

В. Ф. Безотосний, Е. В. Власенко, В. В. Козлов, О. В. Набокова

Неруйнівний контроль властивостей матеріалів частотно-балансовим методом накладними електромагнітними перетворювачами

У роботі представлено результати досліджень запропонованого частотно-балансового способу неруйнівного контролю властивостей матеріалів, отримано аналітичні залежності для розрахунків частоти балансу. Показано, що застосування частотного методу дозволяє значно зменшити вплив девіації значення намагнічувального струму на точність вимірювань, спосіб дозволяє застосовувати стандартну цифрову вимірювальну апаратуру, а результати вимірювань незначно залежать від значення повітряного зазору між поверхнею деталі й полюсами датчика, що додатково підвищує чутливість, роздільну здатність і точність контролю електромагнітних властивостей матеріалів.

Ключові слова: контроль неруйнівний, датчик, метод частотно-балансовий.

V. F. Bezotosnyiy, E. V. Vlasenko, V. V. Kozlov, O. V. Nabokova

Non-destructive control of materials properties by the frequency balanced method with superimposed electromagnetic converters

The paper represents the results of non-destructive control of materials properties by the proposed frequency-balanced method and the achieved analytic dependences for balance frequency calculation. It is shown that the frequency method appreciably decreases the influence of magnetizing current value deviation on the measurement accuracy. The method permits to use the standard digital instrumentation, and the results of measurements slightly depend on the air gap between the workpiece surface and the transducer poles. That additionally increases the sensitivity, resolution and accuracy of materials electromagnetic properties control.

Key words: non-destructive control, transducer, frequency balanced method.

УДК 621.314.63

В. С. Остренко¹, О. В. Василенко¹

¹Канд. техн. наук Запорожская государственная инженерная академия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ ТИРИСТОРА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

Эта статья посвящена методике определения максимального и минимального значения температуры полупроводниковой структуры тиристорных выпрямителей, работающих в режиме циклически изменяющейся нагрузки. Это позволяет определять максимально допустимое значение тока через тиристор и определить ориентировочное значение срока работы тиристорных структур при циклической нагрузке.

Ключевые слова: тиристор, температура полупроводниковой структуры, циклический режим, тепловое сопротивление.

Тиристорные выпрямители нашли широкое применение в электроприводах постоянного тока. Чаще всего тиристорные выпрямители работают в режимах циклической нагрузки, при которых допускаются протекание тока нагрузки выше номинального значения для длительного режима работы, то есть протекание тока перегрузки. Кратность и длительность протекания токов перегрузки приводятся в технических условиях на преобразователи [1]. Исходя из условия, что в режиме циклической нагрузки среднеквадратичное значение тока нагрузки не должно превышать номинального значения тока выпрямителя, можно определить параметры циклической нагрузки:

$$I_{\text{НОМ}} = I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{(k_{\text{П}} \cdot I_{\text{НОМ}})^2 \cdot t_{\text{П}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{П}}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{НОМ}}$ – номинальное значение тока нагрузки выпрямителя; I_{RMS} – среднеквадратичное значение тока нагрузки выпрямителя; $k_{\text{П}}$ – коэффициент перегрузки; $t_{\text{П}}$ – длительность протекания тока перегрузки; $t_{\text{П}}$ – длительность безтоковой паузы в цикле.

Решая уравнение (1) относительно $t_{\text{П}}$, получим:

$$t_{\text{П}} = (k_{\text{П}}^2 - 1) \cdot t_{\text{П}}, \quad (2)$$

а с учетом того, что длительность цикла равна сумме длительностей перегрузки и паузы, получим:

$$t_{\text{С}} = k_{\text{П}}^2 \cdot t_{\text{П}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{С}}$ – длительность цикла.

Определение значения максимальной температуры полупроводниковой структуры тиристорных структур при заданном режиме нагрузки током является всегда актуальным, так как надежность его работы в значительной мере зависит от значения этой температуры. Значение максимальной температуры полупроводниковой структуры тиристора в квазистационарном циклическом режиме обычно определяется, используя формулу [2]:

$$T_{\text{jmax}} = P \left[\frac{t_{\text{П}}}{t_{\text{С}}} R_{\text{thja}} + \left(1 - \frac{t_{\text{П}}}{t_{\text{С}}}\right) \cdot Z_{\text{thja}}(t_{\text{П}} + t_{\text{С}}) \right]$$

$$-Z_{thja}(t_c) + Z_{thja}(t_p) \Big] + T_{amb}, \quad (4)$$

где T_{jmax} – значение максимальной температуры полупроводниковой структуры в цикле, рис. 1; P – потери мощности в тиристоре при протекании тока I_T ; R_{thja} – тепловое сопротивление системы тиристор-охладитель; $Z_{thja}(t_p + t_c)$, $Z_{thja}(t_c)$, $Z_{thja}(t_p)$ – значения переходного теплового сопротивления системы тиристор – охладитель для моментов времени $(t_p + t_c)$, (t_c) , (t_p) соответственно; T_{amb} – температура окружающей (охлаждающей) среды.

Так как срок безотказной работы тиристорov в режиме циклической нагрузки зависит не только от значения максимальной температуры, а и от перепада температуры в цикле, то необходимо определять минимальное значение температуры.

Минимальное значение температуры полупроводниковой структуры тиристора при работе в квазистационарном режиме циклической нагрузки можно определить по формуле:

$$T_{jmin} = P \cdot \left[\left(\frac{t_p}{t_c} \right) R_{thja} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c} \right) \cdot Z_{thja}(t_c) - Z_{thja}(t_c - t_p) \right] + T_{amb}, \quad (5)$$

где T_{jmin} – минимальное значение температуры полупроводниковой структуры тиристора, рис. 1.

Эмпирическая формула (5) позволяет определить минимальное значение температуры полупроводниковой структуры с относительной погрешностью не более 3 %, что проверено методом суперпозиции на 50 циклах в математическом процессоре Mathcad 11.

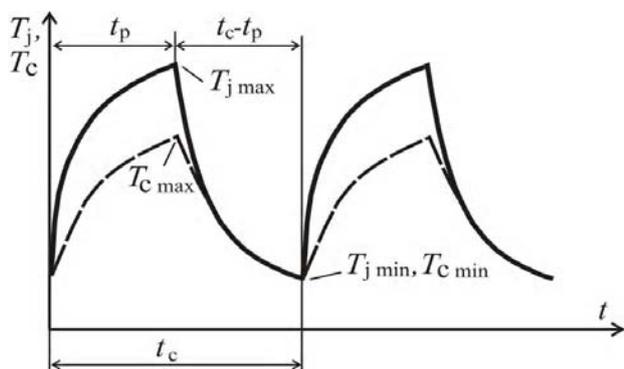


Рис. 1. Изменение температуры тиристора в квазистационарном циклическом режиме работы

Перепад температуры в цикле можно определить по формуле:

$$\Delta T_j = T_{jmax} - T_{jmin} = P \cdot \left[\left(1 - \frac{t_p}{t_c} \right) \cdot Z_{thja}(t_c + t_p) - \left(2 - \frac{t_p}{t_c} \right) \cdot Z_{thja}(t_c) + Z_{thja}(t_p) + Z_{thja}(t_c - t_p) \right]. \quad (6)$$

При проведении типовых испытаний выпрямителя непосредственное измерение температуры полупроводниковой структуры тиристора невозможно, Поэтому ее можно определить по формуле:

$$T_j(t) = P \cdot [Z_{thjC}(t) + R_{thadd}] + T_C(t), \quad (7)$$

где $Z_{thjC}(t)$ – переходное тепловое сопротивление тиристора; R_{thadd} – дополнение к переходному тепловому сопротивлению тиристора учитывающее форму и длительность импульсов протекающего тока; $T_C(t)$ – температура корпуса тиристора, которая измеряется с помощью термопары, или определяется по формуле:

$$T_C(t) = P \cdot [R_{thCH} + Z_{thH}(t)] + T_{amb}, \quad (8)$$

где R_{thCH} – тепловое сопротивление контакта корпус тиристора – охладитель; $Z_{thH}(t)$ – переходное тепловое сопротивление охладителя.

При работе выпрямителя в режимах циклической нагрузки температура корпуса тиристора также циклически изменяется, рис. 1.

Максимальное и минимальное значение этой температуры можно определить по следующим формулам:

$$T_{Cmax} = P \cdot \left[R_{thCH} + \frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thH} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c} \right) \cdot Z_{thH}(t_p + t_c) - Z_{thH}(t_c) + Z_{thH}(t_p) \right] + T_{amb}; \quad (9)$$

$$T_{Cmin} = P \cdot \left[\frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thH} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c} \right) \cdot Z_{thH}(t_c) - Z_{thH}(t_c - t_p) \right] + T_{amb}. \quad (10)$$

Представляет интерес, какой из режимов циклической нагрузки является наиболее тяжелым, с точки зрения длительности срока эксплуатации тиристорov. Для выяснения этого выполнен расчет с конкретными типами тиристорov и охладителей. Для примера был взят выпрямитель КТЭ 1000, укомплектованного тиристорами

T253-1250, охладителями O253 и вентилятором, который обеспечивает в межреберном пространстве охладителей скорость потока воздуха 6 м/с.

Тиристор T253-1250 имеет такие параметры [3]: $U_{TO} = 0,95$ В, $r_T = 0,0002$ Ом, $R_{thjC} = 0,0185$ °C/Вт, $R_{thadd} = 0,003$ °C/Вт, $R_{thCH} = 0,005$ (двустороннее охлаждение). Параметры охладителя O153 можно определить, аппроксимируя кривую переходного теплового сопротивления при скорости потока охлаждающего воздуха в межреберном пространстве охладителя 6 м/с [4]: $R_{thH} = 0,075$, а значение переходного теплового сопротивления определяется по формуле:

$$Z_{thH}(t) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t/\tau_i)], \quad (11)$$

параметры охладителя R_i, τ_i представлены в табл. 1.

С учетом повышения температуры в силовом шкафу, принимаем значение температуры охлаждающего воздуха равным $T_{amb} = 45$ °C.

На основании вышеприведенных формул с использованием принятых исходных данных, были выполнены расчеты режимов работы тиристоров, результаты которых представлены в табл. 2.

Для ориентировочной оценки, какой из режимов перегрузки из табл. 1 является наиболее тяжелым, с точки зрения длительности срока эксплуатации тиристоров, используем формулу определения числа циклов до отказа [5]:

$$N_c = K \cdot \left(\frac{300}{\Delta T_j} \right)^9, \quad (12)$$

где $K = 0,2$ коэффициент, соответствующий характеристике с точкой ($\Delta T_j = 70$ °C, $N_c = 10^6$ циклов).

$\Delta T_j = T_{jmax} - T_{jmin}$ – перепад температуры в цикле.

Таблица 1. Параметры экспонент, аппроксимирующей переходное тепловое сопротивление охладителя O153 при 6 м/с

| i | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| $R_i, \text{°C/Вт}$ | 0,0197 | 0,0465 | 0,0072 | 0,0016 |
| $\tau_i, \text{с}$ | 969,24 | 53,943 | 7,562 | 0,707 |

Таблица 2. Результаты расчетов

| Режим | $k_{П}$ | $t_p, \text{с}$ | $t_c, \text{с}$ | $I_T, \text{А}$ | $P, \text{Вт}$ | $T_{jmax}, \text{°C}$ | $T_{jmin}, \text{°C}$ | $\Delta T_j, \text{°C}$ | $T_{Cmax}, \text{°C}$ | $T_{Cmin}, \text{°C}$ |
|-------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | длит. | – | 333,3 | 383 | 83,9 | – | – | 75,7 | – |
| 2 | 1,5 | 120 | 270 | 500 | 625 | 99,3 | 52,1 | 47,2 | 85,9 | 52,1 |
| 3 | 1,75 | 60 | 184 | 583,3 | 758 | 101,7 | 52,6 | 49,1 | 85,4 | 52,6 |
| 4 | 2 | 15 | 60 | 666,7 | 900 | 96,6 | 57,3 | 39,3 | 77,3 | 57,3 |
| 5 | 2,25 | 10 | 51 | 750 | 1050 | 98,9 | 56,7 | 42,2 | 76,4 | 56,7 |

Время эксплуатации тиристоров в режиме циклической нагрузки t_w определяется по формуле:

$$t_{w1} = t_c \cdot N_c / 3600 \text{ [часов]}, \quad (13)$$

или при годовом ресурсе работы 7000 часов (без учета времени простоя, профилактики и ремонта) по формуле:

$$t_{w2} = t_c \cdot N_c / 252 \cdot 10^5 \text{ [лет]}. \quad (14)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Следует отметить, что сроки эксплуатации тиристоров, приведенные в табл. 3, являются приблизительными и по ним можно судить какой из циклических режимов является самым тяжелым. Сроки эксплуатации тиристоров могут быть уточнены после проведения испытаний на циклоустойкость и корректировки формулы (12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика определения тепловых режимов тиристоров при циклических нагрузках, параметры (режимы) которых приведены в технических условиях на тиристорные выпрямители.

2. Предложена эмпирическая формула определения минимальной температуры полупроводниковой структуры тиристора в режиме циклической нагрузки, что позволяет определять перепад температуры в цикле.

3. С точки зрения максимальной температуры полупроводниковой структуры тиристоров и перепада температуры в цикле, в приведенном примере расчета наиболее тяжелым является режим 3 циклической нагрузки.

4. В приведенном примере расчета соотношения перепадов температуры в циклах и продолжительность циклов таковы, что ориентировочное значение срока эксплуатации тиристоров в режиме 3 является наименьшим.

Таблица 3. Результаты расчетов сроков эксплуатации тиристоров

| Режимы | Количество циклов | Срок эксплуатации, часов | Срок эксплуатации, лет |
|--------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| 2 | $3,4 \cdot 10^6$ | $255 \cdot 10^3$ | 36,4 |
| 3 | $2,4 \cdot 10^6$ | $122,7 \cdot 10^3$ | 17,5 |
| 4 | $17,6 \cdot 10^6$ | $293 \cdot 10^3$ | 41,9 |
| 5 | $14 \cdot 10^6$ | $198 \cdot 10^3$ | 28,3 |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Серия комплектных тиристорных электроприводов постоянного тока КТЭ IV-го поколения [Электронный ресурс]: технические данные тиристорных преобразователей / ОАО «Преобразователь». – Электрон. дан. (1 файл, 29,64 КБ). – Украина, Запорожье, «Преобразователь», 2011. – Режим доступа: http://www.zpr.com.ua/products/branches23/kte_4go_pokoleniya/ (свободный). – Загл. с экрана.
2. Тиристоры (Технический справочник) / пер. с англ. под редакцией В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова. – М.: Энергия, 1971. – 560 с. с илл.
3. Тиристор низкочастотный Т253-1250. [Электронный ресурс]: технические данные тиристора / ОАО «Электровыпрямитель». – Электрон. дан. (1 файл, 137,47 КБ). – Россия, Саранск, «Электровыпрямитель», 2009. – Режим доступа [2012]: http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/T253_1250.pdf (свободный). – Загл. с экрана.
4. Охладители воздушного охлаждения для приборов таблеточного исполнения типов О243, О153 [Электронный ресурс]: технические данные охладителей / ОАО «Электровыпрямитель». – Электрон. дан. (1 файл, 172,38 КБ). – Россия, Саранск, «Электровыпрямитель», 2006. – Режим доступа [2012]: <http://www.rill.ru/userfiles/images/Elvpr/ohladiteli/O243%20O153.pdf> (свободный). – Загл. с экрана.
5. Reliability of High Power Bipolar Devices [Электронный ресурс] = Надежность работы мощных биполярных приборов: описание конструкции тиристорov, параметры надежности, циклоустойкость приборов / Dinesh Chamund, Colin Rout, AN 5948 фирмы DYNEX – Электрон. дан. (1 файл, 828,15 КБ), [2009]. – Режим доступа: http://www.dynexsemi.com/assets/Application_Notes/DNX_AN5948.pdf (свободный). – Загл. с экрана.

*Стаття надійшла до редакції 16.05.2011.
Після доробки 02.02.2012.*

В. С. Остренко, О. В. Василенко

Визначення температури напівпровідникової структури тиристора при циклічному навантаженні

Ця стаття присвячена методиці визначення максимального і мінімального значення температури напівпровідникової структури тиристорів випрямлячів, що працюють в режимі циклічно змінного навантаження. Це дозволяє визначити максимально допустиме значення струму через тиристор і визначити орієнтовне значення терміну роботи тиристорів при циклічному навантаженні.

Ключові слова: тиристор, температура напівпровідникової структури, циклічний режим, тепловий опір.

V. S. Ostrenko, O. V. Vasilenko

Determination of temperature of the thyristor semiconductor structure under cyclic loading

This article focuses on the method of determination of maximum and minimum junction temperatures of the thyristors semiconductor structure operating in the mode of cyclically varying loads. This allows to determine the maximum value of current through the thyristor and to determine the approximate value of the duration of the thyristors under cyclic loading.

Key words: thyristor, junction temperature, cyclic mode, thermal resistance.

УДК 621.316.001.2

В. М. Снигирёв¹, А. П. Агибалов², А. О. Вовк², А. В. Трегуб²

¹Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

²Магистрант Запорожского национального технического университета

К ВОПРОСУ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье предлагается способ проектирования электрических аппаратов в два этапа: сначала производится расчет выбранного объекта согласно блок-схеме на ЭВМ с учетом технических норм электротехники, а затем – оптимизация по стоимости методом последовательной частной оптимизации.

Ключевые слова: частная оптимизация, проектирование, частный минимум, частная переменная.

Современные возможности проектирования электрических аппаратов с помощью систем автоматического проектирования (САПР) на ЭВМ не всегда получают преимущества по сравнению с решениями, полученными специалистами без ЭВМ, но хорошо владеющими вопросами технологии проектирования в области электроаппаратостроения. Поэтому целесообразно проводить проектирование электрических аппаратов в два этапа: сначала

произвести расчет узла выбранного объекта согласно блок-схеме на ЭВМ, с корректировкой полученных результатов в процессе расчета, с учетом ограничений, налагаемых нормами электротехники, а затем оптимизировать по стоимости полученные результаты по одному из известных методов теории оптимизации, опять же с учетом таких же допусков и ограничений норм электротехники.