

ОЦЕНКА НА ЗАГУБИТЕ В СИЛОВИ ЕЛЕКТРОННИ СТРУКТУРИ ПРИ КЛЮЧОВ РЕЖИМ

Константин Тричков

Минно-геоложки университет
 "Св. Иван Рилски"
 София 1700, България

Боряна Петрова

Минно-геоложки университет
 "Св. Иван Рилски"
 София 1700, България

РЕЗЮМЕ

Изследва се теоретично възможността за възникване на максимални загуби при превключване на силова електронна структура (транзистор, IGBT и др.), която работи в ключов режим. Като зададени се приемат времетраенето на процеса превключване и максималната възможна скорост на изменение на проводимостта на елемента. Допуска се, че поради наличието на смущения и други отклонения от нормалния режим, формата на сигнала, управляващ силовия елемент може да се изменя по произволен закон. Определят се най-неблагоприятният закон за изменение на проводимостта и стойността на обусловените от него загуби.

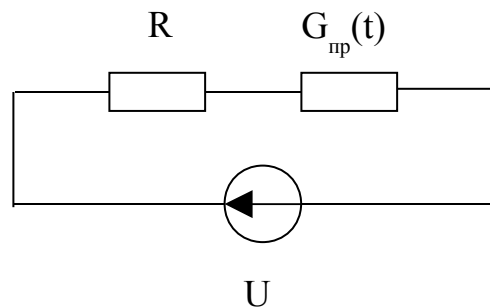
Известно е (Табаков), че съществена част от загубите в електронните преобразователи се отделят в превключващите електронни елементи. Начините за определяне на тези загуби се разглеждат в голям брой публикации (Табаков; Григорова, Гитева и др.). Във всички случаи се предполага, че законът за изменение на управляващия сигнал във времето е известен и близък до оптималния с оглед минимизиране на загубите при превключване (запушване и отпушване). Съществуват редица формули, които определят загубите в зависимост от електрическите характеристики на силовия режим и на управляващите импулси.

Загубите при превключване в силовите елементи са съществени за КПД на преобразователя и за надеждната му работа, тъй като силов транзистор или IGBT се повреждат необратимо дори и при малко надхвърляне на допустимите загуби в тях. От друга страна съществува възможност в определен момент поради външно въздействие формата на управляващия импулс да получи значително изменение. Ето защо в настоящата работа се изследват условията за отделяне на максимална мощност в силовия елемент при превключване, като се допуска някаква зададена трайност ΔT на процеса и се търси най-неблагоприятният закон за протичане на превключването. Тук трябва да се отчете и физическият факт, че всеки превключващ елемент, независимо от вида му, притежава някаква максимална скорост на изменение на проводимостта във времето

$$G_{MOT}^I \left[\frac{\Omega^{-1}}{s} \right] > 0 \text{ при отпушване и } G_{M3}^I \left[\frac{\Omega^{-1}}{s} \right] < 0 \text{ при}$$

запушване. Поради сложността на явлениято с първо приближение се допуска, че тези максимални скорости са постоянни в целия диапазон на изменение на G .

Нека товарът е чисто активен, като евентуалното наличие на паразитна индуктивност се пренебрегва. Пренебрегва се и капацитетът на превключващия елемент. Заместващата схема има вида показан на **фиг. 1**.



Фигура 1

Задачата при отпушване се формулира по следния начин. Търси се вида на функцията $G_{пр}=G_{пр}(t)$ в интервала от: $t = 0$ до $t = \Delta T_{OT} > 0$, като $G_{пр}(\Delta T) = G_{прMAX}$,

$\frac{dG_{пр}}{dt} \leq G_{MOT}^I$ за $0 \leq t \leq \Delta T_{OT}$, при който вид на функцията величината:

$$\Delta W = \int_0^{\Delta T_{OT}} U^2 \frac{G_{пр}(t)}{(RG_{пр}(t) + 1)^2} dt = Max .$$

Вариационният анализ, съобразен с поставените ограничения е доста обемист. В резултат се получава следното решение. За:

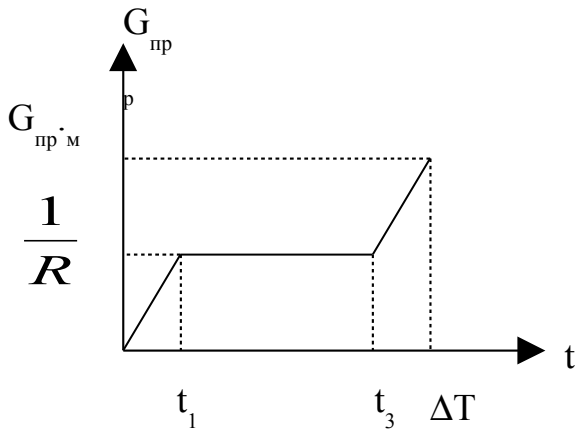
$$0 \leq t \leq t_1; G_{ПР}(t) = \frac{t}{Rt_1};$$

$$\text{за } t_1 \leq t \leq t_2; G_{ПР}(t) = \frac{1}{R};$$

$$\text{за } t_2 \leq t \leq \Delta T_{OT}; G_{ПР}(t) = G_{ПРМ} - \Delta T_{OT} G_{МОТ}^I, \text{ нъдето}$$

$$t_1 = \frac{1}{RG_{МОТ}^I}; t_2 = \Delta T_{OT} - \frac{G_{ПРМ} - \frac{1}{R}}{G_{МОТ}^I}.$$

Графиката е показана на **фиг. 2**.



Фигура 2

При намерения закон за изменение на величината $G_{ПР}$ във времето, максималната енергия, която се отделя в елемента при едно отпушване се определя от формулата:

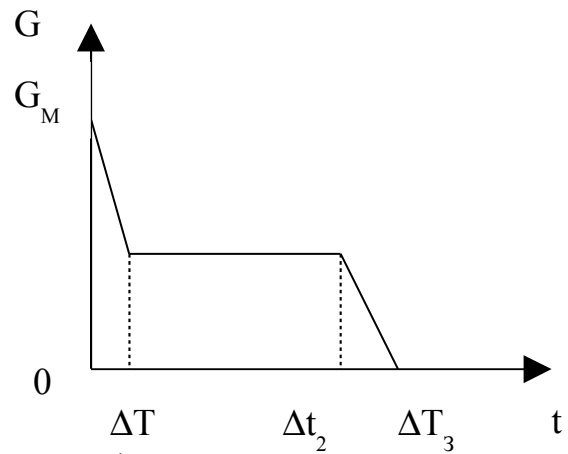
$$\begin{aligned} \Delta W_{OT} &= \frac{U^2}{4R} \left(\Delta T_{OT} - \frac{G_{ПРМ}}{G_{МОТ}^I} \right) + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{МОТ}^I} \left[\ln \frac{RG_{ПРМ} + 1}{2} + \frac{1}{RG_{ПРМ} + 1} - 0,31 \right] = \\ &= \frac{U^2}{4R} \left(\Delta T_{OT} - \frac{G_{ПРМ}}{G_{МОТ}^I} \right) + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{МОТ}^I} \left[\ln(RG_{ПРМ} + 1) + \frac{1}{RG_{ПРМ} + 1} - 1 \right] \end{aligned}$$

За всички реални случаи $RG_{ПРМ} \gg 1$, т.е. проводимостта на напълно отпушения транзистор е много по-голяма от проводимостта на чисто активния товар. Освен

това може да се отбележи, че ако времето за отпушване ΔT на транзистора е много по-голямо от отношението $G_{ПРМ} / G_{МОТ}^I$, може с малка положителна грешка да се използва опростената формула:

$$\Delta W = \frac{U^2}{4R} \Delta T.$$

При запусване на превключващия елемент се провежда аналогично изследване. Установява се, че максимална енергия при еднократно запусване се отделя, когато проводимостта на ключовия елемент се изменя съгласно кривата на **фиг. 3**.



Фигура 3

За общата енергия, отделена в елемента при това се получава израза:

$$\begin{aligned} \Delta W_3 &= \frac{U^2}{4R} \left[\Delta T_3 - \frac{G_{ПРМ}}{G_{МЗ}^I} \right] + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{МЗ}^I} \left[\ln \frac{RG_{ПРМ} + 1}{2} + \frac{1}{RG_{ПРМ} + 1} - 0,31 \right] = \\ &= \frac{U^2}{4R} \left[\Delta T_3 - \frac{G_{ПРМ}}{G_{МЗ}^I} \right] + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{МЗ}^I} \left[\ln(RG_{ПРМ} + 1) + \frac{1}{RG_{ПРМ} + 1} - 1 \right]. \end{aligned}$$

За да се създаде по-добра представа за големината на получената горна граница на загубите ще бъдат определени загубите при две по-вероятни хипотези за протичане на процеса запусване. Първата хипотеза допуска, че по време на запусването с трайност ΔT_3 напрежението на изводите на превключващия елемент нараства по линейен закон:

$u = U \frac{t}{\Delta T_3}$, където U е постоянното напрежение на захранващия източник. При чисто активен товар R токът по време на запусването се изменя по закона: $i = \frac{U}{R} \left(1 - \frac{t}{\Delta T} \right)$

Тогава за загубите се получава:

$$\Delta W_3 = \frac{U^2}{6R} \Delta T_3.$$

Този резултат е примерно с 30 % по-малък от определената горна граница.

При втората хипотеза се допуска, че по времето ΔT_3 на процеса проводимостта на превключващия елемент намалява по линеен закон от максималната си стойност $G_{пр}$ до нула. В този случай се получава:

$$\Delta W_3 = \frac{U^2 \Delta T}{R^2 G_M} \left(\ln(RG_M + 1) + \frac{1}{RG_M + 1} - 1 \right)$$

Тъй като винаги $RG_M \gg 1$ при направеното второ предположение се получават няколко пъти по-малки загуби в сравнение с първото.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати позволяват да се преценят загубите при превключване с някаква положителна грешка в случаите, когато липсват данни за точното протичане на процесите. За определянето на горната граница е достатъчно да се познават номиналното напрежение, номиналният ток и времената за пълно отпушване и пълно запусване, които е възможно да се определят от осцилограма на работния ток.

ЛИТЕРАТУРА

Гитева и др. Калориметрични измервания на загубите в транзистори. Годишник на ИЦМ, т. 24, Пловдив.
Григорова, Ц. Изследване и симулации на автономни инвертори с ограничителни диоди. Автореферат на дисертация.
Табakov, С. Хабилицационен труд.

ASSESSMENT FF LOSSES IN POWER ELECTRONIC STRUCTURES IN KEY MODE

Konstantin Trichkov

*University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria*

Boryana Petrova

*University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria*

SUMMARY

Theoretical investigation of the possibility of maximum losses while switching a power electronic structure (transistor, IGBT, etc.) in key mode operation. The settings are; switch process duration and maximum possible change rate of element conductivity. The presumption is that because of noise and other deviations from normal mode, the form of signal, which governs the power element, can be changed according to an arbitrary rule. Determined are the most unfavorable rule to change conductivity and the value of its losses.

We know (S. Tabakov, Research work for academic degree) that a significant part of losses in electronic converters are to be found in switching electronic elements. The way to determine these losses is treated by a great number of publications (S. Tabakov, хабилитационен труд, Tz. Grigorova, Paper On дисертация, Giteva etc., Annual Of IZM). In all cases it is presumed that the rule of changing the governor signal upon the time is known and that it is near to the optimum in order to minimize losses on switching (conducting and blocking). There are a number of formulas to determine losses according to the electric parameters of the power mode and governing impulse.

The losses at blocking the power elements are significant for the converter efficiency as well as for its reliable operation, since a power transistor or IGBT is damaged irreversibly even at a lower excess of admissible losses. On the other hand, it is possible that at a given moment, due to some external influence, the governing impulse form is changed considerably to separate the maximum capacity of the power element while switching. We presume a given duration of ΔT of the process and we are looking for the most unfavorable switching rule. We have to take into consideration that it is a physical fact that each switch element, regardless of its kind, has some maximum conductivity

change rate upon the time. $G'_{MOT} \left[\frac{\Omega^{-1}}{s} \right] > 0$ for conducting and

$$G'_{M3} \left[\frac{\Omega^{-1}}{s} \right] < 0 \text{ for blocking.}$$

Because of the complexity of this phenomenon we can admit with first approximation that this maximum rate is a constant for the whole range of change G.

When load is purely active and the presence of parasitic inductivity is not taken into consideration, the capacity of switching element is also not taken into consideration.

The replacing diagram is shown on Figure 1.

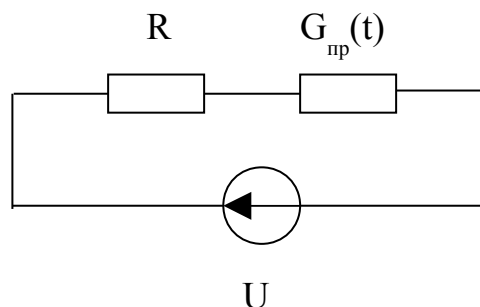


Figure 1.

The task for the conductivity case is determined as follows: We search the kind of function $G_{PP}=G_{PP}(t)$ in the interval from:

$$t = 0 \text{ to } t = \Delta T_{OT} > 0, \text{ whereas } G_{PP}(\Delta T) = G_{PPMAX},$$

$$\frac{dG_{PP}}{dt} \leq G'_{MOT} \text{ for } 0 \leq t \leq \Delta T_{OT},$$

whereas the value is

$$\Delta W = \int_0^{\Delta T_{OT}} U^2 \frac{G_{PP}(t)}{(RG_{PP}(t) + 1)^2} dt = \text{Max}.$$

The variation analysis, according to the restrictions is quite large. As a result we get the following solution. For:

$$0 \leq t \leq t_1; G_{\Pi P}(t) = \frac{t}{Rt_1};$$

$$\text{for } t_1 \leq t \leq t_2; G_{\Pi P}(t) = \frac{1}{R};$$

$$\text{for } t_2 \leq t \leq \Delta T_{OT}; G_{\Pi P}(t) = G_{\Pi PM} - \Delta T_{OT} G_{MOT}^I, \text{ where}$$

$$t_1 = \frac{1}{RG_{MOT}^I}; t_2 = \Delta T_{OT} - \frac{G_{\Pi PM} - \frac{1}{R}}{G_{MOT}^I}.$$

The graph is shown on Figure 2.

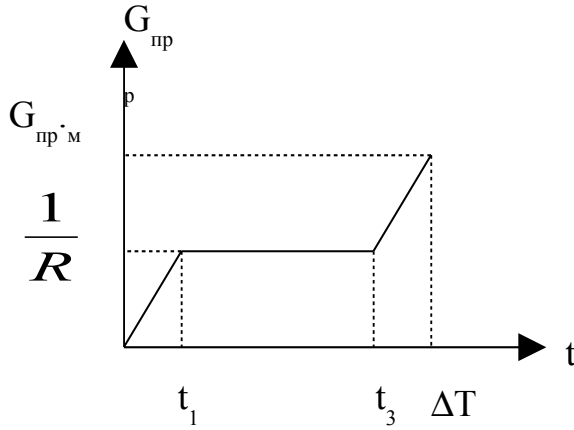


Figure 2.

The rule for change of the value $G_{\Pi P}$ upon the time shows that the maximum energy emitted by the element during one conducting state is determined by the formula:

$$\begin{aligned} \Delta W_{OT} &= \frac{U^2}{4R} \left(\Delta T_{OT} - \frac{G_{\Pi PM}}{G_{MOT}^I} \right) + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{MOT}^I} \left[\ln \frac{RG_{\Pi PM} + 1}{2} + \frac{1}{RG_{\Pi PM} + 1} - 0,31 \right] = \\ &= \frac{U^2}{4R} \left(\Delta T_{OT} - \frac{G_{\Pi PM}}{G_{MOT}^I} \right) + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{MOT}^I} \left[\ln(RG_{\Pi PM} + 1) + \frac{1}{RG_{\Pi PM} + 1} - 1 \right] \end{aligned}$$

For all real cases $RG_{\Pi PM} \gg 1$, or the conductivity of the transistor in complete conducting state is much greater than the conductivity of the purely active load. If the time for blocking the transistor ΔT is much greater than the relation $\frac{G_{\Pi PM}}{G_{MOT}^I}$, we can use the simplified formula with a small positive error:

$$\Delta W = \frac{U^2}{4R} \Delta T.$$

When the switching element is blocked, we do the same investigation. It is obvious that the maximum energy at a single blocking is emitted when the conductivity of the key element is changed according to the graph from Figure 3.

For the total energy emitted by the element we get the equation:

$$\begin{aligned} \Delta W_3 &= \frac{U^2}{4R} \left[\Delta T_3 - \frac{G_{\Pi PM}}{G_{M3}^I} \right] + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{M3}^I} \left[\ln \frac{RG_{\Pi PM} + 1}{2} + \frac{1}{RG_{\Pi PM} + 1} - 0,31 \right] = \\ &= \frac{U^2}{4R} \left[\Delta T_3 - \frac{G_{\Pi PM}}{G_{M3}^I} \right] + \\ &+ \frac{U^2}{R^2 G_{M3}^I} \left[\ln(RG_{\Pi PM} + 1) + \frac{1}{RG_{\Pi PM} + 1} - 1 \right]. \end{aligned}$$

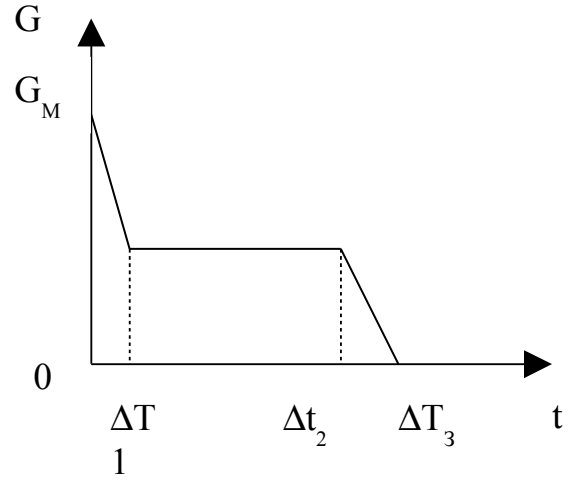


Figure 3.

To have a better idea of the dimension of the upper limit of losses, we will determine the losses at two more probable hypotheses for the blocking process. The first one admits that during blocking with duration ΔT , the voltage at the ends of the switching element grows according to a linear rule:

$$u = U \frac{t}{\Delta T_3}, \text{ where } U \text{ is the constant voltage of the power}$$

supply source. When the load is purely active, the current during blocking is changed according to the rule:

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - \frac{t}{\Delta T} \right)$$

Losses are;

$$\Delta W_3 = \frac{U^2}{6R} \Delta T_3.$$

The result is for example by 30% less than the determined upper limit.

According to the second hypothesis, we admit that during time ΔT , the switching element conductance is lowered from its maximum value to zero, according to a linear rule. In this case we have:

$$\Delta W_3 = \frac{U^2 \Delta T}{R^2 G_M} \left(\ln(RG_M + 1) + \frac{1}{RG_M + 1} - 1 \right)$$

Because of $RG_M \gg 1$, during the second assumption, we have losses several times less than during the first one.

CONCLUSION

The results enable us to assess with a certain positive error the cases when there is no exact data about the processes. To determine the upper limit, it is sufficient to know the nominal voltage, nominal current and time for full conducting and blocking. They can be determined by an oscillogram of the work current.

REFERENCES

- Гитева и др. Калориметрични измервания на загубите в транзистори. Годишник на ИЦМ, т. 24, Пловдив.
Григорова, Ц. Изследване и симулации на автономни инвертори с ограничителни диоди. Автореферат на дисертация.
Табakov, С. Хабилитационен труд.

*Recommended for publication by Department
of Electrical Engineering, Faculty of Mining Electromechanics*