

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВАХ МОЩНЫХ ТИРИСТОРОВ В ПРОВОДЯЩЕМ СОСТОЯНИИ

В.А. Мартыненко; В.В. Сорокин; А.А. Хапугин; Г.Д. Чумаков

ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск

E-mail: [martin@moris.ru](mailto:martin@moris.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований статических и динамических вольтамперных характеристик мощного высоковольтного тиристора в проводящем состоянии в широком диапазоне температур с использованием цифровой и компьютерной обработки результатов измерений. На основе этих исследований определены нелинейные уравнения и параметрические коэффициенты изотермических ВАХ с помощью которых разработчики преобразовательных устройств могут производить уточненные расчеты прямых падений напряжения и скорости распространения включенного состояния в тиристоре в зависимости от величины протекающего тока и температуры полупроводниковой структуры. Описаны критерии выбора допустимой амплитуды ударного тока тиристора при различных температурах.

**Ключевые слова:** мощный высоковольтный тиристор, проводящее состояние, вольтамперная характеристика, измерение, параметрический коэффициент, амплитуда ударного тока.

В последнее время достигнут высокий уровень цифровой и компьютерной обработки результатов измерений силовых полупроводниковых приборов (СПП). В связи с этим появились новые возможности создания эффективной информационной системы параметров и характеристик СПП, которые расширяют наши знания о поведении СПП в различных режимах работы и способствуют правильному выбору полупроводниковых ключей для энергосберегающих преобразовательных устройств.

В данной работе эти возможности продемонстрированы на примере измерения и обработки прямых вольтамперных характеристик в открытом состоянии (ВАХ ОС) высоковольтных таблеточных тиристоров Т353-800.

Для измерения ВАХ ОС использовалась стандартная установка для измерения импульсного напряжения в открытом состоянии, которая позволяла пропускать одиночные импульсы тока через испытуемый прибор с амплитудой до 60 кА. Импульс тока однополярный, синусоидальный, длительностью 10 мс. При помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП), запрограммированного на измерения ВАХ ОС, на экране монитора персонального компьютера (ПК) регистрируются временные диаграммы тока и напряжения на тиристоре, а также его динамическая ВАХ, полученная на этапах нарастания и спада импульса тока.

На рисунке 1 представлено семейство динамических вольтамперных характеристик тиристора Т353-800 в открытом состоянии, измеренных при комнатной температуре в диапазоне амплитуд токов от 2 до 17 кА. Из этого рисунка можно выделить несколько характерных типов ВАХ.

Первый тип – прямые ВАХ, измеренные при очень больших амплитудах тока (режим ударных токов). Эти ВАХ имеют форму гистерезиса с сильным раздвоением характеристики, связанным с разогревом полупроводниковой структуры протекающим током. Плотность тока в Si-структуре прибора в этом случае может достигать величины до  $1000 \text{ А/см}^2$  и более.

Второй тип – прямые ВАХ, измеренные при токах до 5 кА. Плотность тока в этом случае соответствует рабочему току, длительно протекающего через прибор при

эксплуатации ( $j \leq 250 \text{ А/см}^2$ ). Эти ВАХ не имеют раздвоения и являются изотермическими.

Третий тип – динамические участки ВАХ на малых токах (до 1 кА), характеризующие нестационарные процессы распространения включенного состояния в тиристоре после подачи импульса управления. Такой тип ВАХ отличает резкий скачок напряжения на начальном участке ВАХ и последующий спад напряжения (отрицательный участок ВАХ), связанный с увеличением площади включенного состояния.

На рисунке 2 показано семейство ВАХ тиристора Т353-800 в открытом состоянии, измеренных при  $T_j=28^\circ\text{C}$  в диапазоне амплитуд импульсов тока от 0,5 до 4кА. Левый участок ВАХ (без учета динамических участков) представляет собой статическую изотермическую прямую вольтамперную характеристику тиристора.

Эта ВАХ имеет нелинейный характер и аппроксимируется эмпирическим выражением [1]

$$u = A + Bi + C \ln(i + 1) + D\sqrt{i} . \quad (1)$$

I, кА

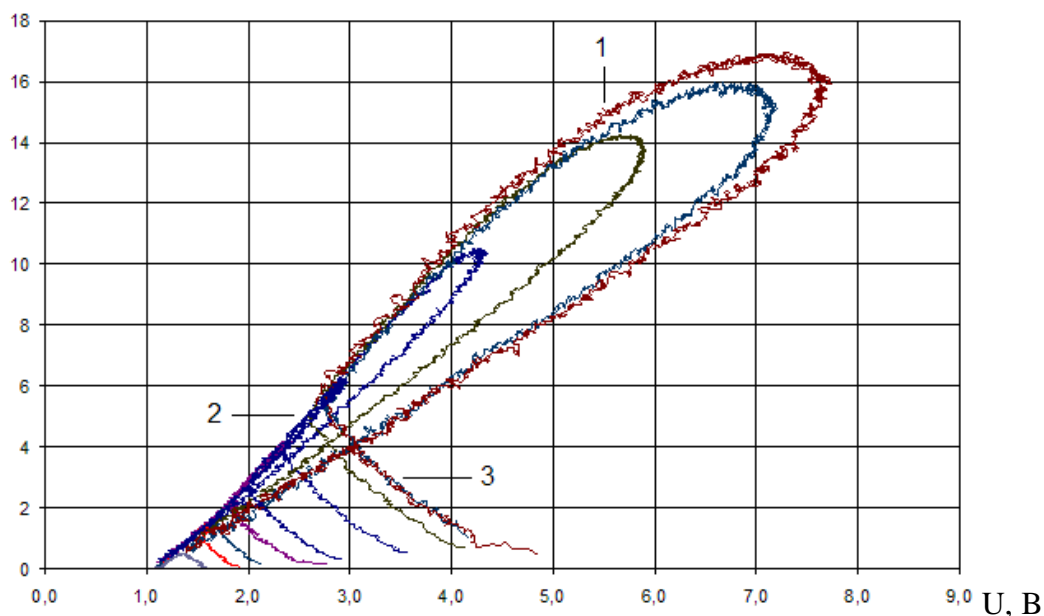


Рис. 1– Семейство вольтамперных характеристик тиристора Т353-800 в открытом состоянии при  $T_j=28^\circ\text{C}$  в диапазоне амплитуд токов до 17 кА

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  определяются имеющимися методами компьютерной обработки результатов измерений. В процессе работы проведено исследование температурной зависимости коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  в диапазоне температур от комнатной до  $140^\circ\text{C}$ . Выявлено, что температурная зависимость этих коэффициентов монотонная и, практически, линейная. Поэтому уравнение (1) можно преобразовать следующим образом:

$$u = (K_{TA}T_j + A_0) + (K_{TB}T_j + B_0)i + (K_{TC}T_j + C_0)\ln(i + 1) + (K_{TD}T_j + D_0)\sqrt{i} , \quad (2)$$

где  $K_{TA}$ ,  $K_{TB}$ ,  $K_{TC}$ ,  $K_{TD}$  - температурные коэффициенты параметров  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ ;  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$  - значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  при нулевой температуре;

Уравнение 2 позволяет производить уточненные расчеты прямого падения напряжения  $U_T$  в зависимости от величины протекающего тока и температуры полупроводниковой структуры.

Типичная изотермическая ВАХ ОС исследуемых тиристоров имеет следующий вид:

$$u = (-8,25 \cdot 10^{-4} T_j + 0,845) + (3 \cdot 10^{-7} T_j + 2 \cdot 10^{-4}) i + (-3 \cdot 10^{-4} T_j + 0,0426) \ln(i + 1) + (1 \cdot 10^{-4} T_j + 0,001) \sqrt{i}. \quad (3)$$

Используя данное уравнение можно более точно определять мощность потерь, выделяемую в тиристоре при протекании прямого тока.

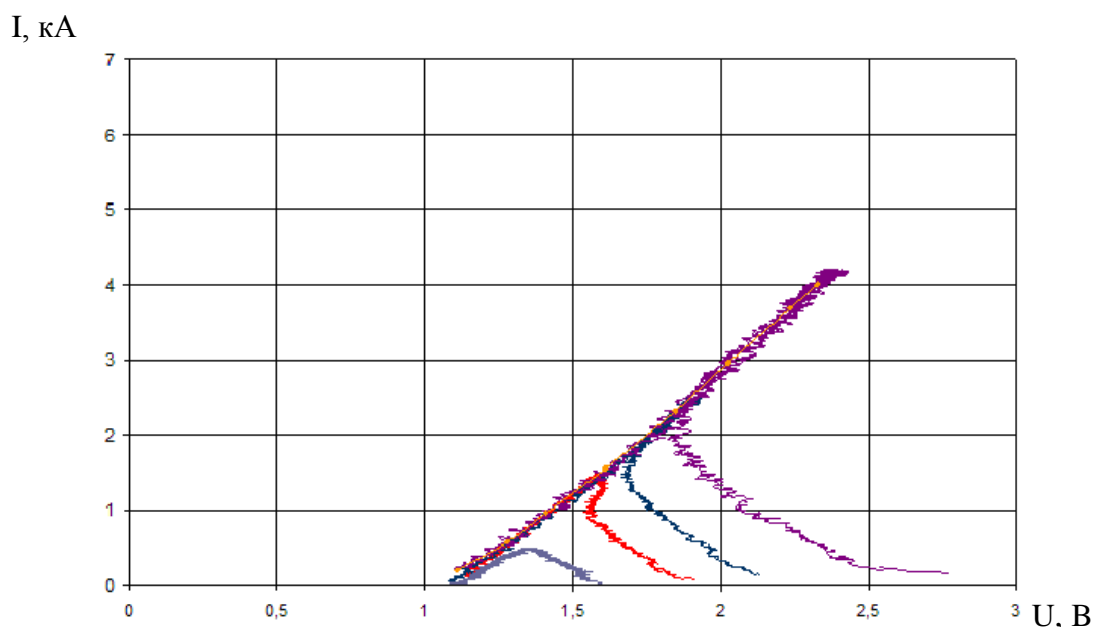


Рис. 2 – Семейство ВАХ тиристора Т 353-800 в открытом состоянии при  $T_j=28^\circ\text{C}$  в диапазоне амплитуд импульсов тока от 0,5 до 4кА

Из графиков рисунка 2 видно, что включение тиристора характеризуется увеличенным прямым падением напряжения по сравнению с падением напряжения статической ВАХ ОС. Это приводит к дополнительным потерям мощности при протекании прямого тока. Время установления включенного состояния тиристоров Т353-800 в зависимости от режима токовой нагрузки может достигать нескольких миллисекунд. Потери мощности при включении тиристора при работе на частоте 50 Гц составляют несколько процентов от общей мощности потерь и ими можно пренебречь. Однако, при частотах более 50 Гц эти потери могут быть существенны и их следует учитывать, особенно при выборе конструкции разветвленного управляющего электрода частотных тиристоров и мощных низкочастотных тиристоров с большой активной площадью.

Из практики основой для расчета мощности потерь при включении тиристора является зависимость линейной скорости распространения включенного состояния полупроводниковой структуры от плотности протекающего тока. Эта зависимость представляется в виде выражения[2]

$$V_\ell = a \ln(bj + 1), \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от конструкции полупроводниковой структуры тиристора;

На рисунке 3 представлены зависимости скоростей распространения включенного состояния тиристора Т353-800 от плотности протекающего тока и температуры в диапазоне от 28 до 140°C. Эти зависимости получены методом обсчета динамических участков ВАХ. При этом на этапе включения последовательно определялись плотность тока  $j$ , площадь  $S$  и радиус  $r$  включенной площади структуры, а после этого линейная

скорость распространения включенного состояния  $V_\ell = \frac{dr}{dt}$  и ее зависимость от плотности тока с использованием аппроксимации выражением 4.

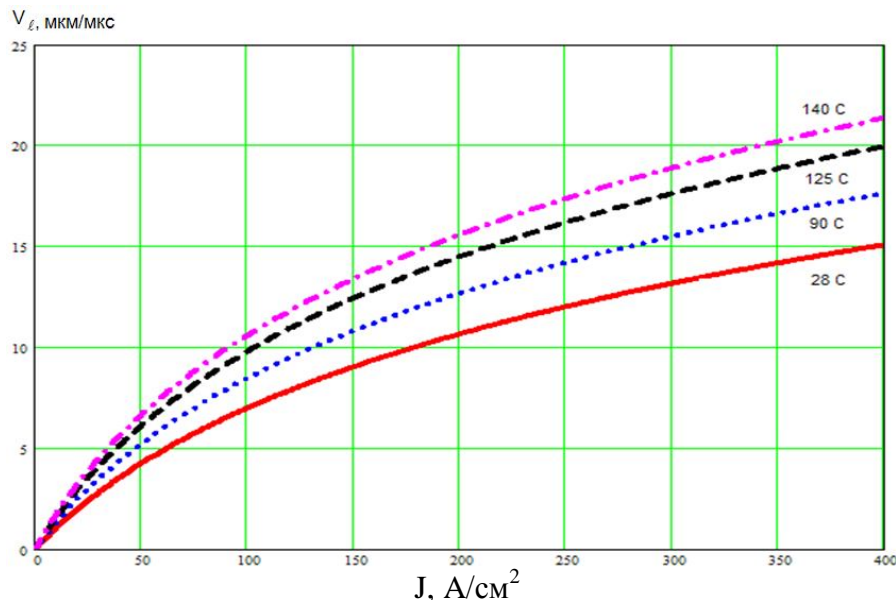


Рис.3 – Зависимость скорости распространения включенного состояния тиристора Т 353-800 от плотности тока в диапазоне температур от  $T_j=28^\circ\text{C}$  до  $T_j=140^\circ\text{C}$

В процессе работы была исследована температурная зависимость коэффициентов  $a$  и  $b$  выражения 4 для тиристоров Т353-800 в диапазоне температур от комнатной до  $140^\circ\text{C}$ . Исследования показали, что температурные зависимости этих коэффициентов близки к линейным. Поэтому выражение 4 можно преобразовать в следующее:

$$V_\ell = (a_0 + K_{Ta}T_j) \ln((b_0 + K_{Tb}T_j)j + 1), \quad (5)$$

где  $a_0$  и  $b_0$  – скорость распространения включенного состояния при нулевой температуре;

$K_{Ta}$ ,  $K_{Tb}$  - температурные коэффициенты параметров  $a$  и  $b$ .

Для типичных образцов эта зависимость имеет следующий вид:

$$V_\ell = (7,43 + 0,0164T) \ln((0,013 + 5 \cdot 10^{-5}T_j)j + 1) \quad (6)$$

На рисунке 4 показано семейство ВАХ тиристора Т353-800 в открытом состоянии в диапазоне токов от 10 до 20 кА при  $T_j=140^\circ\text{C}$ . Видно, что ВАХ имеет сложный вид. Левые ветви ВАХ соответствуют этапу нарастания тока (переднему фронту импульса тока). Правые ветви соответствуют этапу спада анодного тока. По мере увеличения амплитуды усиливается раздвоение правой и левой ветви ВАХ. Обострение ВАХ при  $I = 20$  кА тока связано с сильным разогревом (более  $400^\circ\text{C}$ ) Si-структуры при плотностях тока  $\geq 1000$  А/см<sup>2</sup> и объясняется резким уменьшением подвижности неосновных носителей заряда при этой температуре и процессом термогенерации основных носителей заряда в базовых областях тиристора [3].

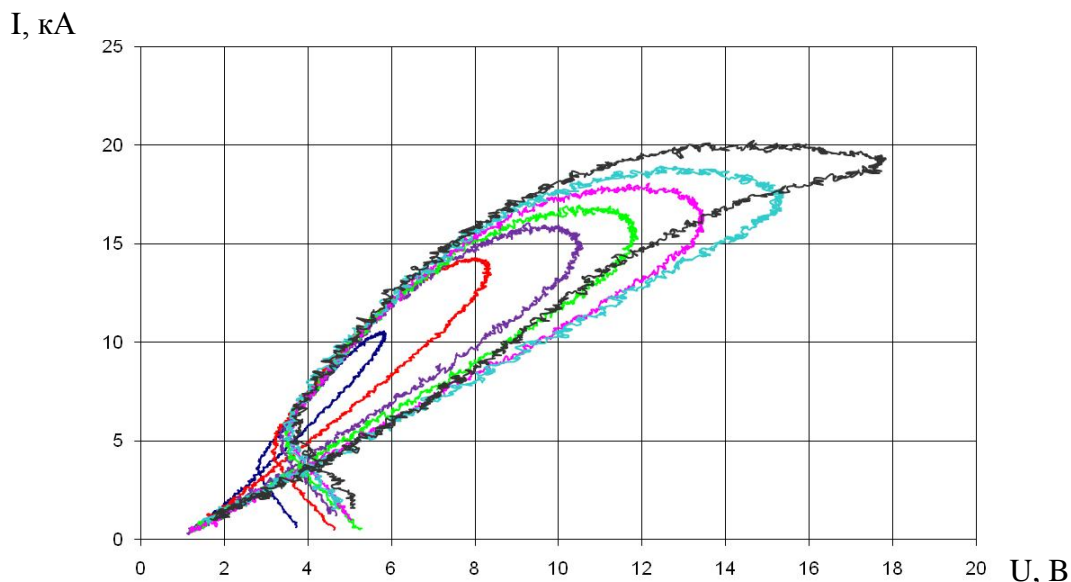


Рис. 4 – Семейство вольтамперных характеристик тиристора Т 353-800 в открытом состоянии, измеренных в диапазоне токов от 10 до 20кА ( $T_j=140^{\circ}\text{C}$ )

Испытание тиристорov в режиме термогенерации опасно из-за высокой вероятности шнурования тока и выхода приборов из строя. Поэтому вывод прибора на «термогенерационный пик» считается предельным режимом. Рабочее максимально допустимое значение ударного тока рекомендуется, как правило, принимать на 10-20 % меньше амплитуды тока, соответствующей началу появления «термогенерационного пика».

В результате выполненной работы определены параметрические коэффициенты и нелинейные уравнения изотермических ВАХ ОС  $u_T = f(i, T_j)$ , зависимости скорости распространения включенного состояния от плотности тока и температуры полупроводниковой структуры  $V_\ell = f(j, T_j)$ , критерии выбора допустимой амплитуды ударного тока при различных температурах тиристора Т353-800.

### Литература

1. Каталог фирмы АВВ «Тиристоры», 1996г.
2. Герлах В. «Тиристоры» – М.: Энергоатомиздат, 1985г. – 328с.
3. Отблеск А. Е., Челноков В. Е. «Физические проблемы в силовой электронике.» – Л.: Наука, 1984г. – 238с.