ W}.$$

Это составляет приблизительно 0,02% от номинальной мощности преобразователя.

УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ТИРИСТОРА

Структура блока, заменяющего матлабовский тиристор и учитывающего наличие заряд обратного восстановления приведена на рис. 3.

Схема содержит собственно стандартный Simulink блок "Detailed thyristor" VS, у которого емкость (Snubber capacitance C_s) и сопротивление (Snubber resistance R_s) снабберной цепи равны inf (бесконечность) и $100000 \text{ } \Omega$ соответственно. Снабберная цепь выполнена как и в реальном преобразователе из отдельных элементов $C_{\text{демф}}$ и $R_{\text{демф}}$ равных $0,33 \text{ } \mu\text{F}$ и $68 \text{ } \Omega$ соответственно, согласно приведенному выше расчету.

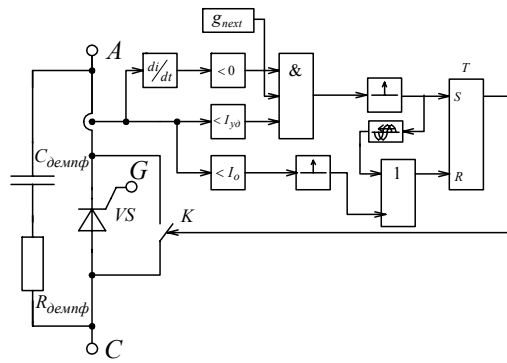


Рис. 3. Схема уточненной модели тиристора

Для имитации проводимости тиристора в процессе рассасывания заряда обратного восстановления Q_{rr} необходимо шунтировать его идеальным ключом К. Управляет этим ключом RS-триггер Т. Короткий импульс, устанавливающий триггер в единичное состояние по входу S, формируется при одновременном соблюдении трех условий, однозначно определяющих переход тока через ноль при выключении тиристора:

- 1) скорость изменения тока тиристора меньше нуля;
- 2) ток тиристора меньше тока удержания;
- 3) действует импульс, открывающий следующий (по алгоритму переключения) тиристор (g_{next}).

На практике сигнал производной тока необходимо пропустить через ФНЧ второго порядка с частотой среза несколько килогерц, сглаживающий броски при коммутациях.

Короткий импульс, устанавливающий триггер в нулевое состояние, формируется при достижении об-

ратным током величины I_0 , которая рассчитывается в модели согласно выражению (2). Отметим, что в модели выпрямителя необходимо использовать трехфазный блок источника напряжения "Three-Phase Source" с небольшими величинами сопротивлений и индуктивностей для исключения влияния искажений напряжения сети при коммутациях на расчет величины обратного тока. В данной модели УВ сопротивление фазы сети ("Source resistance") равно $0,01\text{ м}\Omega$, индуктивность фазы ("Source inductance") – $2,4\text{ }\mu\text{H}$ Основная индуктивность $240\text{ }\mu\text{H}$ вынесена отдельным блоком. Вольтметры, измеряющие напряжения для расчета скорости изменения тока при коммутации подключены непосредственно к сети, поскольку напряжение там не искажено.

Для защиты от помех формируется дополнительный сбрасывающий импульс через $200\text{ }\mu\text{s}$ после импульса установки триггера в единицу. Это реализует элемент, выполняющий операцию логического сложения сигнала сброса триггера в состояние логического 0 с сигналом установки триггера в состояние логической 1, сдвинутым на $200\text{ }\mu\text{s}$.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРОВ

На рис. 4 показаны осциллограммы полученные с использованием уточненной модели тиристора, иллюстрирующие процессы при коммутации – ток через тиристор и напряжение на тиристоре в увеличенном масштабе при токе нагрузки 1000 A и величине угла управления $\alpha = 90$ эл. град., а на рис. 5 осциллограммы, полученные при $\alpha = 10$ эл. град.

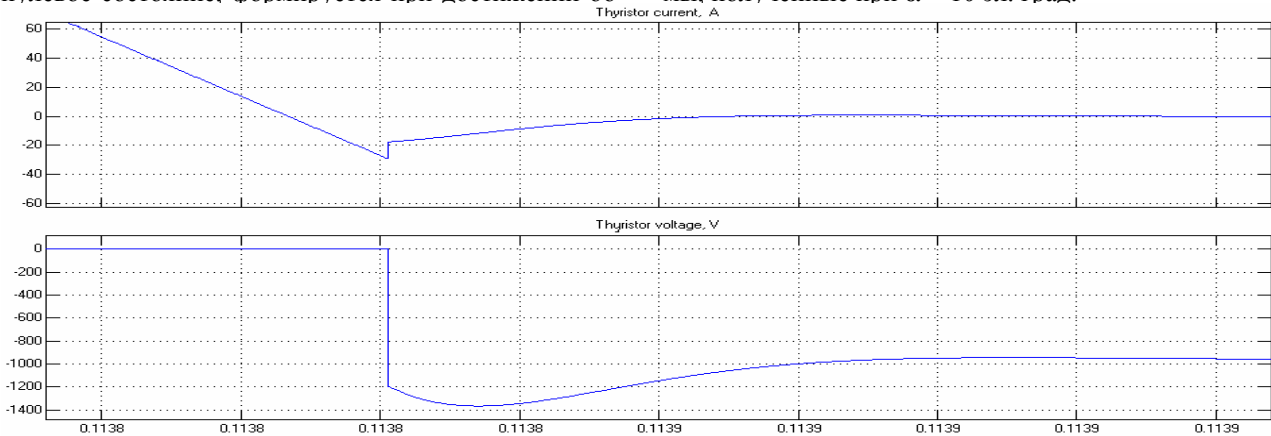


Рис. 4. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 90$ эл. град. и $I_d = 1000\text{ A}$

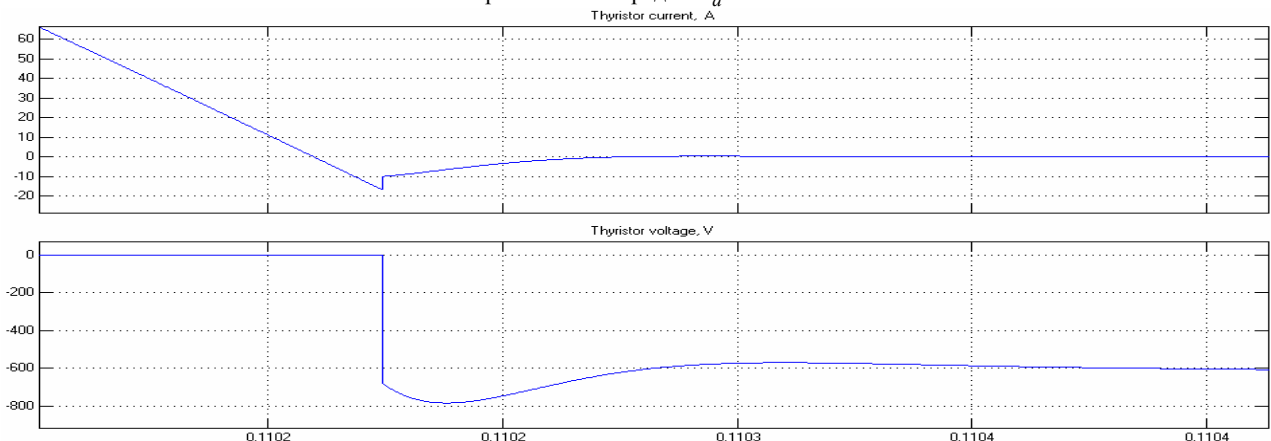


Рис. 5. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 10$ эл. град. и $I_d = 1000\text{ A}$

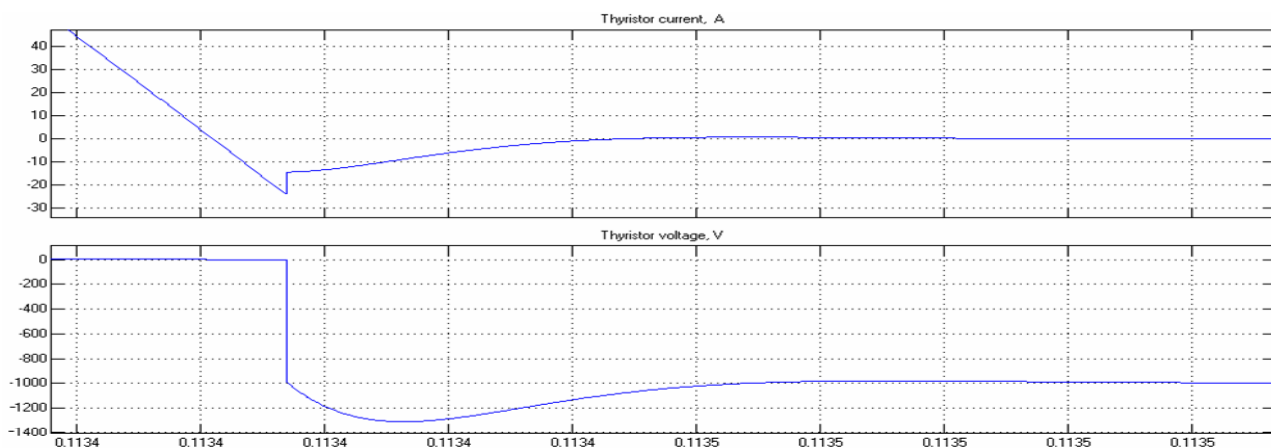


Рис. 6. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 90$ эл. град. и $I_d = 100$ А

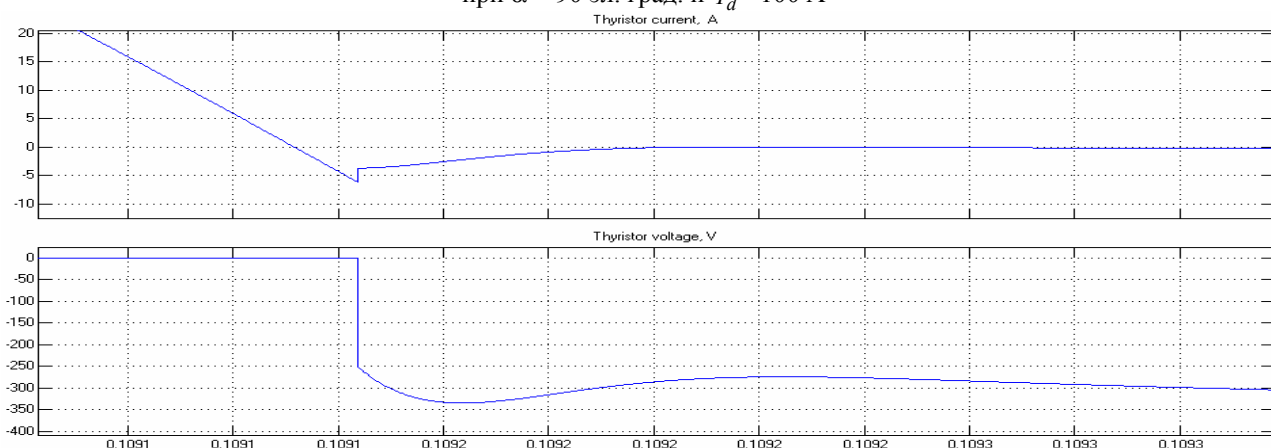


Рис. 7. Ток через тиристор и напряжение на тиристоре с учетом заряда обратного восстановления при $\alpha = 10$ эл. град. и $I_d = 100$ А

На рис. 6 также показаны осциллограммы тока и напряжения при коммутации в увеличенном масштабе при токе нагрузки 100А и при $\alpha = 90$ эл. град., а на рис. 7 – при $\alpha = 10$ эл. град.

Как видно из осциллограмм сохранен физический смысл заряда обратного восстановления, то есть ток линейно уменьшается до значения (максимальное значение обратного тока $I_0 \approx 30$ А соответствует углу управления $\alpha = 90$ эл. град. и току нагрузки 1000 А - см. рис. 4), а напряжение на ключе на этом интервале равно нулю.

Максимальное относительное напряжение в первый момент времени после запираания тиристора составляет 1,2 (рис. 4), а амплитуда повторяющегося перенапряжения составляет примерно 1,4 при $\alpha = 90$ эл. град. и токе нагрузки 1000 А. При $\alpha = 10$ эл. град. ток нагрузки 100 А относительное напряжение в первый момент времени после запираания тиристора составляет 0,25.

Процесс заряда конденсатора легкий колебательный – амплитуда третьей полуволны меньше амплитуды первой полуволны на два порядка. Такой характер процесса наиболее целесообразен, поскольку он позволяет получить минимальные потери в снабберных цепях при обеспечении максимального перенапряжения на тиристорах 1,5 от амплитуды анодного напряжения.

ВЫВОДЫ

1. Предложена уточненная модель однофазного тиристора, предназначенная для замены стандартной модели "Detailed thyristor". Предложенная модель тиристора позволяет учитывать наличие заряда обратного восстановления. Причем при моделировании величины заряда учитывается ее зависимость от скорости изменения тока.

2. Проведен расчет цепей защиты тиристора от перенапряжений обусловленных зарядом обратного восстановления.

3. На примере трехфазного мостового управляемого выпрямителя с типовыми параметрами показано влияние заряда обратного восстановления тиристорov на величину обратного тока и повторяющегося перенапряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. Питер, 2008 г, 288 с.
- [2] Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применения. – М.: Издательский дом Додэка-XXI, - 2001, 384 с.
- [3] SEMIKRON INTERNATIONAL. DR. Fritz Martin GmbH & Co. KG & SEMIKRON ELEKTRONIK GmbH Sigmondstrabe 2000, D-90431 Nurnberg/Germany.
- [4] Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М., "Энергия", 1977. – С. 200-209.

Поступила 05.10.2008