

**БАЛЯСОВ П. П., МУСКАТИНЬЕВ А. В.**

**ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ ТИРИСТОРОВ  
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ЦЕПЯХ МОЩНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** В статье обсуждаются вопросы помехоустойчивости в преобразователях с последовательным включением силовых тиристоров. Приводятся результаты исследований искажения импульсов управления в выходных трансформаторных каскадах.

**Ключевые слова:** силовые тиристоры, импульсный трансформатор, выходной каскад.

**BALYASOV P. P., MUSKATINIEV A. V.**

**FEATURES OF OPERATION OF POWER THYRISTORS  
IN SERIES CIRCUITS OF POWERFUL CONVERTERS**

**Abstract.** The article considers the noise immunity in sequential-connected converters of power thyristors. The results of studies of the distortion of control pulses in output transformer stages are presented.

**Keywords:** power thyristors, pulse transformer, output stage.

Последовательное включение силовых тиристоров широко применяется при построении различных преобразовательных устройств. К ним могут быть отнесены последовательные сборки из высоковольтных тиристоров и ключи на их основе для применения в аппаратах плавного пуска электродвигателей, работающих от сети переменного тока промышленной частоты с напряжением 6 кВ, преобразователи частоты, которые используются в качестве источников электропитания индукционных печей для плавки и нагрева заготовок, и ряд других мощных устройств.

Системы управления тиристорами перечисленных устройств построены различным образом. Некоторые из них реализованы на современной элементной базе в виде специализированных драйверов с гальванической развязкой по оптическому каналу, за счет чего достигается высокая помехоустойчивость. В других преобразователях, системы управления тиристорами выполнены по традиционной схеме с трансформаторной развязкой. В ряде случаев в таких схемах может наблюдаться снижение помехоустойчивости, что объясняется несколькими факторами. Во-первых, при работе мощных преобразователей тиристоры работают при повышенной температуре, от которой зависит величина минимального тока управления  $I_{y.мин}$ , необходимого для включения тиристора. На рисунке 1 показаны зависимости амплитуды импульса тока  $I_{y. мин}$  от его длительности для тиристоров

серии ТЛ [1]. При повышении температуры управляющего перехода тиристора амплитуда тока  $I_{y.мин}$  существенно снижается, за счет чего ухудшается помехоустойчивость.

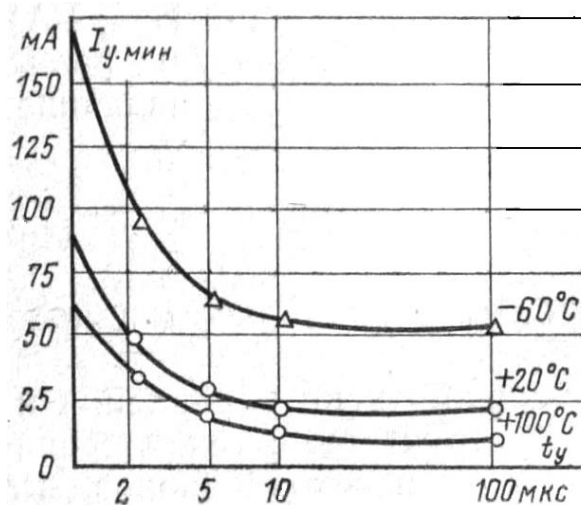


Рис. 1. Зависимости амплитуды тока управления тиристора от длительности импульса при различной температуре.

Работа преобразователя с большими скоростями изменения анодного напряжения  $dU_a/dt$  приводит к возникновению емкостного тока  $I_c$  тиристора, обусловленного барьерной емкостью  $C_b$  центрального перехода [2], что приводит к накоплению в базе тиристора заряда  $Q$ . Это равносильно воздействию на тиристор емкостного тока  $I_c$  через цепь управления. Дополнительно на тиристор может воздействовать импульс тока помехи  $I_n$  через цепи питания системы управления и межобмоточную емкость  $C_{об}$  выходного трансформатора  $Tr$ . Сказанное иллюстрируется на рисунке 2.

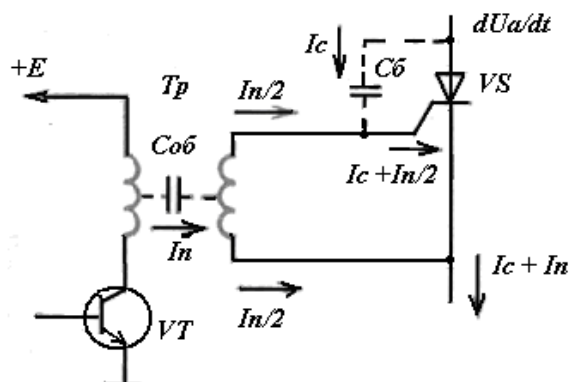


Рис. 2. Пути протекания токов помех при больших скоростях изменения анодного напряжения  $dU_a/dt$ .

Приведенные составляющие помех способствуют накоплению дополнительного заряда в базах тиристора, способствующего его включению при меньших случайных

импульсных токах управления, что приводит к снижению помехоустойчивости преобразователя.

Способы повышения помехоустойчивости разделяются на конструктивные и схемотехнические. К конструктивным мерам можно отнести следующее.

1. Раздельное использование шин заземления силовой и управляющей схем преобразователя.

2. Применение экранированных проводов или витых пар системы управления.

3. Уменьшение межвитковой емкости обмоток трансформатора введением экранов.

Однако этот способ имеет ограниченное применение, так как усложняет конструкцию импульсного трансформатора и одновременно повышает его индуктивность рассеяния.

4. Применение тиристорov с малой барьерной емкостью. Данный метод требует подбора тиристорov с помощью специальной аппаратуры, что не всегда выполнимо на практике.

Схемотехническими методами повышения помехозащищенности преобразователей, работающих с большими скоростями изменения анодного напряжения и тока, являются решения, направленные на увеличение критического заряда  $Q_{кр}$  тиристорov преобразователя. Критический заряд  $Q_{кр}$  является величиной минимального накопленного заряда в р-базе тиристора, необходимого для его включения. Независимо от формы управляющего импульса заряд  $Q_{кр}$  определяется выражением [1]:

$$Q_{кр} = I_{gt} * t_{gt}, \quad (1)$$

где  $I_{gt}$  и  $t_{gt}$  – ток включения и время включения тиристора.

Если используется импульс управления тиристором прямоугольной формы амплитудой  $I_y$  и длительностью  $t_{и}$ , то минимальная длительность импульса, необходимая для достижения критического заряда тиристора определяется соотношением [1]:

$$t_{и.мин} = t_{gt} \ln \frac{I_y}{I_y - I_{gt}}. \quad (2)$$

Формула (2) указывает на то, что с увеличением амплитуды прямоугольного импульса его длительность, необходимая для достижения критического заряда, снижается по логарифмическому закону, приближаясь к нулю.

Повышение критического заряда для включения тиристора импульсом управления прямоугольной формы достигается различными способами. Все они направлены на то, чтобы накопление заряда в базе тиристора от воздействия помех непосредственно перед включением тиристора было сведено к минимуму или существенно ослаблено. На практике используются несколько вариантов схем, показанных на рисунке 3. В схеме рисунке 3а параллельно управляющему переходу тиристора включен шунт  $R_{ш}$ , через который

ответвляется часть тока управления, обусловленного наличием помех. Однако при использовании тиристоров с шунтировкой катода для защиты от воздействия больших скоростей нарастания анодного напряжения, приведенная схема повышения критического заряда малоэффективна.

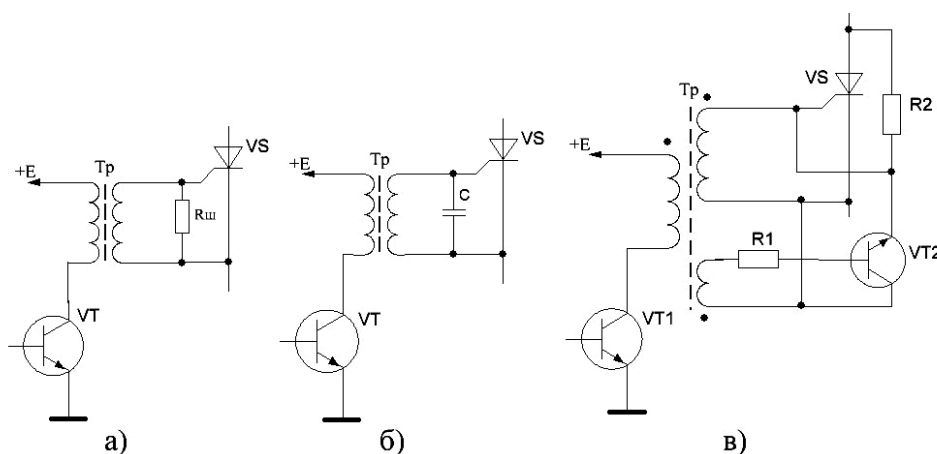


Рис. 3. Схемотехнические способы снижения критического заряда включения тиристора.

Схема с включением конденсатора на рисунке 3б получила более широкое распространение в силу ее простоты. Однако на практике емкость конденсатора часто оказывается чрезмерно завышенной, что приводит к другим нежелательным эффектам, обсуждаемым позже. В схеме на рисунке 3в [1] транзистор  $VT2$  шунтирует управляющий переход тиристора  $VS$  во время его закрытого состояния. Управляющий импульс для транзистора  $VT2$  формируется противофазно импульсу управления тиристором  $VS$  от отдельной обмотки выходного трансформатора, что усложняет схему. Транзистор  $VT2$  в схеме используется в инверсном режиме с целью уменьшения напряжения насыщения.

Рассмотрим влияние конденсатора  $C$ , включенного в цепь управляющего перехода тиристора на форму прямоугольного импульса, формируемого в схеме, с учетом паразитных параметров импульсного трансформатора (рис. 3б). Для этого используем упрощенную эквивалентную схему замещения трансформатора для анализа искажения фронта импульса выходного напряжения (рис. 4). На схеме приняты следующие обозначения:  $e$  – источник идеального прямоугольного импульса напряжения;  $R_1$  – внутреннее сопротивление генератора в сумме с сопротивлением первичной обмотки трансформатора;  $L$  – индуктивность рассеяния;  $C$  – сумма паразитной емкости обмоток и емкости помехоподавляющего конденсатора;  $R_2'$  – сумма сопротивлений нагрузки и вторичной обмотки трансформатора, приведенных к первичной обмотке;  $u_2'$  – напряжение на вторичной обмотке, приведенное к первичной стороне. Так как используется линейная модель выходного каскада, то форма выходного напряжения соответствует форме тока управляющего перехода тиристора.

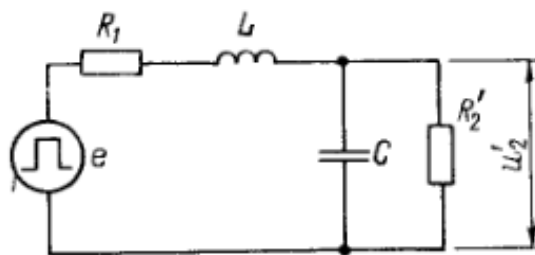


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения импульсного трансформатора для передачи фронта импульса напряжения.

Для вычисления процесса изменения выходного напряжения используем формулу решения дифференциального уравнения второго порядка цепи (рис. 4) [3] с коэффициентом затухания  $\delta$  и переменными, нормированными по амплитуде и времени:

$$u = 1 - e^{-\delta\tau} \left( \cos(\beta\tau) + \frac{\delta}{\beta} \sin(\beta\tau) \right), \quad (3)$$

где  $\delta < 1$ ,  $\beta = \sqrt{1 - \delta^2}$ ,  $\delta = \frac{\sqrt{\alpha}}{2} \left( \frac{1 - \alpha R_2'}{\alpha \rho} + \frac{\rho}{R_2'} \right)$ ,  $\rho = \sqrt{L/C}$ ,  $\tau = t / \sqrt{\alpha LC}$ ,

$$\alpha = R_2' / (R_1 + R_2')$$

В качестве исходных данных приняты следующие значения параметров эквивалентной схемы:  $R_1$  – 5 Ом; индуктивность рассеяния  $L$  равна 6 мкГн, 15 мкГн и 30 мкГн; емкость  $C$  менялась в диапазоне от 0,1 мкФ до 1 мкФ;  $R_2'$  равно сумме дифференциального сопротивления управляющего перехода тиристора и сопротивления, включенного последовательно в цепь управляющего перехода – 8,2 Ом. Коэффициент трансформации принят равным 1. Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

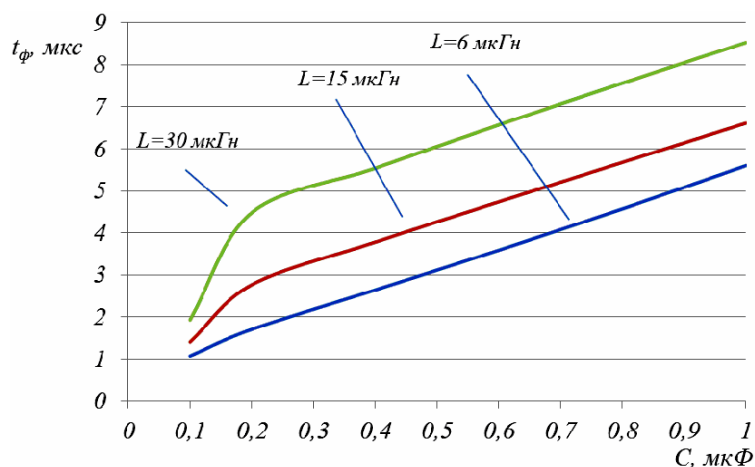


Рис. 5. Эквивалентная схема замещения импульсного трансформатора для передачи фронта импульса напряжения.

Длительность фронта  $t_f$  между уровнями (0,1...0,9) импульса напряжения или тока нормированной амплитуды пропорционально растет с увеличением емкости помехоподавляющего конденсатора  $C$  и ростом индуктивности рассеяния импульсного трансформатора. С одной стороны, это необходимо для повышения помехоустойчивости преобразователя за счет подавления импульсных помех, рассмотренных ранее. Однако уменьшение скорости нарастания тока управления приводит к существенному росту времени задержки и времени включения тиристора [4], что отрицательно влияет на работу последовательной цепочки тиристорov. Если тиристоры шунтированы демпферными RC цепями [5; 6] для компенсации разброса заряда обратного восстановления, то при искаженных фронтах управляющих импульсов уменьшается площадь начального включения тиристора тока управления, что снижает надежность работы тиристорov при больших скоростях изменения анодного тока. Поэтому необходимый компромисс между помехозащищенностью и надежностью работы последовательной цепи тиристорov необходимо решать с учетом конкретного режима работы преобразователя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лабунцов В. А., Тугов Н. М. Динамические режимы эксплуатации мощных тиристорov. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
2. Мускатиньев А. В., Мускатиньев А. А. Особенности измерения токов утечки в силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 3 (19). – С. 157–163.
3. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторov. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
4. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энерго-атомиздат, 1985. – 400 с.
5. Мускатиньев А. В. Особенности подбора силовых тиристорov для последовательного включения // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 2. – С. 72–78.
6. Мускатиньев А. В., Мускатиньев А. А. Особенности построения аппаратуры контроля динамических параметров силовых полупроводниковых приборов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, – 2014. – Т. 2 – С. 4–7.