

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ СИЛОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Мускатыньев А. А., Мускатыньев А. В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

Аннотация. В статье рассматриваются особенности построения прибора для измерения токов утечки силовых полупроводниковых приборов. Построение силового генератора испытательных импульсов по новому принципу как системы с обратной связью и применение современной элементной базы позволяет решить основную проблему измерения активной составляющей указанного параметра с высокой точностью в широком диапазоне температур.

Ключевые понятия: силовой тиристор, силовой диод, ток утечки, класс по напряжению.

Постановка задачи

Токи утечки силовых полупроводниковых приборов являются важным показателем их надежности и работоспособности. Измерение и контроль этих параметров проводится как на этапе изготовления, так и в процессе эксплуатации приборов. Под токами утечек будем подразумевать повторяющийся импульсный обратный ток для диодов, а для тиристоров - повторяющийся импульсный обратный ток и повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии.

В соответствии с ГОСТ [1] измерение токов утечек производится амплитудным вольтметром при подаче на испытуемый прибор, нагретый до максимальной температуры, однополупериодных синусоидальных импульсов напряжения, частотой от одиночных до 50 Гц. Амплитуда импульсов должна соответствовать повторяющемуся напряжению. Приведенные требования позволяли строить простую и надежную, хотя и громоздкую, измерительную аппаратуру с ручной регулировкой испытательного напряжения. Поскольку испытания проводились при максимальной температуре, то наличие емкостной составляющей тока утечки несущественно сказывалось на результате измерения ввиду ее малости по сравнению с активной составляющей тока утечки. Со времени появления указанного стандарта прошло достаточно много времени, за которое существенно улучшилась технология изготовления силовых полупроводниковых приборов. Были разработаны разновидности автоматических измерительных приборов для контроля токов утечки, появились методики оценки работоспособности силовых приборов по величине их токов утечки в холодном состоянии. Как правило, для решения этой задачи применялись испытательные однократные импульсы иной формы, с плоской вершиной, что позволяло подавлять емкостную составляющую тока прибора, поскольку при комнатных температурах она существенно превышает активную даже при небольшой скорости изменения во времени испытательного напряжения.

В статье анализируется новая структура высоковольтного генератора импульсов с плоской вершиной, стабилизированной обратной связью.

Метод решения

Рассмотрим функциональную схему импульсного генератора, предлагаемую в качестве объекта исследования и показанную на рис. 1.

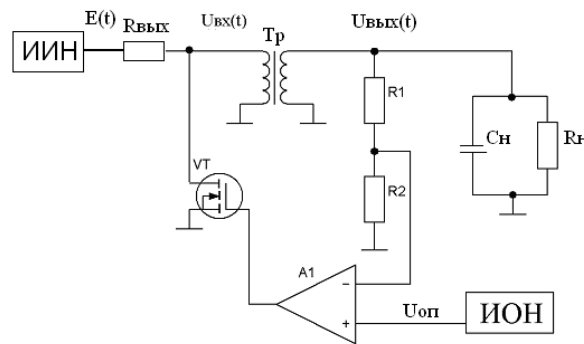


Рис. 1. Функциональная схема генератора

Импульсный источник напряжения (ИИН) имеет ограниченный запас энергии и формирует однократный импульс $E(t)$ полусинусоидальной или экспоненциальной формы. Такой импульс может быть получен при разряде заряженного конденсатора на LC (RC) контур или сформирован из напряжения сети. Этот импульс подается на первичную обмотку повышающего трансформатора Tr , с выхода которого увеличенный в n раз (где n — коэффициент трансформации) прикладывается к нагрузке, которая на схеме представлена в виде эквивалентных величин C_n и R_n , нелинейно зависящих от приложенного напряжения. Напряжение с делителя R_1 - R_2 , пропорциональное выходному $U_{вых}(t)$, сравнивается с опорным $U_{оп}$, снимаемым с выхода источника опорного напряжения (ИОН). В момент их равенства замыкается обратная связь и на выходе усилителя $A1$ формируется сигнал, управляющий регулирующим транзистором VT таким образом, что напряжение на нагрузке поддерживается постоянным и пропорциональным $U_{оп}$ в течение интервала времени, определяемого количеством запасенной в ИИТ энергии.

Стабилизация напряжения на нагрузке возможна вследствие конечного значения выходного сопротивления $R_{вых}$ источника сигнала $E(t)$. Таким образом, до момента замыкания обратной связи напряжение $U_{вх}(t)$ на входе трансформатора повторяет форму напряжения источника импульсов, и в режиме трансформатора близком к холостому ходу примерно равно ему, то есть $U_{вх}(t) \approx E(t)$.

Представим функциональную схему генератора (рис. 1) в виде блок-схемы, показанной на рис. 2. На схеме приняты следующие обозначения:

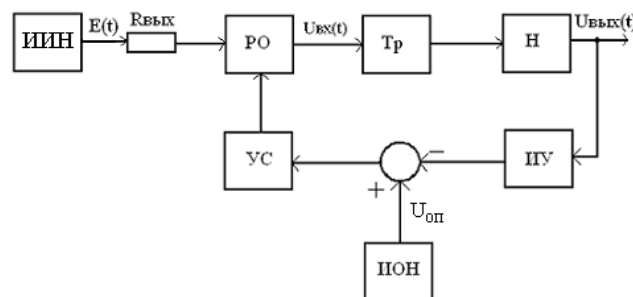


Рис. 2. Блок-схема генератора

РО — регулирующий орган, в качестве которого может быть использован биполярный или униполярный транзистор, Н — нагрузка в виде силового полупроводникового прибора в состоянии низкой проводимости, ИУ — измерительное устройство (делитель напряжения), УС — усилитель сигнала рассогласования.

При анализе устойчивости замкнутой системы автоматического регулирования (САР), построенной по схеме рис. 2, будем учитывать управляющее (задающее) воздействие $U_{зад}(p)$, которым является изображение по Лапласу приращения напряжения опорного источника. Тогда структурная схема САР примет вид, показанный на рис.3.

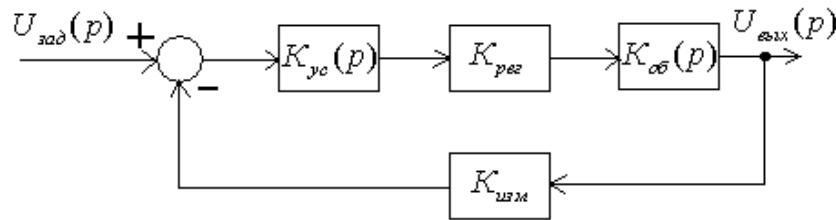


Рис. 3. Структурная схема САР для задающего воздействия.

На рис.3 приняты следующие обозначения: $K_{ус}(p) = K_0 / (1 + pT_{ус})$ – передаточная характеристика усилителя сигнала рассогласования с коэффициентом усиления по постоянному току K_0 и постоянной времени $T_{ус}$; $K_{рег}$ – коэффициент передачи регулятора, в качестве которого выступает регулирующий транзистор; $K_{изм}$ – коэффициент передачи измерительного звена; $K_{об}(p) = n / (T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)$ – передаточная характеристика объекта регулирования, под которым подразумевается повышающий трансформатора с активно-емкостной нагрузкой, в качестве которой выступает тиристор или диод, находящийся в состоянии малой проводимости. В этой формуле: n – коэффициент трансформации; $T_0 = \sqrt{L_{с\ экв} * C'_{н\ экв}}$ – постоянная времени объекта регулирования, выраженная через эквивалентную индуктивность рассеяния $L_{с\ экв}$ и приведенную к первичной обмотке емкость нагрузки $C'_{н\ экв}$; ξ – коэффициент

затухания, который можно определить как: $\xi = \left(\frac{L_{с\ экв}}{R'_H} + r_1 * C'_{н\ экв} \right) / \left(2\sqrt{L_{с\ экв} * C'_{н\ экв}} \right)$, где R'_H и r_1 приведенное сопротивление

нагрузки и сопротивление первичной обмотки трансформатора соответственно. При выводе передаточной функции объекта регулирования индуктивностью намагничивания пренебрегли.

Данная система относится к классу стабилизирующих САР [1]. Стабилизация напряжения на нагрузке (выход объекта регулирования) осуществляется за время формирования «полки» испытательного напряжения $U_{вых}(t)$, длительность которой t_n ограничивает время установления режима стабилизации напряжения (рис. 4).

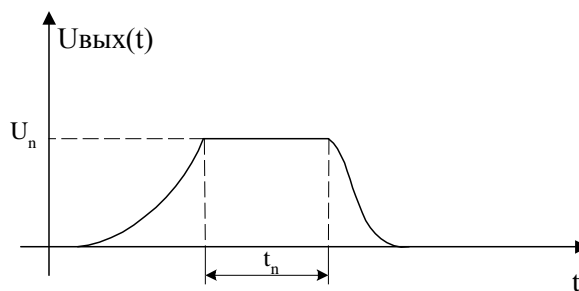


Рис. 4. Форма выходного импульса напряжения на нагрузке

Для оценки устойчивости рассмотрим характеристическое уравнение замкнутой системы (рис. 3) для задающего воздействия $U_{зад}(p)$:

$$1 + W_p(p) = 0, \quad (1)$$

где $W_p(p) = K_{рег} * K_{ус}(p) * K_{об}(p) * K_{изм}$ – передаточная характеристика разомкнутой системы (рис. 3).

С учетом передаточных функций САР выражение (1) окончательно примет вид:

$$T_{ус} T_0^2 p^3 + (T_0^2 + 2\xi T_0 T_{ус}) p^2 + (T_{ус} + 2\xi T_0) p + K_c + 1 = 0, \quad (2)$$

где $K_c = K_{рег} * K_0 * n * K_{изм}$ - статический коэффициент передачи разомкнутой системы.

Исследуем уравнение (2) на устойчивость замкнутой системы, применяя алгебраический критерий Гурвица [2]. Для обеспечения устойчивости замкнутой системы величина статического коэффициента усиления разомкнутой системы K_c должна определяться следующим выражением:

$$K_c < 2\xi \left(T_{yc}/T_0 + T_0/T_{yc} + 2\xi \right). \quad (3)$$

В формуле (3) величины ξ и T_0 взаимосвязаны через параметры $L_{сэкв}$ и $C'_{нэкв}$, которые могут меняться в определенных пределах. Кроме этого, постоянная времени T_{yc} отечественных операционных усилителей без цепи обратной связи лежит в диапазоне 0,0003 ? 0,016 с. Для оценки K_c проведем его расчет по формуле (3) для постоянных значений T_{yc} и $L_{сэкв}$ при изменении $C'_{нэкв}$ в диапазоне $(0,04 - 2) \cdot 10^{-6}$ Ф. Результаты расчетов представлены на рис. 5 – 7.

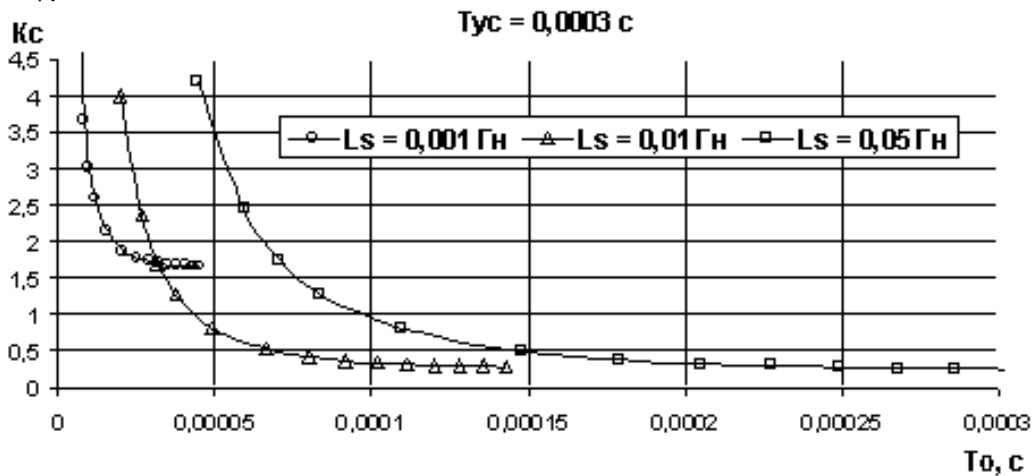


Рис. 5. Зависимость K_c от параметров системы для $T_{yc} = 0,0003$ с

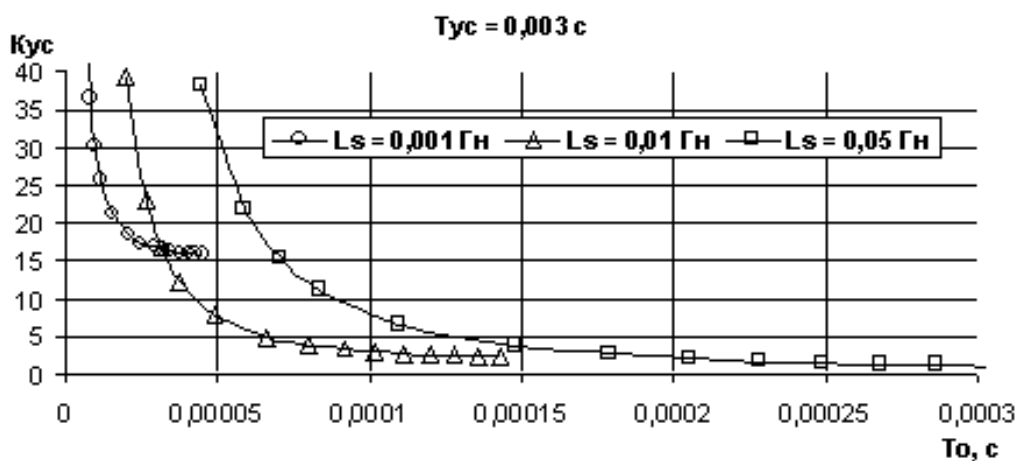


Рис. 6. Зависимость K_c от параметров системы для $T_{yc} = 0,003$ с

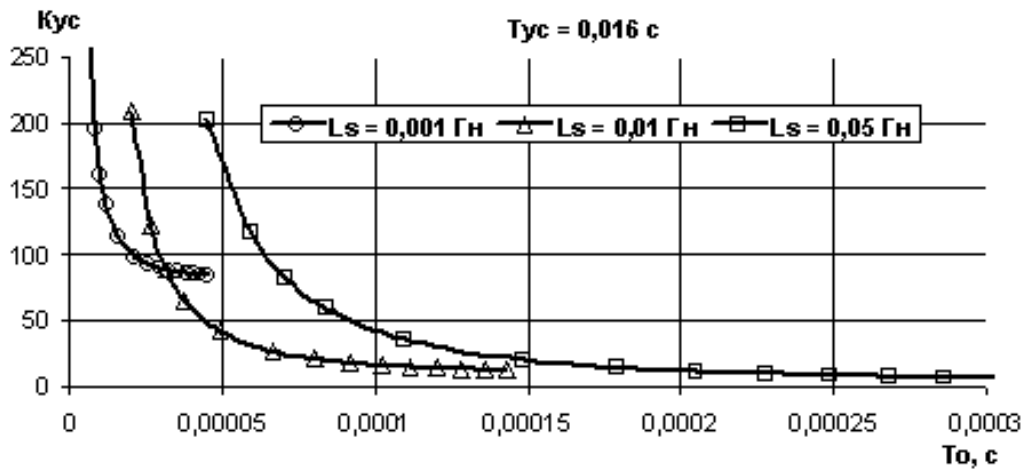


Рис. 7. Зависимость K_c от параметров системы для $T_{yc} = 0,016$ с

Кривые на рис. 5 – 7 ограничивают «сверху» допустимые значения коэффициента усиления разомкнутой системы. Сравнивая полученные диаграммы можно сделать следующие выводы:

1. Существует сильная зависимость K_c от постоянных времени T_{yc} и T_0 . С увеличением T_{yc} допустимое значение усиления разомкнутой системы существенно растет. Это указывает на целесообразность применения в качестве усилителей сигнала рассогласования низкочастотных операционных, с внутренней коррекцией.

2. С ростом T_0 наблюдается резкий спад значения K_c , что в конечном итоге, позволяет сделать вывод об отрицательном влиянии роста значений $L_{сэКВ}$ и $C'_{нэКВ}$ на устойчивость системы регулирования. Так как в расчетах используется приведенная емкость нагрузки $C'_{нэКВ}$ то отрицательное влияние больших величин коэффициента трансформации n очевидно.

Заключение

Следует отметить, что на этом этапе исследования определены только необходимые требования к параметрам элементов САР с целью обеспечения устойчивости системы. Однако вопросы о запасе устойчивости, качестве и времени переходных процессов в системе, остаются пока открытыми. Открытым также остается вопрос достижения больших значений K_c разомкнутой САР при ощутимых величинах $L_{сэКВ}$, например для $L_{сэКВ} \square 0,001$ Гн. Это потребует введения и цепей частотной коррекции.

Примечания

¹ См.: Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. Учебн. пособие для электротехн. специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1973. 528 с.

² См.: Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

Сведения об авторах

Мускатиньев Андрей Александрович – кандидат технических наук, УФК по РМ, e-mail: a_muskat@mail.ru

Мускатиньев Александр Валентинович – кандидат технических наук, доцент, Мордовский госуниверситет им. Н. П. Огарева, e-mail: muskatav@mail.ru