

УДК 62-83:621.314.5

## **Моделирование электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе с учетом нелинейных динамических свойств тиристора\***

**Д.Е. МОДЗЕЛЕВСКИЙ, В.Ю. ОСТРОВЛЯНИЧК**

В работе представлены вопросы построения модели и синтеза системы управления тиристорного преобразователя электрической энергии, являющегося основным исполнительным элементом в системе электропривода, рассмотрены вопросы моделирования и использования комплекса программ при разработке подобных систем. В качестве примера рассматривается система электропривода шахтной подъемной установки.

**Ключевые слова:** тиристорный преобразователь, модель, тиристор, шахтная подъемная установка, реверс тока, двигатель.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Статический преобразователь электрической энергии является основным звеном в системах электропривода. От его характеристик и быстродействия зависят выходные характеристики и качество управления системой электропривода в целом.

Применение быстродействующих микропроцессорных устройств для управления такими преобразователями позволяет реализовать гибкие алгоритмы формирования импульсов в соответствии с заданной фазой или законом управления, обеспечивающие надежную работу при изменениях параметров питающей сети, характера и процессов, протекающих в нагрузке, а также производить учет особенностей управления и нелинейностей в самом преобразователе.

Методики технической диагностики и идентификации параметров объектов управления позволяют предотвратить возникновение нештатной ситуации, сократить время простоя и обеспечить надежную работу оборудования.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Для электроприводов большой мощности и специальных систем управления возникают сложности с открыванием тиристорного преобразователя (ТП) на индуктивную нагрузку, также при работе на противо ЭДС. Для таких систем необходимо разработать законы управления, которые могут быть реализованы в микропроцессорных системах импульсно-фазового управления.

В работах по преобразовательной технике процесс включения и отключения представляется переходным процессом, по которому производится пояснение всех этапов, происходящих в полупроводниковом элементе [1, 2]. В большинстве случаев приходят к выводу, что тиристор можно заменить статической моделью с линейной аппроксимацией вольт-амперной характеристики, однако требуется уточнение при работе активно-индуктивную нагрузку большой мощности.

Воспользуемся вторым приближением аналитического описания тиристорного преобразователя [3]. В этом случае разность ЭДС фаз трансформатора, поочередно вступающих в ра-

---

\* Статья получена 1 февраля 2012 г.

боту, будет смещено на  $n\pi/m$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$  – номер интервала проводимости,  $m$  – число фаз. Для трехфазной мостовой схемы ( $m = 3$ ) при симметричном синусоидальном напряжении фаз без учета коммутации подводимое к нагрузке напряжение можно получить в виде ряда:

$$U_d(t) = \sqrt{3}U_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{n\pi}{3}\right), \text{ при } t_n < t < t_{n+1} \text{ для } n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $U_{\max}$  – амплитуда фазного напряжения трансформатора;  
 $t$  – время;  
 $t_n$  – моменты времени переключения напряжений:

$$t_n = t_{\text{е.к.}n} + \frac{\alpha(t)}{\omega} = \frac{\frac{\pi}{6} + \frac{n\pi}{3} + \alpha(t)}{\omega}, \text{ для } n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где  $t_{\text{е.к.}n}$  – моменты естественной коммутации тиристорov;

$\alpha(t)$  – величина угла управления, задаваемая из системы управления преобразователем.

Система уравнений для определения эквивалентного активного сопротивления тиристора  $R_V$  с учетом нелинейности, получаемый из модели, рассмотренной в [4] и [5], представлен выражениями (3) и (4).

$$R_V = \begin{cases} R_3, & \text{если } i_V \leq 0 \text{ или } U_V < 0, \\ R_3, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } i_y = 0 \text{ и } i_V \leq U_V/R_3, \\ R_0, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } i_V > I_{\text{уд}} \text{ и } S = 1, \\ R_B, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } S = 0 \text{ и } i_y = I_{\text{у.с}}, \\ R(t_{\text{от}}) = K_1 t_{\text{от}}, & \text{если } i_y = 0 \text{ и } (U_V/R_3 < i_V < I_B) \text{ и } S = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $i_V$  – ток в тиристоре;

$U_V$  – напряжение на выводах анод-катод тиристора;

$I_{\text{уд}}$  – ток удержания включенного состояния тиристора;

$I_B$  – ток перехода во включенное состояние;

$i_y$  – ток управления;

$I_{\text{у.с}}$  – ток управления равный току спрямления характеристики тиристора;

$R_3$  – сопротивление тиристора в закрытом состоянии;

$R_0$  – сопротивление тиристора в открытом состоянии;

$R_B$  – сопротивление тиристора в момент включения при поданном управляющем импульсе;

$R(t_{\text{от}})$  – нелинейная функция, введенная в модель работы тиристора для описания нелинейных динамических свойств;

$K_1$  – коэффициент пропорциональности, получаемый при настройке модели тиристора;

$t_{\text{от}}$  – время, отсчитываемое от момента снятия управляющего импульса;

$S$  – внутреннее состояние тиристора (0 – закрыт, 1 – открыт) – может быть представлено выражением (4):

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } U_V < 0 \text{ или } i_V < I_{\text{уд}}, \\ 1, & \text{если } U_V \geq 0 \text{ и } i_V \geq I_B, \\ S, & \text{во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (4)$$

Блок памяти пар управляющих импульсов работает в соответствии со следующим логическим выражением:

$$\overline{Imp}^* = \overline{f_P(Imp)}, \quad (5)$$

$$Imp^*_i = 1, \text{ если } (Imp_i = 1 \cap Imp_{i+1} = 0) \cup (Imp_i^* = 1 \cap \sum Imp = 0),$$

где  $i = 1..6$ ,

$Imp$  – вектор управляющих импульсов, формируемых системой импульсно-фазового управления.

Сигнал переключения нелинейной структуры тиристора формируется в соответствии со следующим выражением:

$$\sum Imp = f_{\Sigma}(\overline{Imp}) = \bigcup (Imp_i = 1 \cap Imp_{i+1} = 0). \quad (6)$$

Сигнал, формируемый коммутатором напряжения на основании выражения (1), можно представить в виде выражения:

$$\begin{aligned} U_d^* &= f_U(U_{AB}, U_{CA}, U_{BC}, \overline{Imp}^*) = \\ &= U_i \in \{U_{AB}, -U_{CA}, U_{BC}, -U_{AB}, U_{CA}, -U_{BC}\} | Imp^*_i = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $U_{AB}, U_{CA}, U_{BC}$  – синусоидальные напряжения питания тиристорного преобразователя, генерируемые, либо измеряемые на входе тиристорного преобразователя.

Блок выбора моста осуществляет реверсирование знака напряжения по сигналам задания на мост из логического переключающего устройства:

$$U_d = f_M(U_d^*, TM1, TM2) = \begin{cases} U_d^*, & \text{если } TM1 = 1, TM2 = 0; \\ -U_d^*, & \text{если } TM1 = 0, TM2 = 1; \\ 0, & \text{если } TM1 = 0, TM2 = 0; \end{cases} \quad (8)$$

где  $TM1, TM2$  – логические сигналы выбора соответствующего моста.

Активно-индуктивная нагрузка ТП описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (-(R + R_V)i + U_d - E), \quad (9)$$

где  $E$  – противо э.д.с. нагрузки,

$i$  – ток нагрузки,

$R, L$  – активное и индуктивное сопротивления нагрузки тиристорного преобразователя, в данном случае обмотки возбуждения или якоря электрической машины.

В общем виде ток  $i$  может быть описан выражением:

$$i = f_I(U_d, R_V, R, L, E). \quad (10)$$

Структуру модели тиристорного преобразователя, используя выражения (3)–(10), можно представить в виде, приведенном на рис. 1.

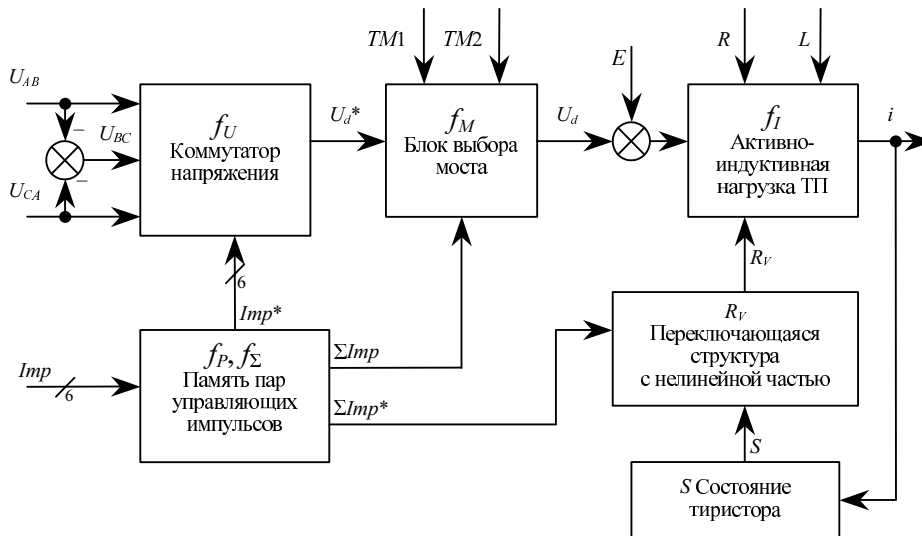


Рис. 1. Алгоритмическая структура модели тиристорного преобразователя

Использование представленной модели в качестве наблюдателя позволяет производить диагностику тиристорного преобразователя. Алгоритм функционирования наблюдателя и определения нештатных ситуаций может быть представлен следующей схемой (рис. 2). На схеме блок модели ТП выполняет функции модели, представленной на рис. 1. Определяя рассогласование сигналов наблюдателя  $U_{dM}(t)$  и  $I_{dM}(t)$  из модели ТП, рассчитываемых в реальном времени по формулам (3)–(10), и реально измеренных величин напряжения и тока в нагрузке  $U_d$  и  $I_d$ , можно определить моменты отклонений в работе тиристорных и тракта формирования управляющих импульсов.

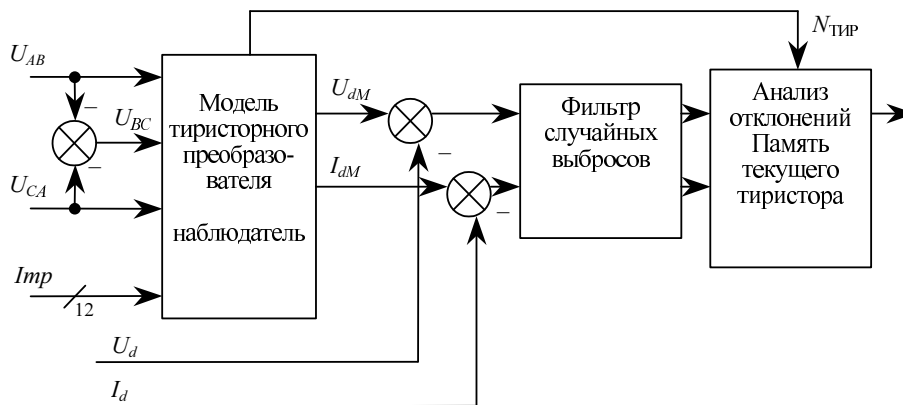


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма определения нештатных ситуаций

В соответствии с разработанным алгоритмом ТП и наблюдателя разработан комплекс программ, созданный для исследования полученной математической модели, а также для задач управления электроприводом.

Структура программного комплекса состоит из двух аппаратно распределенных частей: управляющая программа, выполняемая в контроллере, и среда визуализации и моделирования (рис. 3). Среда визуализации и моделирования располагается на устройстве, не относящемся к технологическому процессу управления электроприводом. При этом обеспечивается автономность частей программного комплекса.



Рис. 3. Структурная схема комплекса программ

Среда моделирования и визуализации позволяет пользователю оперировать с полученными данными: графически представить переходные процессы, провести измерения по графикам и оценить качество переходных процессов, изменить параметры управляющей программы, визуализации или модели, провести анализ данных с использованием среды моделирования. В системе визуализации есть возможность формировать воздействия различной формы и подавать их на входы модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге следует отметить, что проведенное исследование и разработанная математическая модель позволила реализовать тиристорный преобразователь при работе на как индуктивную нагрузку большой мощности, так и при работе на э.д.с. двигателя, и создать алгоритмы управления тиристорным преобразователем. Разработанные системы управления тиристорными преобразователями внедрены на трех шахтных подъемных установках: с системой ТП-Д с реверсом поля двигателя мощностью 2250 кВт, с асинхронным двигателем с фазным ротором и с системой Г-Д мощностью 2000 кВт. В системах электропривода обеспечена линейность тиристорного преобразователя и достигнуто требуемое качество управления. Разработанный комплекс программ поставляется совместно с цифровым устройством автоматического управления электроприводом подъемной машины (ЦУАЭ ПМ), производимым ООО «НИИ АЭМ СибГИУ».

Выделим следующие преимущества разработанного комплекса программ: тесная интеграция с устройством управления, модульность и расширяемость, гибкая система настройки и построения модели, мультиплатформенность (возможность использования на различных устройствах управления), низкие системные требования.

В результате можно сделать выводы.

1. Предложена модель тиристорного преобразователя, позволяющая рассматривать структуру ТП как составную часть электропривода, что позволит производить анализ и синтез систем управления ТП, характеристики которого не зависят от вида нагрузки.

2. Предложенное аналитическое описание тиристорного преобразователя позволяет получить адекватную математическую модель и его можно использовать для рассмотрения различных схем тиристорных преобразователей.

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

4. Лианеризация статических и динамических характеристик позволяет оптимизировать работу ТП в замкнутых системах управления и энергетические показатели ТП.

5. Представленная модель при расчете в реальном времени позволяет диагностировать работу преобразователя и предотвращать развитие аварийных ситуаций.

6. Разработан комплекс программ, выполняющий функции как управления электроприводом, так и моделирования, диагностики и оптимизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Перельмутер В.М.** Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В.М. Перельмутер, В.А. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с., ил.

[2] **Католиков В.Е.** Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема / В.Е. Католиков, А.Д. Динкель, А.М. Седунин. – М.: Недра, 1990. – 382 с.: ил.

[3] **Маевский О.А.** Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с., ил.

[4] **Модзелевский Д.Е.** Анализ электромагнитных процессов работы тиристора. Построение эмпирической математической модели работы тиристора, объясняющей характер работы тиристора в зоне малых токов / Д.Е. Модзелевский; под общ. ред. Л.П. Мышляева // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых; СибГИУ. – Новокузнецк, 2009. – Вып. 13. – Ч. 4. – С. 433–437.

[5] **Модзелевский Д.Е., Островляничик В.Ю.** Математическое моделирование тиристорного преобразователя с учетом нелинейности тиристора **Модзелевский Д.Е., Островляничик В.Ю.** // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 6 (88). – С. 72–75.

*Модзелевский Дмитрий Евгеньевич*, старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и промышленной электроники Сибирского государственного индустриального университета. Основное направление научных исследований: микропроцессорные системы управления электроприводом, полупроводниковые преобразователи. Имеет более 20 публикаций, в том числе одну в журнале, рекомендованном ВАК. E-mail: dima010@mail.ru

*Островляничик Виктор Юрьевич*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и промышленной электроники Сибирского государственного индустриального университета. Основное направление научных исследований: системы управления электроприводом, информационные системы. Имеет более 100 публикаций, в том числе 1 монографию. E-mail: niamaem@kuz.ru

**Modzelevskiy D.E., Ostrovlyanchik V.Y.**

*Modeling of electromagnetic processes in the thyristor converter, taking into account the nonlinear dynamical properties of the thyristor*

The work presents the problems of constructing the model and the synthesis of thyristor converter control systems of electrical energy, which is the main element of the executive of the electric system, the issues of modeling and the use of complex software in the design of such systems. As an example, consider a system of electric drive of the lift mine installation.

**Key words:** thyristor converter, model, thyristor, lift mine installation, current reverse, motor.