УДК 681.586.69:621.3.014

Н.Н. Беспалов, Ю.М. Голембиовский, М.Н. Байбиков

ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ТОКА В ОТКРЫТОМ СОСТОЯНИИ

Показан один из путей повышения надежности силовых тиристоров, использующихся в электрических преобразователях в режимах включения с повышенной скоростью нарастания тока в открытом состоянии.

N.N. Bespalov, J.M. Golembiovsky, M.N. Bajbikov

WAYS OF POWER THYRISTORS RELIABILITY INCREASE, USED AT HIGH SPEED OF INCREASE CURRENT IN THE OPEN CONDITION

One of the ways to increase the reliability of power thyristors, used in electric converters in modes of inclusion with the raised speed of increase of a current in an open condition is shown here.

Надежность силовых тиристоров (СТ), использующихся в преобразовательных устройствах в режимах включения с повышенными значениями скорости нарастания тока в открытом состоянии di_T/dt, во многом определяется электрическими и термическими процессами, происходящими в области первоначального включения (ОПВ). Статистика показывает [1], что около 50% всех отказов СТ в электрических преобразователях вызваны термически активируемыми эрозионными процессами в области управляющего электрода (УЭ), возникающими в процессе включения СТ.

Основным путем решения задачи обеспечения надежности СТ, использующихся в преобразовательных устройствах при повышенных значениях di_T/dt, является увеличение тем или иным способом размеров площади ОПВ. При разработке конструкции полупроводникового элемента СТ это достигается за счет конструктивного увеличения периметра УЭ в сочетании с введением регенеративного усиления внешнего тока управления. Однако, величины площади ОПВ конкретных СТ одного типа зависят не только от геометрических размеров УЭ, но и от различных внутренних и внешних факторов, влияющих на процесс формирования включенного состояния [2].

К первым факторам относятся различные технологические нарушения и дефекты полупроводниковой структуры и металлизации в области УЭ, которые существенно влияют на величину площади ОПВ. Технологические нарушения и дефекты определяют и величины параметров вольт-амперной характеристики (ВАХ) УЭ СТ, которые существенно влияют на процесс формирования в цепи УЭ тока управления.

Ко вторым факторам относятся параметры импульсов тока управления, формируемых драйверами систем управления преобразователей. К этим важнейшим параметрам в первую очередь необходимо отнести амплитуду тока управления I_{GM} и скорость di_G/dt его нарастания. Для обеспечения заданной di_T/dt-стойкости СТ требуется формирование в цепи УЭ импульсов тока управления с оптимальными значениями амплитуды тока управления $I_{GMOПТ}$ и скорости его нарастания $di_G/dt_{ОПТ}$, при которых достигаются максимально возможные размеры площади ОПВ СТ определенного типа. Результаты исследований [2] показывают, что для всех основных типов СТ значения $I_{GMOПТ}$ должны быть не менее 1 А, а $di_G/dt_{ОПТ}$ при этом – не менее 1 А/мкс. В справочной литературе [3] рекомендуется применять источники импульсов напряжения с амплитудой $U_{ГМ}$ = 20 В с добавочными токоограничивающими резисторами $R_Д$= 5-10 Ом в цепи УЭ. Однако при этом не учитываются некоторые факторы, существенно влияющие на процесс формирования тока управления. Результаты наших исследований показывают, что таким фактором является разброс значений параметров ВАХ УЭ, вызванный технологическими отклонениями и изменениями температуры СТ. При разработке преобразователей с целью повышения помехоустойчивости схемы в цепи управлений СТ разработчики вводят конденсаторы, шунтирующие УЭ. Существенное влияние на параметры импульса тока управления оказывают длина соединительных линий и величина индуктивности рассеяния L_s импульсных выходных трансформаторов, а также величина импульсного напряжения, появляющегося на УЭ СТ при его включении в режимах с повышенной di_T/dt. Это напряжение формируется на свободном от металлизации участке УЭ при протекании через него тока в открытом состоянии с высокой скоростью нарастания. При определенных условиях это обусловливает протекание в цепи УЭ тока обратного направления относительно тока управления. Причем общий ток управления на этапе включения СТ может стать отрицательным по величине. Все это приводит к существенному отличию значений параметров токов управления СТ в эксплуатации от рекомендуемых оптимальных и, соответственно, к дополнительным электрическим потерям в цепи УЭ, которые способствуют возникновению термических процессов деградации полупроводниковой структуры СТ, что существенно снижает надежность СТ и, соответственно, преобразователей на их основе при эксплуатации.

Для обеспечения максимально возможных размеров площади ОПВ СТ в условиях действия различных факторов необходимо определить условия формирования тока управления с оптимальными параметрами при различных схемах драйверов управления.

С целью исследования влияния различных внешних и внутренних факторов на процесс формирования тока управления в СТ проведено моделирование процессов в цепи управления при использовании трансформаторных импульсных источников, реализованных на основе типовой схемы импульсного источника напряжения и предлагаемой схемы импульсного источника тока.

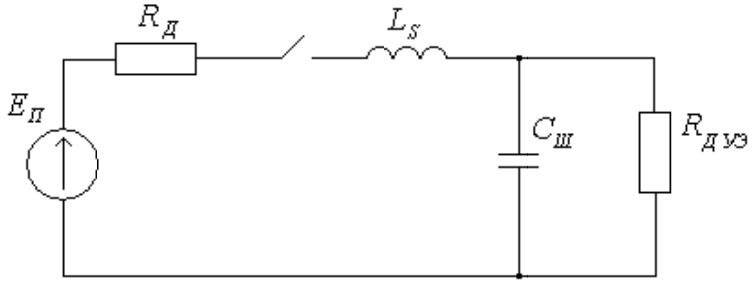


Рис. 1. Эквивалентная схема импульсного трансформаторного драйвера на этапе формирования переднего фронта и амплитуды тока управления

На рис. 1 представлена эквивалентная схема импульсного трансформаторного драйвера, иллюстрирующая процессы формирования тока управления в цепи УЭ на этапе

формирования переднего фронта и амплитуды тока управления, где E – ЭДС источника напряжения; $R_Д$ – токоограничивающее сопротивление, включающее внутреннее сопротивление источника; $R_{ДУЭ}$ – дифференциальное сопротивление УЭ; L_S – индуктивность рассеяния импульсного трансформатора; $C_Ш$ – шунтирующий конденсатор.

В обоих рассматриваемых случаях изменение тока через УЭ СТ описывается выражениями:

1) случай апериодического характера формирования тока в цепи:

$$i_{R_{ДУЭ}} = \frac{E}{R_Д + R_{ДУЭ}} + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} - C_Ш p_1 A_1 e^{p_1 t} - C_Ш p_2 A_2 e^{p_2 t} \ , \qquad (1)$$

где $p_{1,2} = \frac{-(Ls + R_Д R_{ДУЭ} C_Ш) \pm \sqrt{(Ls + R_Д R_{ДУЭ} C_Ш)^2 - 4 \cdot (LsC_Ш R_{ДУЭ})(R_Д + R_{ДУЭ})}}{2LsC_Ш R_{ДУЭ}}$,

$$A_1 = p_2 \frac{E}{p_1 - p_2} \cdot \frac{R_{ДУЭ}}{R_Д + R_{ДУЭ}} \ , \quad A_2 = p_1 \frac{E}{p_2 - p_1} \cdot \frac{R_{ДУЭ}}{R_Д + R_{ДУЭ}} \ , \quad B_1 = \frac{p_2 y + x}{p_1 - p_2} \ ,$$

$$B_2 = \frac{p_1 y + x}{p_2 - p_1} \ , \quad y = \frac{E}{R_Д + R_{ДУЭ}} \ , \quad x = C_Ш A_1 {p_1}^2 + C_Ш A_2 {p_2}^2 \ ;$$

2) случай резонансного характера формирования тока в цепи:

$$i_{R_{ДУЭ}} = \frac{E}{R_Д + R_{ДУЭ}} + Ae^{-at} \sin(bt + \varphi) \ , \qquad (2)$$

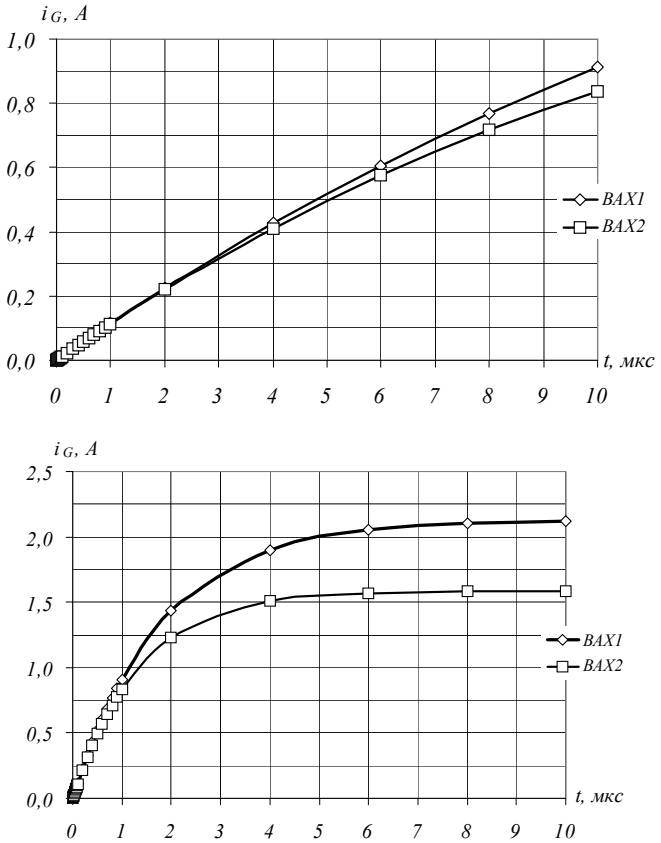
где $a = \frac{(Ls + R_Д R_{ДУЭ} C_Ш)}{2LsC_Ш R_{ДУЭ}}$, $b = \frac{\sqrt{4(LsC2R_{ДУЭ})(R_Д + R_{ДУЭ}) - (Ls + R_Д R_{ДУЭ} C_Ш)^2}}{2LsC_Ш R_{ДУЭ}}$,

$$A = \sqrt{\frac{a^2 E^2 \kappa^2}{b^2} + E^2 \kappa^2} \ , \quad \varphi = \arcsin\left(-\frac{Ek}{A}\right) \ , \quad \kappa = \frac{1}{(R_{ДУЭ} + R_Д)} \ .$$

В случае применения типовой схемы импульсного источника напряжения моделирование осуществлялось при E=25 В и $R_Д$=10 Ом. Для случая применения схемы импульсного источника тока моделирование производилось при E=10^6 В и $R_Д$=10^6 Ом. В обоих случаях величина емкости шунтирующего конденсатора $C_Ш$ изменялась дискретно от 1 нФ до 1 мкФ. Индуктивность намагничивания L_M импульсного трансформатора задавалась равной 21 мГн, что соответствует условию формирования тока управления длительностью до 35 мкс. Коэффициент рассеивания $\sigma = L_S / L_M$ задавался дискретно в пределах от 0,1 до 1%. Дифференциальное сопротивление $R_{ДУЭ}$ УЭ принималось постоянным и выбиралось равным $R_{ДУЭ}$ = 1,75 Ом (ВАХ 1) и $R_{ДУЭ}$ =5, 75 Ом (ВАХ 2) на основании данных, представленных в [4].

На рис. 2 представлены некоторые результаты моделирования процесса формирования тока управления для случая применения в драйвере управления СТ импульсного источника напряжения.

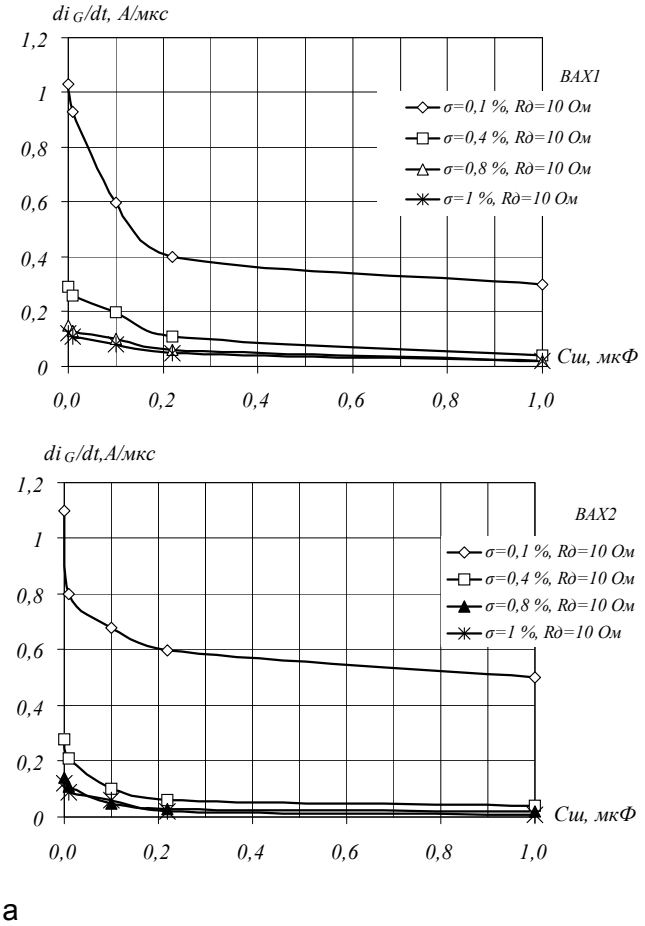
Из представленных зависимостей видно, что вариация величин дифференциального сопротивления $R_{ДУЭ}$ УЭ, информация о которых обычно неизвестна потребителю СТ, и индуктивности рассеяния L_S трансформатора приводит к существенной зависимости скорости нарастания тока управления di_G/dt. При этом величины di_G/dt ниже минимально допустимых значений $di_G/dt_{ОПТ}$.



а б

Рис. 2. Временные зависимости тока в УЭ при $C_Ш$=1 нФ, σ=1% (а) и σ=0,1 (б)

На рис. 3 представлены расчетные зависимости скорости нарастания тока управления di_G/dt от величины емкости шунтирующего конденсатора $C_Ш$ при изменении коэффициента рассеивания σ для СТ с разными дифференциальными сопротивлениями $R_{ДУЭ}$ УЭ.



а б

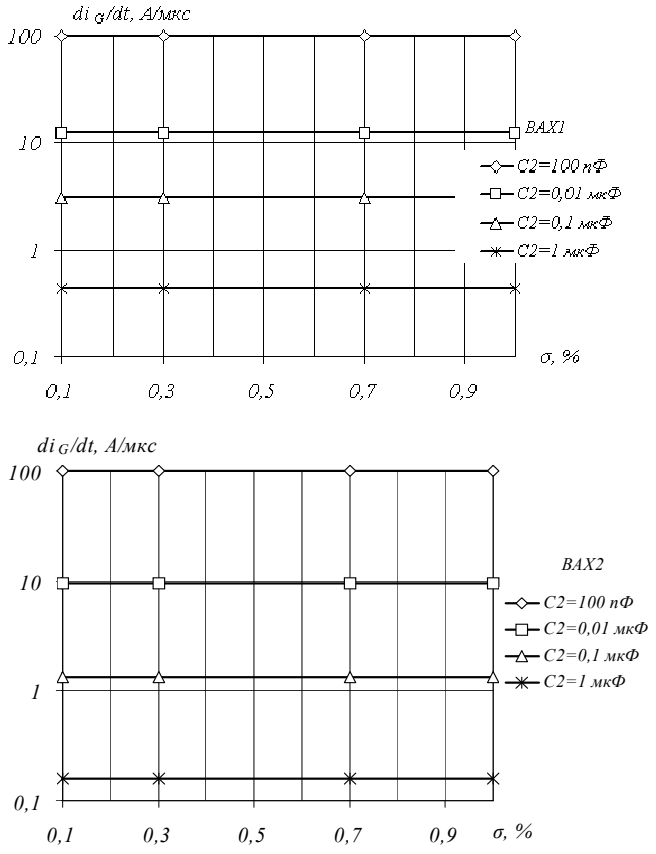
Рис. 3. Зависимости di_G/dt от $C_Ш$ для СТ с ВАХ 1 (а) и ВАХ 2 (б) УЭ при различных σ

Из графиков рис. 3 видно, что оптимальное значение скорости нарастания тока управления $di_G/dt_{ОПТ} \geq$ 1 А/мкс в обоих случаях возможно получить только при применении импульсного трансформатора с σ≤0,1% и шунтирующего конденсатора с емкостью $C_Ш \leq$100 пФ.

Рассмотрим некоторые результаты моделирования процесса формирования тока управления для случая применения в драйвере управления СТ импульсного источника тока.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости скорости нарастания тока управления di_G/dt от величины коэффициента рассеивания σ при изменении емкости шунтирующего конденсатора $C_Ш$ для СТ с разными дифференциальными сопротивлениями $R_{ДУЭ}$ УЭ и при $I_{GM} = I_{GMОПТ} =$ 1 А.

Из графиков рис. 4 видно, что оптимальное значение скорости нарастания тока управления $di_G/dt_{ОПТ} \geq$ 1 А/мкс для всех случаев, кроме случая, когда емкость шунтирующего конденсатора $C_Ш$ превышает 0,1 мкФ. Однако при этом, если на этапе нарастания тока управления формировать ток со значительно большей амплитудой, то также возможно обеспечить оптимальное условие по скорости нарастания – $di_G/dt_{ОПТ} \geq$ 1 А/мкс. При этом скорость нарастания тока di_G/dt не зависит от коэффициента рассеивания σ импульсного трансформатора, что упрощает его конструкцию.



а б

Рис. 4. Зависимости di_G/dt от σ для СТ с ВАХ 1 (а) ВАХ 2 (б) УЭ при различных $C_Ш$ при применении источника тока

Таким образом, в результате исследования определено, что при применении трансформаторных драйверов управления СТ на основе импульсного источника напряжения в условиях вариации различных параметров цепи управления и ВАХ УЭ, наблюдается существенная вариация параметров тока управления. При этом трудно обеспечить оптимальные величины параметров тока управления $I_{GMOПТ} \geq 1$ А и $di_G/dt_{ОПТ} \geq 1$ А/мкс. Напротив, применение драйверов на основе источника тока позволяет относительно просто решить задачу оптимизации параметров тока управления СТ в условиях действия многих факторов.

Для обеспечения требуемых параметров тока управления нами предлагается выполнять драйверы управления СТ на основе схемы управляемого источника тока. На рис. 5 представлена структурная схема разработанного драйвера, где ВОЭУ – входное оптоэлектронное устройство; РФИН – регулируемый формирователь импульсов напряжения; ИП – источник питания; УИТ – управляемый источник тока; ИТ – импульсный трансформатор.

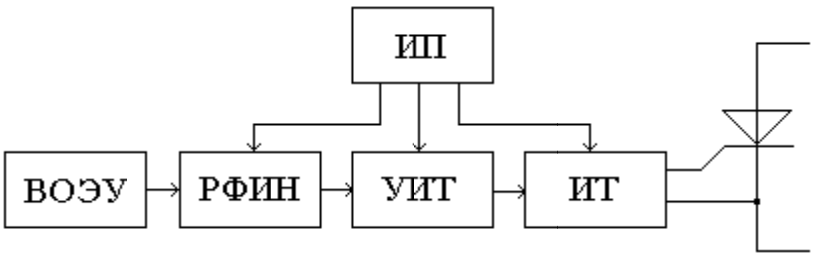


Рис. 5. Структурная схема драйвера управления СТ на основе источника тока

Основные технические характеристики разработанного драйвера следующие:

1) амплитуда импульса тока управления I_{GM} от 1 А до 5 А;

2) скорость нарастания импульса тока управления di_G/dt не менее 2 А/мкс;

3) длительность импульса тока управления от 5 до 100 мкс;

4) частота повторения импульсов управления от 1 до 10 кГц.

Основными особенностями разработанного драйвера является то, что вход драйвера имеет оптоэлектронную развязку, совместимую с любой логикой, и трансформаторный выход, а также то, что параметры импульса тока управления мало зависят от параметров цепи управления СТ, электрического режима эксплуатации и соединительных цепей длиной до 5 метров.

Вывод

Применение в преобразовательных устройствах драйверов управления СТ на основе схемы источника тока позволяет формировать импульсы управления с параметрами, при которых обеспечивается максимально возможная площадь ОПВ при включении СТ в условиях действия многих факторов. Такое решение позволит повысить надежность работы СТ в динамических режимах, характеризующихся повышенными значениями скорости нарастания тока di_T/dt в открытом состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плоткина Н.З. Испытания силовых тиристоров на *di/dt*-стойкость / Н.З. Плоткина, Ю.Д. Цзин // Труды НИИПТ. Л.: Энергоиздат, 1981. С. 68-74.

2. Беспалов Н.Н. Экспериментальное исследование площади начального включения и потерь в тиристорах при включении по цепи управления / Н.Н. Беспалов, Е.М. Гейфман // Электротехника. 1995. № 1. С. 48-51.

3. Замятин В.Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: справочник / В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, В.М. Петухов. М.: Радио и связь, 1987. 576 с.

4. Беспалов Н.Н. Выходной каскад для управления силовыми тиристорами / Н.Н. Беспалов, М.Н. Байбиков // Электроника и информационные технологии. Саранск, 2002. С. 24-25.

Беспалов Николай Николаевич –
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика»
Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева

Голембиовский Юрий Мичиславович –
доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического университета

Байбиков Марат Няимович –
аспирант кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического университета