УДК 621.314.263

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-7-57-65

Расчет *RC*-цепей, коммутационных перенапряжений и потерь энергии в тиристорных преобразователях

А. С. Адалев¹, В. В. Глушаков¹, Р. А. Карзунов¹, М. В. Пронин^{1,2}, Н. И. Федоров¹

¹ АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^{III} fedorov_ni@power-m.ru

Аннотация. В тиристорных преобразователях при переключении вентилей возникают скачкообразные изменения напряжений. Наиболее значительно напряжения изменяются при запирании тиристоров. Для ограничения перенапряжений тиристоры шунтируются *RC*-цепями, которые уменьшают перенапряжения, но обычно не исключают их полностью. Коммутационные перенапряжения зависят от обратного тока в тиристорах при их выключении, от параметров схемы преобразования, от параметров *RC*-цепей, в связи с чем при определении параметров *RC*-цепей возникают сложности. Проведены экспериментальные исследования. Разработан комплекс математических систем с тиристорным выпрямителем и *RC*-цепями в MatLab-Simulink, в том числе с учетом резонансных контуров. Выполнены расчеты электрических процессов в указанных системах. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, достигнуто достаточное совпадение.

Ключевые слова: тиристорный преобразователь, перенапряжение, эксперимент, моделирование

Для цитирования: Расчет *RC*-цепей, коммутационных перенапряжений и потерь энергии в тиристорных преобразователях / А. С. Адалев, В. В. Глушаков, Р. А. Карзунов, М. В. Пронин, Н. И. Федоров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-57-65.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Calculation of *RC* Circuits, Switching Overvoltage and Energy Loss in Thyristor Converters

A. S. Adalev¹, V. V. Glushakov¹, R. A. Karzunov¹, M. V. Pronin^{1,2}, N. I. Fedorov^{1⊠}

¹ JSC «Power machines», Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

^{IM} fedorov_ni@power-m.ru

Abstract. In thyristor converters, abrupt voltage changes occur during switching of valves. The voltages change most significantly when the thyristors are switched off. To limit overvoltage, thyristors are shunted by *RC* circuits. *RC* circuits reduce overvoltages, but usually do not eliminate them completely. Switching overvoltages depend on the reverse current in thyristors when they are switched off, on the parameters of the converter circuit and on the parameters of *RC* circuits. Experimental studies have been carried out and a simulation model with a thyristor rectifier and *RC* circuits in MatLab-Simulink has been developed taking into account special resonant circuits forming a proper current shape. Calculations of electric processes in the model have been performed. The results of the calculations were compared with experimental data, and a sufficient coincidence was achieved.

Keywords: thyristor converter, overvoltage, experiment, simulation

For citation: Calculation of RC Circuits, Switching Overvoltage and Energy Loss in Thyristor Converters / Adalev A. S., Glushakov V. V., Karzunov R. A., Pronin M. V., Fedorov N. I. // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-7-57-65.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В тиристорных преобразователях при переключении вентилей возникают скачкообразные изменения напряжений. Наиболее значительно напряжения изменяются при запирании тиристоров. В цепи с током обычно имеется индуктивность, и резкое увеличение сопротивления запирающегося тиристора вызывает значительное увеличение падения напряжения на нем – появляются перенапряжения. Для ограничения перенапряжений тиристоры шунтируются *RC*-цепями. Эти цепи могут быть индивидуальными (для каждого тиристора) и внешними, подключаемыми к фазам тиристорных преобразователей. *RC*цепи уменьшают перенапряжения, но обычно не исключают их полностью [1], [2].

Коммутационные перенапряжения зависят от обратного тока в тиристорах при их выключении, от параметров схемы преобразования, от параметров *RC*-цепей и др.

Измерения обратных токов в тиристорах могут быть выполнены по схеме рис. 1 согласно ГОСТ 24461–80.

В схеме рис. 1: T_1 – испытуемый тиристор, T_2 – коммутирующий тиристор; C_1 , C_2 – конденсаторные батареи; L_1 , L_2 – индуктивности дросселей; R_1 , R_2 – активные сопротивления; D_1 , D_2 – диоды, ДТ, ДН – датчики тока и напряжения. Перед проведением опыта конденсатор C_2 заряжается от источника постоянного напряжения 290 В. Затем ключ K_2 размыкается, замыкается ключ K_1 и осуществляется заряд конденсатора C_1 до напряжения 290 В. Далее включается тиристор T_1 и ток в нем увеличивается до значения, зависящего от параметров контура L_1C_1 . С задержкой по времени включается тиристор T_2 и ток в тиристоре T_1 начинает уменьшаться со скоростью, определяемой параметрами контура L_2C_2 . Параметры L_2 и C_2 выбираются таким образом, чтобы ток в тиристоре T_1 уменьшался практически линейно. При некотором значении обратного тока тиристора T_1 происходит его запирание. При этом увеличивается обратное напряжение на тиристоре.

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы переключения тиристоров типа 5STP08G6500 $(U_{\text{DSM}} = 6500 \text{ B}, I_{\text{TAVM}} = 730 \text{ A},$ где U_{DSM} – неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии, а І_{ТАVМ} – максимально допускаемый средний ток в открытом состоянии) фирмы АВВ [3]. На осциллограммах представлены ток I_{T1} и напряжение U_{T1} тиристора при его включении и выключении в схеме рис. 1. На рис. 2 Т – цена крупного деления на осциллограммах в микросекундах. В рассматриваемых случаях перед выключением тиристоров их ток уменьшался со скоростью 5.7 А/мкс. Процесс восстановления запирающих свойств тиристора начинается в осциллограмме на рис. 2, a при обратном токе ($I_{oбp}$) -57 А, на рис. 2, б – при обратном токе –66 А. Процесс запирания тиристора можно представить двумя линейными участками изменения тока. На первом участке ток изменяется с указанной скоростью 12 А/мкс, на втором участке скорость изменения тока существенно меньше. Максимальное значение восстанавливающегося напряжения (Uoofp) на тиристорах в данных случаях около -500 В.

На рис. З представлены типичные зависимости мощности потерь ($P = U_{T1}I_{T1}$) – и энергии потерь в тиристоре 5STP08G6500 при выключении с обратным током –66 А при указанных скоростях изменения тока.



Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7 С. 57-65

LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 57-65



Fig. 3. Power (*a*) and energy (δ) loss in thyristor 5STP08G6500 at shutdown

Для расчета коммутационных перенапряжений в преобразователях в MatLab разработана уточненная модель тиристора. Схема модели представлена на рис. 4.



Уточненная модель тиристора. Уточненная модель тиристора построена при использовании библиотечных моделей однооперационного тиристора T_1 и запираемого тиристора GTO. В библиотечном тиристоре ток прерывается при переходе его через 0, в тиристоре GTO прямой ток может быть выключен с заданной скоростью.

Указанные тиристоры включены встречнопараллельно. Силовой положительный потенциал – 2, отрицательный – 1, управляющий вход – In1. При подаче положительного напряжения и при наличии управляющего сигнала тиристор T₁ открывается. Практически одновременно открывается тиристор GTO (управляющий сигнал формируется элементами OR, блоками запаздывания 1/z, сравнения HitCrossing и др.). Это состояние системы сохраняется, пока ток положителен (протекает через тиристор T_1 от входа 2 к выходу 1). Если ток изменяет знак, то он протекает через тиристор GTO, а T₁ запирается. Система управления поддерживает сигнал управления GTO при пропадании сигнала In₁. В элементе HitCrossing ток тиристора GTO сравнивается с заданным обратным током. В момент их равенства на выходе HitCrossing формируется сигнал, который прекращает действие сигнала управления GTO и этот тиристор запирается с заданной скоростью изменения тока. Изменение тока GTO в зоне его запирания задается двумя прямыми.

При использовании уточненной модели тиристора построена модель системы испытания тиристоров. Схема модели представлена на рис. 5. В ней V₁, V₂ – источники постоянного напряжения 290 В; R₁, R₂ – активные сопротивления дросселей; R_3 , R_4 – активные сопротивления; D_1 , D₂ – диоды; DV – датчик напряжения; DI – датчик тока; T₁ – испытуемый тиристор (по схеме рис. 4); T₂ – коммутирующий тиристор; S₁, S₂, S₃ – источники ступенчатых сигналов управления; 1/*s* – интегратор; *S*_{C2} – осциллограф.

В модели при выключении тиристора на нем возникает импульс перенапряжения. Прямоугольная форма этого импульса U_{T1} (рис. 6) отличается от формы реальной кривой (рис. 2). Однако при одном обратном токе тиристора в эксперименте и в расчете максимальные значения перенапряже-

ний на тиристоре близки. Близки также расчетные и экспериментальные потери энергии в тиристоре при его выключении.

Модель системы с 6-пульсным выпрямителем и *RC*-цепями. При использовании указанных моделей тиристоров построена модель системы с трехфазным источником питания ELS ограниченной мощности, тиристорным 6-пульсным выпрямителем и нагрузкой постоянного тока с индуктивностью L_n и активным сопротивлением R_n . Схема модели представлена на рис. 7, где обозначены: T1-*T*₆ – тиристоры; *GI*₁–*GI*₆ – импульсные источники сигналов управления тиристорами; R₁-R₆, C₁-С6 - активные сопротивления и емкости индивидуальных RC-цепей; ELS – трехфазный источник напряжения с ЭДС и индуктивностями; $R_{V1}-R_{V3}$, С_{V1}-С_{V3} - активные сопротивления и емкости внешних RC-цепей; DI1-DI3 - датчики токов фаз,



Fig. 6. Current, voltage, power and energy of the thyristor when it is switched off

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7 С. 57-65



LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 57-65

Puc. 7. Модель системы с 6-пульсным выпрямителем и *RC*-цепями Fig. 7. System model with 6-pulse rectifier and *RC* circuits

DI₄-DI₆ - датчики токов внешних RC-цепей; DV₁-DV3 - датчики напряжений фаз; DI7, DI8 - датчики тока в тиристоре и в индивидуальной RC-цепи 1-го плеча моста; DV₄ – датчик напряжения 1-го плеча моста; Fourier, Fourier 1, Fourier 2 – блоки выделения постоянных составляющих в сигналах суммарных мощностей внешних RC-цепей, индивидуальных RC-цепей и тиристоров; S_{C1}, S_{C2} осциллографы. В модели внешние RC-цепи зашунтированы резисторами с сопротивлением по 10 кОм. На осциллограф S_{C1} выводятся: токи фаз I_1-I_3 ; напряжения фаз U_1-U_3 ; ток в 1-й фазе внешней RC-цепи, суммарная мощность потерь во внешних RC-цепях. На осциллограф S_{C2} выводятся: суммарная мощность потерь энергии в индивидуальных RC-цепях, суммарная мощность потерь энергии в тиристорах, ток I_{T1} в 1-м тиристоре, напряжения U_{T1} на 1-м плече моста. Исходные данные для расчетов задаются в *т*-файле.

Расчеты электромагнитных процессов в рассматриваемой мостовой схеме выпрямления выполнены для номинального режима работы высоковольтного преобразователя частоты ТПЧ2-6-03 вентилятора главного проветривания рудника «Северный Глубокий» [4]. Входной каскад указанного преобразователя образован двумя 6-пульсными тиристорными выпрямителями, запитанными каждый от своего трансформатора с образовани-

ем 12-пульсной схемы выпрямления. В указанном преобразователе каждый выпрямитель в номинальном режиме имеет мощность около 2 МВт, напряжение питания 6 кВ при частоте 50 Гц, угол управления 30 эл. град.*. Индуктивность фаз 0.003251 Гн (суммарная индуктивность трансформаторов ТСЗП-2500 и ТРДНС-25000/35/6). В нагрузке индуктивность равна 0.03 Гн (индуктивность сглаживающего дросселя в преобразователе частоты), активное сопротивление 24 Ом. В выпрямителе в каждом плече использованы 4 тиристора типа 5STP08G6500, соединенных последовательно. Каждый тиристор зашунтирован *RC*-цепью с активным сопротивлением 88 Ом и емкостью 1.47 мкФ. В модели 4 последовательно включенных тиристора заменены эквивалентным тиристором с соответствующим пересчетом параметров. Индивидуальные RC-цепи тиристоров также заменены эквивалентными RC-цепями с активным сопротивлением 352 Ом и емкостью 0.3675 мкФ. Внешние RC-цепи в рассматриваемом случае отключены. Выключение плеча моста с несколькими последовательно включенными тиристорами начинается с выключения какоголибо одного тиристора, имеющего наименьший обратный ток. По данным экспериментальных исследований в рассматриваемом преобразователе обратный ток тиристоров в заданном режиме

^{* 1} электрический градус при частоте переменного тока 50 Гц \approx 55.6 мкс.



Puc. 8. Напряжения и токи фаз 6-пульсного выпрямителя в преобразователе ТПЧ2-6-03 *Fig. 8.* Phase voltages and currents of the 6-pulse rectifier in the TFC2-6-03 converter



Puc. 9. Токи в 1-м тиристоре и *RC*-цепи, напряжение 1-го тиристора и мощности потерь моста Fig. 9. Currents in the first thyristor and its *RC* circuit, voltage across the first thyristor, and bridge power loss

работы составляет в среднем 40 А – эта величина задана в расчете. Результаты расчета номинального режима работы выпрямителя в преобразователе частоты ТПЧ2-6-03 представлены на рис. 8–10.

На рис. 8 изображены напряжения фаз U_1-U_3 источника питания и токи фаз источника I_1-I_3 . На рис. 9 изображены токи I_{T1} и I_{RC1} тиристора и защитной RC-цепи в 1-м плече моста, напряжение U_{T1} первого плеча, мощность потерь энергии P_{RC} в индивидуальных RC-цепях, мощность $P_{\text{тир}}$ потерь энергии в тиристорах. На рис. 10: I_{T1} – обратный ток в запирающемся тиристоре, U_{T1} – восстанавливающееся напряжение.

Из рис. 9 видно, что суммарная мощность потерь энергии в 6-пульсном выпрямителе преобразователя ТПЧ2-6-03 в номинальном режиме составляет 10.2 кВт.

Модель системы с 6-пульсным выпрямителем и *RC*-цепями с учетом резонансных явлений. Известно, что при переключениях тиристоров возникают коммутационные искажения напряжений трехфазного питающего источника. Во многих случаях напряжения сетей искажаются также из-за резонансных явлений. Для примера на рис. 11 представлена осциллограмма напряжений и токов сети 6 кВ, питающей 12-пульсный преобразователь частоты ТПЧ2-6-03 в приводе вентилятора рудника «Северный Глубокий». I_{T1}, A 20
0
-20
-40 U_{T1}, B 0
-2000
-400
-4000
-6000
0.0448
0.0449
0.045
t, c





Рис. 11. Осциллограмма токов и напряжений сети 6 кВ в цепи питания ТПЧ2-6-03 *Fig. 11.* Oscillogram of currents and voltages in the 6 kV network of the power supply circuit for TFC2-6-03

Как видно из рис. 11, в сети 6 кВ, 50 Гц существуют колебания с частотой 9–10 кГц.

Для анализа указанных процессов разработана модель системы с 6-пульсным тиристорным выпрямителем и трехфазной электрической сетью, в которой имеются индуктивности источника питания и «паразитные» емкости фаз. Схема модели представлена на рис. 12. Она отличается от схемы на рис. 7 тем, что индуктивность каждой фазы состоит из двух частей – одна часть содержится в фазах трехфазного источника напряжения, другая часть выделена в виде отдельной индуктивности L_{f1} . К трехфазному источнику подключены «паразитные» емкости $C_{p1}-C_{p3}$ и активные сопротивления $R_{p1}-R_{p3}$.

Расчет выполнен для номинального режима работы преобразователя ТПЧ2-6-03. Индуктивность фаз трехфазного источника питания равна 0.000871 Гн (индуктивность трансформатора ТРДНС-25000/35/6). $L_{f1} = 0.00238$ (индуктивность трансформатора ТСЗП-2500). $C_{p1} = C_{p2} = C_{p3} =$

.....

= 0.6 мкФ, $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = 6$ Ом. Остальные параметры приняты такими же, как при расчете по схеме на рис. 7. Результаты расчета приведены на рис. 13, где изображены: U_{s1} – напряжение фазы источника питания, Ip1 – ток фазы «паразитной» RC-цепи, U1 – напряжение фазы тиристорного моста. Как видно из рисунка, в напряжении источника питания при скачкообразных коммутационных изменениях напряжения возникают колебания сравнительно высокой частоты (9-10 кГц). Эти колебания обусловлены резонансом индуктивностей источника питания и «паразитных» емкостей. При увеличении активных сопротивлений «паразитных» контуров эти колебания сравнительно быстро затухают. При уменьшении этих сопротивлений возникает опасность возникновения медленно затухающих колебаний, которые поддерживаются периодическими коммутациями тиристоров.

Выводы. Разработан комплекс математических моделей в MatLab, позволяющий подбирать *RC*-цепи, рассчитывать коммутационные перена-

.....



Рис. 12. Схема модели системы с трехфазной сетью с «паразитными» емкостями и тиристорным 6-пульсным выпрямителем Fig. 12. Diagram of the model with a three-phase mains with «stray» capacitances



Рис. 13. Напряжения и токи в системе с 6-пульсным тиристорным выпрямителем и сетью при учете в ней резонансных явлений
 Fig. 13. Voltages and currents in a system with a 6-pulse thyristor rectifier and a network, taking into account resonance phenomena

пряжения и потери энергии в тиристорных преобразователях.

Разработаны математические модели, позволяющие анализировать резонансные явления в электросетях, питающих тиристорные преобразователи. Результаты расчетов на моделях сопоставимы с экспериментальными осциллограммами переключения тиристоров.

Список литературы

1. Waldmeyer J., Backlund B. Application Note 5SYA 2020-02. Design of RC snubbers for phase control applications. URL: https://search.abb.com/library/Download. aspx?DocumentID=5SYA2020&LanguageCode=en&Docu mentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A%20 (дата обращения 03.05.2022). LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 57-65

2. Забровский С. Г. Перенапряжения в системах с тиристорными преобразователями. Кишинев: Штиница, 1979. 127 с.

3. Doc. No. 5SYA1006-09 Mar. 20 Phase Control Thyristor 5STP 08G6500. URL: https://search.abb.com/ library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1006&Langua geCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch%20%20 (дата обращения 03.05.2022). 4. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов; под ред. Крутякова Е. А. СПб.: Силовые машины: Электросила, 2004. 252 с.

Информация об авторах

Адалев Алексей Сергеевич – канд. техн. наук., ведущий инженер-конструктор АО «Силовые машины».

E-mail: adalev_as@power-m.ru

Глушаков Василий Васильевич – инженер-конструктор 1-й категории АО «Силовые машины». E-mail: glushakov_vv@power-m.ru

Карзунов Роман Анатольевич – ведущий инженер-конструктор АО «Силовые машины». E-mail: karzunov_ra@power-m.ru

Пронин Михаил Васильевич – ведущий эксперт АО «Силовые машины», д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: pronin_mv@power-m.ru

Федоров Николай Игоревич – инженер 3-й категории АО «Силовые машины». E-mail: fedorov_ni@power-m.ru

References

1. Waldmeyer J., Backlund B. Application Note 5SYA 2020-02. Design of RC snubbers for phase control applications. URL: https://search.abb.com/library/Download. aspx?DocumentID=5SYA2020&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionI d=A%20 (data obrashcheniya 03.05.2022).

2. Zabrovskij S. G. Perenapryazheniya v sistemah s tiristornymi preobrazovatelyami. Kishinev: SHtinica, 1979. 127 s.

3. Doc. No. 5SYA1006-09 Mar. 20 Phase Control Thyristor 5STP 08G6500. URL: https://search.abb.com/ library/Download.aspx?DocumentID=5SYA1006&Langu ageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch%20%2 0 (data obrashcheniya 03.05.2022).

4. Pronin M. V., Voroncov A. G., Kalachikov P. N., Emel'yanov A. P. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primenenie) / pod red. Krutyakova E. A. SPb.: Silovye mashiny: Elektrosila, 2004. 252 s. (In Russ.).

Information about the authors

Alexei S. Adalev – Cand. Sci. (Tech.), Leading design engineer, JSC «Power machines». E-mail: adalev as@power-m.ru

Vasiliy V. Glushakov – Design engineer, JSC «Power machines». E-mail: glushakov_vv@power-m.ru

Roman A. Karzunov – Leading design engineer, JSC «Power machines». E-mail: karzunov ra@power-m.ru

Mikhail V. Pronin – Leading expert, JSC «Power machines», Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: pronin_mv@power-m.ru

Nikolay I. Fedorov – Engineer, JSC «Power machines». E-mail: fedorov_ni@power-m.ru

Статья поступила в редакцию 12.05.2022; принята к публикации после рецензирования 29.05.2022; опубликована онлайн 13.09.2022.

Submitted 12.05.2022; accepted 29.05.2022; published online 13.09.2022.