

Неодномерный эффект dU/dt в мощных тиристорах

© С.Н. Юрков, Т.Т. Мнацаканов, А.Г. Тандоев

Национальный исследовательский университет „Московский энергетический институт“,
111250 Москва, Россия

E-mail: yurkov.sn@mail.ru

Поступила в Редакцию 11 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 23 июля 2019 г.

Принята к публикации 29 августа 2019 г.

Описана методика, позволяющая учесть влияние элементов конструкции мощного тиристора на его dU/dt -стойкость. Предложена простая модель, с помощью которой можно найти параметры вспомогательной тиристорной структуры регенеративного управляющего электрода, обеспечивающие заданную стойкость тиристора к эффекту dU/dt . Найдена минимально возможная величина отпирающего тока управления тиристора, ограниченная заданной величиной предельной скорости нарастания напряжения.

Ключевые слова: мощный тиристор, элементы конструкции, эффект dU/dt , отпирающий ток управления.

DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48777.9137

1. Введение

Известно, что величина блокируемого тиристором напряжения снижается при увеличении скорости его нарастания. Этот эффект, названный „эффектом dU/dt “, описан в ряде работ, например, в [1]. Суть эффекта dU/dt состоит в том, что при нарастании анодного напряжения происходит перезаряд барьерной емкости центрально $p-n$ -перехода, в результате чего в базовые слои тиристорной структуры поступает ток основных носителей, приводящий к ее включению. Основной способ борьбы с эффектом dU/dt состоит в создании омической утечки в катодном эмиттерном переходе. Для этого в структуру тиристора вводят специальные технологические шунты [1].

Поскольку центральный $p-n$ -переход занимает всю структуру, емкостной ток однородно распределен по площади прибора. В то же время катодный эмиттерный переход тиристора занимает лишь часть площади структуры. Имеются области, занятые электродом управления (или оптическим окном для фототиристора), элементами регенератора, металлизированной разводкой управления и т.д. Емкостной ток, протекающий в этих областях, которые мы будем называть пассивными, концентрируется на границе катодного эмиттерного перехода, что может существенно снижать стойкость тиристора к эффекту dU/dt . Очевидно, что влияние неодномерного эффекта dU/dt тем сильнее, чем больше площадь пассивных областей. Для того чтобы учесть влияние различных элементов конструкции тиристора на его dU/dt -стойкость, при проектировании необходимо использовать трехмерные модели, что, учитывая сложную топологию современных тириستоров, представляет довольно тяжелую задачу.

Особенно следует отметить влияние неодномерного dU/dt -эффекта на работу регенеративного управляющего электрода. Емкостной ток, протекающий в области под управляющим электродом, концентрируется

на границе вспомогательной тиристорной структуры (ВС), может привести к ее включению, что приведет к последующему включению всего тиристора. При проектировании первой ступени регенератора приходится искать компромисс между стойкостью к эффекту dU/dt и отпирающим током управления (I_{GT}). Чем выше помехоустойчивость тиристора, тем больше величина I_{GT} . Очевидно, что минимальная величина отпирающего тока управления ограничена заданной величиной предельной скорости нарастания анодного напряжения $(dU/dt)_{crit}$. Обеспечение наименьшего значения отпирающего тока управления может быть важно для некоторых приложений, например для фототириستоров, для которых от величины включающего тока управления зависит выбор источника светового сигнала.

2. Учет эффекта dU/dt при проектировании первой ступени регенератора

В данной работе будет рассмотрена dU/dt -стойкость тиристора с регенеративным управляющим электродом, вспомогательная тиристорная структура которого представляет кольцо с зашунтированным внешним краем (краевой шунт) (рис. 1). Такой вариант конструкции наиболее часто используется на практике.

Согласно А.И. Уварову [2], можно записать следующее условие включения тиристора эффектом dU/dt :

$$(1 + \chi) \int_0^{t_f} J_c(t) \exp(-t/\tau_o) dt = J_o \tau_o. \quad (1)$$

Здесь χ — коэффициент эффективности заряда, вносимого в n -базу (эффективность заряда в узкой базе p^+ -типа полагается равной единице), t_f — длительность фронта импульса прямого напряжения, J_c — плотность емкостного тока, τ_o — постоянная времени, характеризующая

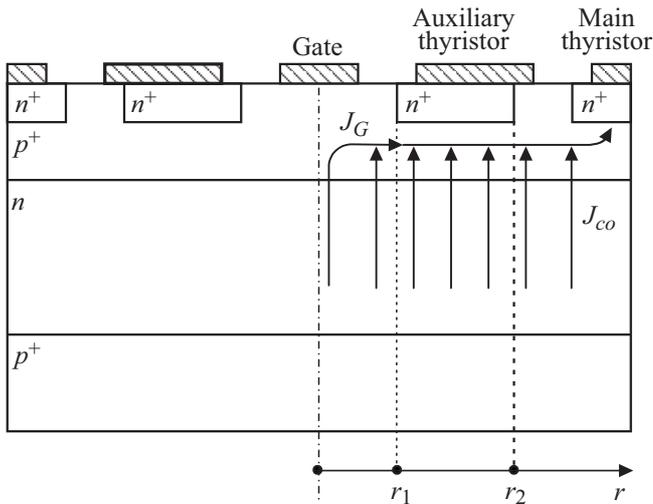


Рис. 1. Конструкция тиристора с регенеративным управляющим электродом.

экспоненциальный рост тока на начальном этапе процесса включения, J_o — параметр модели, характеризующий утечку в катодном эмиттерном переходе. Выражение в левой части (1) представляет заряд, накопленный в базовых областях тиристорной структуры за время нарастания анодного напряжения, а выражение в правой части (1) представляет критический заряд включения.

Чтобы воспользоваться выражением (1), нужно вычислить интеграл в его левой части. В аналитическом виде это можно сделать только для частного случая, когда dU/dt стремится к бесконечности. Величина вносимого заряда Q_{in} в этом случае максимальна и равна

$$Q_{in} = (1 + \chi)qN_dX_n(U_{max}), \quad (2)$$

где N_d — концентрация донорной примеси в n -базе, $X_n(U_{max})$ — ширина области пространственного заряда (ОПЗ) в n -базе при амплитудном значении анодного напряжения. При уменьшении dU/dt величина вносимого заряда уменьшается. Поскольку в общем случае (с учетом зависимости J_c и τ_o от анодного напряжения) не удастся получить простого выражения для Q_{in} , воспользуемся численной моделью и введем параметр η , равный отношению заряда, вносимого эффектом dU/dt при $dU/dt \rightarrow \infty$, к заряду, вносимому при конечном значении dU/dt . Тогда вместо (1) можем записать

$$(1 + \chi)qN_dX_n(U_{max}) = \eta(dU/dt)J_o\tau_o. \quad (3)$$

Согласно [2], величина J_o равна току утечки в катодном эмиттерном переходе в критическом состоянии тиристора, предшествующем включению. При этом подразумевается, что ток утечки однородно распределен по площади. Решим следующую стационарную задачу. Найдем плотности тока дырок, однородно втекающего в p -базу со стороны центрального перехода (как в случае эффекта dU/dt), при котором максимальное напряжение

на границе катодного эмиттерного перехода вспомогательного тиристора равно величине U_{eo} , соответствующей критическому состоянию ВС, предшествующему ее включению. Именно этот ток будем ассоциировать с параметром J_o в модели Уварова. Рассмотрим уравнение, описывающее распределение потенциала на катодном эмиттерном переходе вспомогательной тиристорной структуры при воздействии на нее тока основных носителей, втекающего со стороны центрального перехода равномерно по площади с плотностью J_{co} (рис. 1). Поскольку поперечное падение напряжения в базе существенно меньше продольной составляющей, можно представить слой p -базы плоской проводящей средой с листовым сопротивлением R_s . В результате получим следующее уравнение:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_e}{dr} \right) = -R_s J_{co},$$

$$\left. \frac{dU_e}{dr} \right|_{r_1} = -R_s J_G,$$

$$U_e(r_2) = 0, \quad (4)$$

где U_e — напряжение на эмиттерном переходе. Величина J_G соответствует емкостному току, протекающему в пассивной области под управляющим электродом и поступающему в p -базу ВС со стороны внутренней границы $r = r_1$. Введем новую переменную $x = r_1 \ln \frac{r}{r_1}$, тогда (4) можно преобразовать к виду

$$\frac{d^2 U_e}{dx^2} = -R_s J_{co} \exp\left(\frac{2x}{r_1}\right),$$

$$\left. \frac{dU_e}{dx} \right|_{x=0} = -R_s J_G,$$

$$U_e(x_o) = 0. \quad (5)$$

Здесь $x_o = r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}$. Решение (5) имеет вид

$$U_e(x) = C_1 + C_2 x - \frac{R_s J_{co}}{4} r_1^2 \exp\left(\frac{2x}{r_1}\right). \quad (6)$$

Найдем константы C_1 и C_2 из граничных условий

$$C_2 = \frac{R_s J_{co}}{2} r_1 - R_s J_G,$$

$$C_1 = \frac{R_s J_{co}}{4} r_1^2 \exp\left(\frac{2x_o}{r_1}\right) - C_2 x_o. \quad (7)$$

Тогда решение будет иметь вид

$$U_e(x) = \left(\frac{R_s J_{co}}{2} r_1 - R_s J_G \right) (x - x_o) + \frac{R_s J_{co}}{4} r_1^2 \left[\exp\left(\frac{2x_o}{r_1}\right) - \exp\left(\frac{2x}{r_1}\right) \right]. \quad (8)$$

Переходя в (8) к переменной r , получим

$$U_e(r) = R_s r_1 \left(\frac{J_{co}}{2} r_1 - J_G \right) \ln \frac{r}{r_2} + \frac{R_s J_{co}}{4} (r_2^2 - r^2). \quad (9)$$

Найдем максимальный потенциал на катодном эмиттерном переходе

$$U_{e\max} = U_e(r_1) = R_s r_1 \left(\frac{J_{co} r_1}{2} - J_G \right) \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{R_s J_{co}}{4} (r_2^2 - r_1^2). \quad (10)$$

Величину J_G найдем, умножив J_{co} на площадь пассивной области и разделив на протяженность границы эмиттерного перехода:

$$J_G = \frac{J_{co} r_1}{2}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (10), получим

$$U_{e\max} = \frac{R_s J_{co}}{4} (r_2^2 - r_1^2). \quad (12)$$

Искомую величину J_o найдем, полагая в (12) $U_{e\max} = U_{eo}$, где U_{eo} соответствует статическому состоянию переключения ВС ($U_{eo} \sim 0.4-0.7$ В):

$$J_o = \frac{4U_{eo}}{R_s (r_2^2 - r_1^2)}. \quad (13)$$

Выразив J_o через площадь катодного кольца ВС и подставив найденное значение в выражение (3), получим формулу для расчета параметров ВС, обеспечивающих стойкость тиристора к эффекту dU/dt :

$$S_{\max} = \frac{4\pi U_{eo} \tau_o \eta (dU/dt)}{R_s (1 + \chi) q N_d X_n (U_{\max})}. \quad (14)$$

Таким образом, учет эффекта dU/dt приводит к ограничению площади, занимаемой кольцом катодного $n^+ - p$ -перехода ВС, величиной S_{\max} , определяемой из выражения (14). Входящие в (14) величины η и τ_o следует определять с помощью численного моделирования. Причем здесь вполне достаточно одномерной модели, использование которой не требует больших затрат времени и ресурсов. В данной работе вычисления проводились с помощью программы „Исследование“ [3].

Для определенности рассмотрим высоковольтный тиристор со следующим набором параметров: толщина n -базы $W_n = 1250$ мкм; концентрация донорной примеси в n -базе $N_d = 10^{13}$ см⁻³; время жизни неосновных носителей в n -базе при низком уровне инжекции $\tau_p = 100$ мкс; листовое сопротивление p -базы $R_s = 650$ Ом.

В результате численного моделирования были получены следующие значения величин, входящих в выражение (14): ширина ОПЗ в n -базе $X_n = 985$ мкм (при $U_{\max} = 8$ кВ); постоянная времени, характеризующая рост тока на начальном этапе процесса включения, $\tau_o = 0.16$ мкс; напряжение на катодном эмиттерном переходе ВС в точке переключения $U_{eo} = 0.44$ В. На рис. 2 приведена зависимость параметра η от скорости нарастания анодного напряжения при $U_{\max} = 8$ кВ.

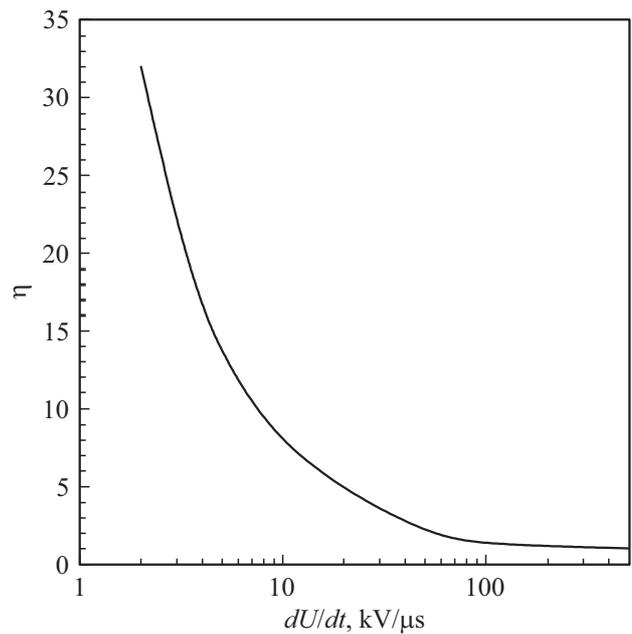


Рис. 2. Зависимость параметра η от скорости нарастания анодного напряжения.

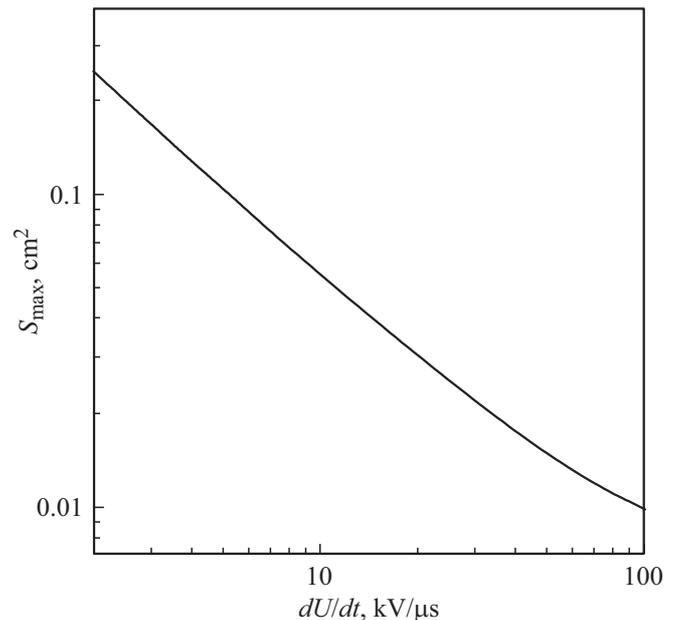


Рис. 3. Зависимость предельной площади катода вспомогательной тиристорной структуры от величины предельной скорости нарастания анодного напряжения.

Величина предельной площади ВС, согласно (14), зависит от критической скорости нарастания анодного напряжения dU/dt_{crit} (при заданной величине U_{\max}). На рис. 3 приведена зависимость $S_{\max}(dU/dt_{crit})$. В соответствии с данными рис. 3, чем выше требование к dU/dt -стойкости тиристора, тем должна быть меньше площадь, занимаемая катодом вспомогательного тири-

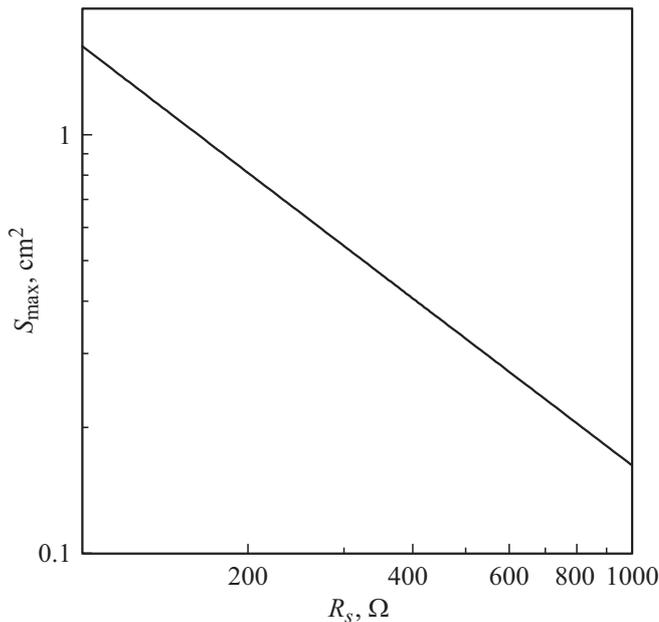


Рис. 4. Зависимость предельной площади катода вспомогательной тиристорной структуры от величины листового сопротивления слоя p -базы при $dU/dt_{\text{crit}} = 2$ кВ/мкс.

стора. Как следует из (14), площадь кольца зависит также от листового сопротивления p -базы. При увеличении R_s величина максимальной площади ВС уменьшается (рис. 4).

Полученный результат имеет простое объяснение. Уменьшение площади катодного кольца при заданной величине r_1 соответствует уменьшению ширины катодной области ВС, что приводит к возрастанию эффективности периферийного шунта, т.е. к увеличению тока утечки. Как следует из (1), рост утечки в катодном эмиттерном переходе приводит к увеличению критического заряда включения.

Выражение (14) можно использовать для оценки dU/dt -стойкости тиристорной структуры. При выбранных значениях r_1 , r_2 и R_s из выражения (14) может быть вычислена величина параметра η . После этого с помощью графика на рис. 2 можно найти искомую величину dU/dt_{crit} . Важно отметить, что при уменьшении площади кольца резко возрастает величина отпирающего тока управления тиристора I_{GT} . Поэтому с точки зрения оптимизации тиристора по чувствительности к сигналу управления следует выбирать параметры ВС таким образом, чтобы площадь кольца равнялась величине S_{max} . В этом случае при заданном dU/dt_{crit} мы имеем минимальную величину I_{GT} .

3. Минимальная величина отпирающего тока управления

Выразим величину I_{GT} через параметры тиристорной структуры. Будем рассматривать конструкцию регене-

ратора, показанную на рис. 1. Можно показать, что в статическом состоянии, соответствующем точке переключения тиристора, инжекция носителей из катодного эмиттерного перехода пренебрежимо мала, в результате практически весь ток управления идет на компенсацию потерь, связанных с утечкой в краевой шунт ВС. В этом случае уравнение, описывающее распределение напряжения на катодном эмиттерном переходе ВС от протекания тока управления, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_e}{dr} \right) &= 0, \\ \left. \frac{dU_e}{dr} \right|_{r_1} &= -R_s J_G, \\ U_e(r_2) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Отличие (15) от (4) состоит в отсутствии тока J_{co} , втекающего в p -базу равномерно по площади структуры. Решение (15) имеет вид

$$U_e(r) = \frac{J_G}{R_s} r_1 \ln \frac{r_2}{r}. \quad (16)$$

Линейную плотность отпирающего тока управления J_{GT} найдем из (16), положив максимальное напряжение на катодном эмиттерном переходе в точке $r = r_1$, равным U_{eo} . Получим

$$J_{GT} = \frac{U_{eo}}{r_1 \ln(r_2/r_1) R_s}. \quad (17)$$

При заданной величине листового сопротивления p -базы R_s и внутреннего радиуса ВС r_1 внешний радиус r_2 может быть найден из соотношения (14), обеспечивающего заданную dU/dt -стойкость тиристора. Подставляя r_2 в выражение (17), получим соотношение, связывающее минимальный отпирающий ток управления с параметрами регенеративного управляющего электрода и с величиной dU/dt_{crit} :

$$I_{GT \text{ min}} = \frac{2\pi U_{eo}}{R_s \ln \left[\frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{4U_{eo}\tau_o\eta(dU/dt_{\text{crit}})}{R_s(1+\chi)qN_dX_n(U_{\text{max}})} + r_1^2} \right]}. \quad (18)$$

Отметим, что в связи с неизбежным разбросом параметров структуры при проектировании тиристора нужно предусмотреть необходимый запас по величине dU/dt_{crit} .

4. Заключение

Таким образом, элементы конструкции мощного тиристора, не содержащие катодного эмиттерного перехода, могут существенно влиять на стойкость прибора к эффекту dU/dt . Это влияние, названное в работе „неодномерным эффектом dU/dt “, должно учитываться при проектировании тиристора. Рассмотрен неодномерный

эффект dU/dt , связанный с регенеративным управляющим электродом. Оказалось, что стойкость регенератора к воздействию эффекта dU/dt определяется площадью кольца катодного эмиттерного перехода вспомогательной тиристорной структуры, чем меньше площадь кольца, тем выше dU/dt -стойкость вспомогательного тиристора. Оказалось также, что чем выше dU/dt -стойкость регенератора, тем больше величина отпирающего тока управления тиристора. Получены выражения, позволяющие найти параметры регенератора, обеспечивающего заданную величину критической скорости нарастания напряжения при минимальном отпирающем токе управления.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.Н. Юрков, Т.Т. Мнацаканов, А.Г. Тандоев. ЖТФ, **88** (10), 1544 (2018).
- [2] А.И. Уваров. В сб.: *Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов* (Л., Наука, 1969) с. 194.
- [3] T.T. Mnatsakanov, I.L. Rostovtsev, N.I. Philatov. Solid-State Electron., **30**, 579 (1987).

Редактор Г.А. Оганесян

Non-uniform dU/dt -effect in power thyristors

S.N. Yurkov, T.T. Mnatsakanov, A.G. Tandoev

Moscow Power Engineering Institute,
111250 Moscow, Russia

Abstract The method allowing to take into account the influence of the design peculiarities of a power thyristor on its dU/dt parameter is described. A simple model is proposed, that makes it possible to find the parameters of the auxiliary thyristor structure that belongs to the regenerative control gate and provides the given value of the thyristor dU/dt parameter. The minimum possible value of turn-on current of the thyristor, limited by a given value of the maximum rate of voltage rise, is found.