

УДК 62-83:621.314.5

В.Ю. Островлянчик, Д.Е. Модзелевский

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТИРИСТОРА

Цель данной работы получить аналитическое описание тиристора, объясняющее эффекты, существующие в тиристорном преобразователе (ТП) в зоне малых токов, возможные аварийные режимы, возникающие в ТП при неправильном управлении. В дальнейшем это аналитическое описание будет использовано в расчетах различных схем тиристорных преобразователей, для анализа работы ТП и создания системы управления.

Характер нагрузки тиристорного преобразователя непосредственно влияет на внутренние электромагнитные процессы. Существующие модели с достаточной степенью точности описывают процессы преобразования для активной нагрузки и нагрузки, содержащей противовоздействие э.д.с. Нагрузка определяет законы управления и построение структуры тиристорного преобразователя. Исследования показали, что при активно-индуктивной нагрузке со значительной индуктивностью использование известных моделей тиристоров приводит к ошибочным результатам. Существуют ситуации, когда без применения специальных мер в принципе невозможно открыть тиристорный преобразователь на нагрузку, обладающую большой индуктивностью.

В качестве объекта управления, содержащего большую индуктивность, в задачах электропривода шахтных подъемных установок может выступать асинхронный двигатель при работе от источника постоянного тока в режиме динамического торможения, ротор синхронного двигателя, двигатель постоянного тока (ДПТ) при регулировании потока возбуждения или тока якоря, а также электропривод системы Г-Д.

Существует большое число методов анализа установившихся и переходных процессов в вентильных цепях, однако наиболее широкое распространение получил метод кусочно-линейной аппроксимации [1]. Проведенный анализ источников показал, что предлагаемые подходы не дают адекватной картины переходных процессов в тиристорном преобразователе при работе в зоне малых токов и при работе на индуктивную нагрузку большой мощности.

Рассмотрим статическую вольт - амперную характеристику тиристора, представленную на рисунке 1 [2,3]. Характеристики соответствует двум статически устойчивым состояниям тиристора – открыт (участок d-e, проводящее состояние) и закрыт (участок a-b, состояние большого активного сопротивления). При токе управления равной току спрямления $I_{y,c}$ величина пробивного напряжения и изгиб характеристики уменьшаются

до характеристики открытого состояния [2].

Участок b-c характеризует лавинообразный процесс включения тиристора [3], изображенный пунктирной линией. После этого процесса тиристор переходит в открытое состояние и, при наличии тока в тиристоре больше тока удержания I_{yd} , будет находиться на ней сколь угодно долго, не зависимо от величины тока управления.

Процесс включения и отключения, отмеченный пунктирными линиями, характеризуется динамическими свойствами тиристора. На статической характеристике состояние тиристора в данном режиме находится в области ограниченной фигуруй a-b-c.

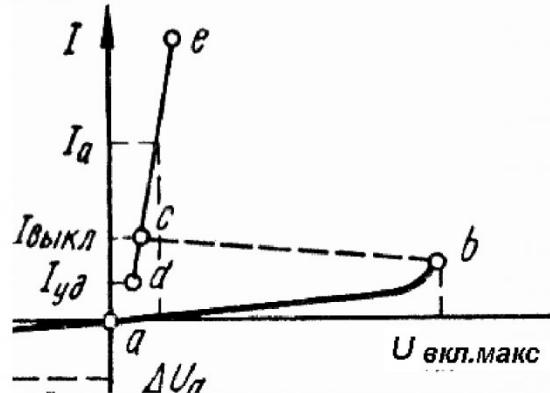


Рис. 1. Прямые ветви статической вольт-амперной характеристики тиристора

Очевидно, что тиристор описывается нелинейным активным сопротивлением R_{VS} , зависящим от формы и величины тока i_{VS} и напряжения U_{VS} на выводах анод-катод тиристора, тока управления i_y и времени t , а также от внутреннего состояния S (0 – открыт, 1 – закрыт), которое в общем виде может быть представлено выражением:

$$R_{VS} = f(U_{VS}(t), i_{VS}(t), i_y(t), t, S). \quad (1)$$

На основании выражения (1) модель работы тиристора можно представить в виде:

$$R_{VS} = \begin{cases} R_{a-f} = R_{закр}, & i_{VS} \leq 0 \text{ или } U_{VS} < 0, \\ R_{a-b} = R_{закр}, & U_{VS} \geq 0 \text{ и } S = 0, \\ R_{d-e} = R_{откр}, & U_{VS} \geq 0 \text{ и } i_{VS} > I_{yd} \text{ и } S = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где i_{VS} – ток в тиристоре,

U_{VS} – напряжение на выводах анод-катод тиристора,

I_{yd} – ток удержания включенного состояния тиристора,

$I_{вкл}$ – ток перехода во включенное состояние,

$R_{закр}$ – сопротивление тиристора в закрытом состоянии,

$R_{откр}$ – сопротивление тиристора в открытом состоянии,

S – внутреннее состояние (0 – открыт, 1 – закрыт) – может быть представлено выражением (3):

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{VS} < 0 \text{ или } i_{VS} < I_{y\delta}, \\ 1, & \text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } i_y = I_{y.c}, \\ S, & \text{во всех остальных случаях,} \end{cases} \quad (3)$$

где i_y – ток управления,

$I_{y.c}$ – ток управления равный току спрямления характеристики тиристора.

Выражения (2) и (3) не учитывают динамических процессов при включении и отключении тиристора.

Переход во включенное состояние будет производиться только при наличии тока включения $I_{вкл}$, обратный переход будет иметь место при отсутствии тока удержания $I_{y\delta}$ [4].

Во время, когда на тиристор подан управляющий импульс, его характеристика спрямляется, и становится соответствовать линейному участку а-д. Этим процессам можно поставить в соответствие следующие выражения (4) и (5).

$$R(t_{откл имп}) = R_1 t_{откл имп}, \text{ если } i_{VS} > 0 \quad (4)$$

$$\text{и } (U_{VS}/R_{закр} < i_{VS} < I_{вкл}) \text{ и } S = 0,$$

$$R_{a-d} = R_{включ}, \quad (5)$$

$$\text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } (i_y = I_{y.c})$$

где R_1 – коэффициент пропорциональности, определяющий скорость роста активного сопротивления, является настроенным коэффициентом модели и зависит от конструктивного исполнения тиристора,

$R_{включ}$ – сопротивление тиристора в момент включения при поданном управляющем импульсе, t – время,

$t_{откл имп}$ – время, отсчитываемое от момента снятия управляющего импульса.

На основании вышеизложенного, модель тиристора можно представить следующими соотношениями:

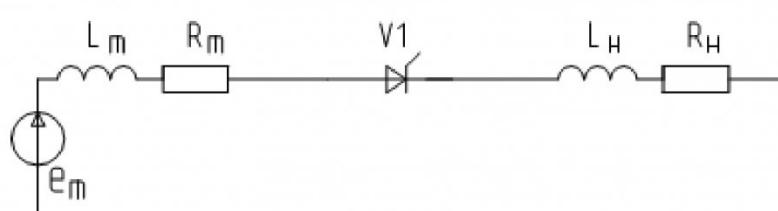


Рис. 2. Эквивалентная расчетная схема однофазного однополупериодного выпрямителя

$$R_{VS} = \begin{cases} R_{a-f} = R_{закр}, & \text{если } i_{VS} \leq 0 \text{ или } U_{VS} < 0, \\ R_{a-b} = R_{закр}, & \text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } S = 0 \\ \text{и } i_y = 0 \text{ и } i_{VS} \leq U_{VS}/R_{закр}, \\ R_{d-e} = R_{откр}, & \text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } i_{VS} > I_{y\delta} \text{ и } S = 1, \\ R_{a-d} = R_{включ}, & \text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } i_y = I_{y.c}, \\ R(t_{откл имп}) = R_1 t_{откл имп}, & \text{если } i_{VS} > 0 \\ \text{и } (U_{VS}/R_{закр} < i_{VS} < I_{вкл}) \text{ и } S = 0. \end{cases} \quad (6)$$

В этом случае выражение для состояния тиристора будет выражаться

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } U_{VS} < 0 \text{ или } i_{VS} < I_{y\delta}, \\ 1, & \text{если } U_{VS} \geq 0 \text{ и } i_{VS} \geq I_{вкл}, \\ S, & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (7)$$

Модель тиристора при работе одного тиристора в однополупериодной схеме выпрямления представлена на рис. 2.

Для данной схемы можно поставить в соответствие выражение

$$(L_T + L_H) \frac{di}{dt} + [R_T + R_{mup} + R_H]i = e_T(t), \quad (8)$$

где i – ток цепи,

R_T, R_{mup}, R_H – активные сопротивления трансформатора, тиристора и нагрузки соответственно,

L_T, L_H – индуктивные сопротивления трансформатора и нагрузки,

$e_T(t)$ – э.д.с. трансформатора, принятое синусоидальным.

Решая это уравнение для моментов, когда сопротивление тиристора не зависит от времени, получаем выражение

$$i(t) = \frac{U_{max}}{Z} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \arctg \frac{\omega L}{R}\right) + C_n \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad t_n \leq t < t_{n+1}, \quad (9)$$

где t_n, t_{n+1} – время начала и конца периода постоянства сопротивления тиристора,

Сравнительная таблица оценки отклонения модели и эксперимента

Структура модели	Среднеквадратичное отклонение тока в эксперименте открывания тиристора (оптимизация модели)	Среднеквадратичное отклонение тока в эксперименте закрывания тиристора (проверка модели)
Стандартное представление о тиристоре, выражения (2)-(3)	76,7 мА	282 мА
Модель с двумя коэффициентами	52,8 мА	270 мА
Модель с двумя коэффициентами оптимизация по эксперименту закрывания	144 мА	14,4 мА
Модель с тремя коэффициентами	17,46 мА	15,94 мА

C_n – постоянная интегрирования, определяется значением тока в момент t_n ,

ω – круговая частота сети,

U_{max} – амплитуда напряжения сети,

R – активное сопротивление цепи,

L – индуктивное сопротивление цепи,

$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ – модуль комплексного сопротивления цепи.

Для случая нелинейного сопротивления тиристора зависящего от времени получим выражение

$$i(t) = \frac{U_{max}}{L} e^{-\frac{R}{L}t - \frac{R_1}{2L}t^2} \times \left(\int e^{\frac{R}{L}t} e^{\frac{R_1}{2L}t^2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) dt + C \right). \quad (10)$$

Функциональная структура полученной модели (рис. 3) представлена совокупностью трех структурных блоков: модель нагрузки (8), модель состояния тиристора (6) и нелинейный элемент (7).

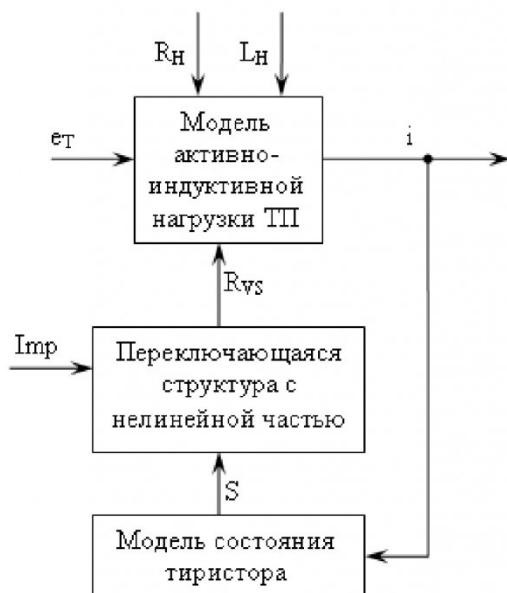


Рис. 3. Функциональная структура модели тиристора

Численно моделируя процесс, описываемый дифференциальным уравнением (8) по формулам (9) и (10) для различных участков, определяющих сопротивление тиристора формулам (2)-(3) и (6)-(7) находим величины токов и напряжений в электрической цепи. Результаты моделирования для оценки адекватности сравнивались с результатами эксперимента, в котором, при подаче импульсов разной продолжительности на тиристор, фиксировались величины напряжения и тока.

При настройке модели использована величина среднеквадратичного отклонения тока, как наиболее информативного параметра. Настройка и проверка адекватности модели производилась следующим образом: коэффициенты выбранной структуры оптимизировались по условию минимума среднеквадратичного отклонения модельного и реального токов в эксперименте открывания тиристора на индуктивную нагрузку. Затем проверялось работа модели по данным эксперимента принудительного закрывания тиристора. Результаты исследований сведены в таблицу, из которой видно, что лучший результат с наименьшим отклонением в четвертой строке, соответствующей выражениям (6)-(7). Минимального отклонения во всех экспериментах удалось добиться в модели с тремя коэффициентами ($R_{откр}$, $R_{включ}$ и R_1), когда в модель вводится коэффициент, определяющий сопротивление тиристора $R_{включ}$.

Выводы.

1. Предложена модель тиристора, позволяющая рассматривать структуру ТП как составную часть электропривода, что позволяет производить анализ и синтез систем управления ТП с характеристиками, независимыми от вида нагрузки.

2. Предложенное аналитическое описание тиристора позволяет получить адекватную и унифицированную математическую модель и его можно использовать для рассмотрения различных схем выпрямления.

3. На основании полученных результатов могут быть получены алгоритмы работы системы импульсно-фазового управления, линеаризующие характеристику тиристорного преобразователя в зоне малых токов и исключающие аварийные ситуации, связанные со значительными перенапряжениями.

4. Линейность статических и динамических характеристик позволяет улучшить работу ТП в замкнутых системах управления и энергетические показатели ТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Перельмутер В.М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В.М. Перельмутер, В.А. Сидоренко – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
3. Основы промышленной электроники. / Ю.А. Исаков [и др.] – Киев: Техника, 1976. – 544 с.
4. Модзелевский Д.Е. Анализ процесса включения тиристорного преобразователя при работе на индуктивную нагрузку большой мощности // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. С. 447-448.

□ Авторы статьи:

Островлянчик
Виктор Юрьевич,
докт.техн.наук, профессор, зав.
каф.автоматизированного электропривода и
промышленной электроники (Сибирский го-
сударственный индустриальный
университет),
тел. (384-3) 74-03-88, e-mail: vik-
tor.ostrovlyanchik@yandex.ru, niaep@kuz.ru

Модзелевский
Дмитрий Евгеньевич,
старший препод. каф. автоматизиро-
ванного электропривода и промыш-
ленной электроники (Сибирский госу-
дарственный индустриальный
университет).
Тел. (3843) 74-89-87, 8-923-632-94-52,
E-mail: Dima010@mail.ru