

УДК 513.73

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ IGB ТРАНЗИСТОРА**С.А.Попов, И.С.Васильев****ESTIMATION OF EQUIVALENT-CIRCUIT PARAMETERS OF IGB TRANSISTOR****S.A.Popov, I.S.Vasil'ev***Политехнический институт НовГУ, stanislav.popov@novsu.ru*

Предлагается метод оценивания параметров эквивалентной схемы IGB транзистора. Рассмотрен метод расчета статических параметров эквивалентной схемы с использованием многооткликовой модели. Приводится процедура последовательного планирования эксперимента, обеспечивающая заданную точность оценивания.

Ключевые слова: *IGB транзистор, оценивание параметров эквивалентной схемы, многооткликовая модель, последовательное планирование эксперимента*

The estimation technique for equivalent-circuit parameters of IGB transistor is offered. The calculation method for static parameters of equivalent circuit using multiresponse model is presented. The procedure of consistent design of experiments ensuring required accuracy of estimation is provided.

Keywords: *IGB transistor, estimation of equivalent circuit parameters, multiresponse model, consistent design of experiments*

IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) — это мощный транзистор с изолированным затвором, специально разработанный для импульсного режима работы. Такие транзисторы применяются в мощной электронике, особенно в импульсных источниках питания, серводвигателях и трехфазных моторах, поскольку они обеспечивают широкий динамиче-

ский диапазон, низкий уровень акустического шума и повышенную эффективность. Однако IGB транзисторы имеют довольно сложную эквивалентную схему, определение параметров которой представляет определенные трудности. В статье [1] описан метод оценивания параметров эквивалентных схем многополюсников по результатам измерений вольт-

амперных характеристик (ВАХ). Этот метод позволяет оценивать статические параметры эквивалентных схем и их статистические характеристики на основе построения многооткликовых моделей. Расчет параметров эквивалентной схемы IGB транзистора и их статистических характеристик осложняется тем, что в этом случае нет возможности измерить все требуемые для расчета электрические режимы.

Статические режимы и параметры эквивалентной схемы

Эквивалентная схема IGB транзистора [2] представлена на рис.1.

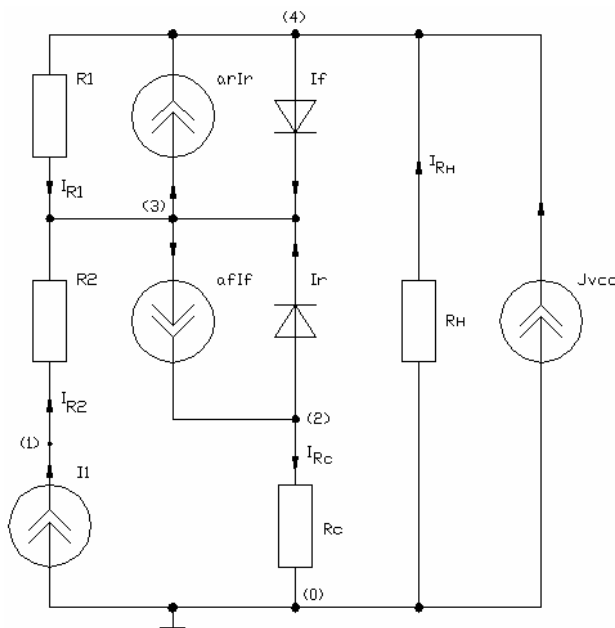


Рис.1. Эквивалентная схема IGB транзистора

Данная эквивалентная схема позволяет получить систему уравнений Кирхгофа в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V_2 - V_1}{R_1} - I_1 - K_P V_1 (1 - 0.5 V_1) \\ \frac{V_2 - V_3}{R_2} - I_R \left[\exp\left(\frac{V_2 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] + \alpha_F I_F \left[\exp\left(\frac{V_4 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] \\ \frac{V_4 - V_3}{R_1} + \alpha_F I_R \left[\exp\left(\frac{V_2 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] - \\ - I_1 - \alpha_F I_F \left[\exp\left(\frac{V_4 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] \\ \frac{V_4 - V_3}{R_1} + \alpha_F I_R \left[\exp\left(\frac{V_2 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] - \\ - I_{VCC} - I_F \left[\exp\left(\frac{V_4 - V_3}{\Phi_T}\right) - 1 \right] \end{array} \right\} = 0 \quad (1)$$

Здесь $\alpha = (1 - \alpha_F)$, V_1, V_2, V_3, V_4 — напряжения в соответствующих узлах, причем напряжения V_1 и V_4 задаются: $V_1 = E_1$ и $V_4 = E_2$, а I_1 и I_{VCC} — токи соответствующих источников напряжений.

Статический режим IGB транзистора зависит от параметров эквивалентной схемы $\alpha_F, \alpha_R, I_{CS}, K_P,$

R_C, R_1, R_2, I_{ES} (всего 8 параметров) и задаваемых источников напряжений: E_1, E_2 . Для расчета этих параметров и их статистических характеристик используется модель IGB транзистора, получаемая на основании системы уравнений (1) в виде:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}) = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}) = \{f_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}), f_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{B}), \dots, f_m(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{B})\}^T$ — вектор неявных функций, определяемых правой частью системы уравнений (1), $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}^T$ — вектор задаваемых (независимых) электрических режимов, $\mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}^T$ — вектор зависимых режимов, $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}^T$ — вектор параметров элементов эквивалентной схемы.

Задача расчета параметров с использованием модели (2) формулируется как задача определения статистических оценок параметров многооткликовой регрессионной модели по экспериментальным данным. Параметры эквивалентной схемы изменяются в технологическом процессе с помощью тестовых структур. Этот метод не позволяет определять параметры отдельных транзисторов и, соответственно, статистические характеристики этих параметров по партии приборов. Предлагаемый в данной работе метод расчета параметров эквивалентной схемы основан на результатах измерений доступных зависимых электрических режимов при заданных независимых источниках напряжения. Задача расчета параметров в этом случае формулируется как задача определения статистических оценок параметров многооткликовой модели по экспериментальным данным. Для оценивания параметров эквивалентной схемы проводится эксперимент по измерению зависимых электрических режимов при различных значениях задаваемых режимов. По результатам этого эксперимента путем построения многооткликовой регрессионной модели можно получить максимально правдоподобные оценки параметров эквивалентной схемы и их ковариационную матрицу с помощью следующей процедуры [3]:

$$\hat{\mathbf{B}}^{s+1} = \hat{\mathbf{B}}^s + \mathbf{V}_B \sum_{j=1}^n \mathbf{G}(\hat{\mathbf{B}}^s, \mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j^*) \mathbf{V}_E^{-1} \{\mathbf{Y}_j - \hat{\mathbf{Y}}_j^s\}, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{Y}}$ — расчетные значения зависимых переменных, $\mathbf{V}_B$ — ковариационная матрица оценок параметров, $\mathbf{V}_E$ — ковариационная матрица ошибок измерений, s — номер итерации, n — количество экспериментов.

Расчетные значения зависимых режимов определяются на основании системы уравнений (1) в виде [4]:

$$\hat{\mathbf{Y}}^{s+1} = \hat{\mathbf{Y}}^s - [\mathbf{Q}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \hat{\mathbf{Y}}^s)]^{-1} \mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \hat{\mathbf{Y}}^s), \quad (4)$$

где $\mathbf{Q}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\partial \mathbf{Y}}$ — матрица производных системы уравнений (1) по зависимым электрическим режимам.

Матрица производных $\mathbf{G}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ от всех зависимых режимов по параметрам эквивалентной схемы

определяется как производная неявной функции следующим образом:

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{B}} = \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})}{\partial \mathbf{B}} [\mathbf{Q}(\mathbf{B}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})]^{-1}. \quad (5)$$

Ковариационная матрица оценок коэффициентов (3) равна [2]:

$$\mathbf{V}_B = \left\{ \sum_{j=1}^n \mathbf{G}(\mathbf{B}, \mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j) \mathbf{V}_E^{-1} \mathbf{G}(\mathbf{B}, \mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j)^T \right\}^{-1}. \quad (6)$$

Оценка ковариационной матрицы ошибок наблюдений $\mathbf{V}_E$ рассчитывается в соответствии с [3] по остаткам модели следующим образом:

$$\mathbf{V}_E = \frac{m}{mn-l} \sum_{j=1}^n [\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}(\mathbf{B}, \mathbf{X})] [\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}(\mathbf{B}, \mathbf{X})]^T, \quad (7)$$

где $\hat{\mathbf{Y}}(\mathbf{B}, \mathbf{X})$ — оценка зависимых переменных, получаемая по формуле (4).

В случае IGB транзистора могут быть заданы два независимых источника напряжения $x_1 = E_1$ и $x_2 = E_2$ (независимые переменные) и могут наблюдаться два тока $y_1 = I_{MOS}$ и $y_2 = I_{VCE}$ (зависимые переменные); таким образом, $k = 2$, $m = 2$, $l = 8$.

Планирование и реализация эксперимента

При использовании равномерного расположения точек контроля зависимых режимов величина определителя ковариационной матрицы оценок параметров оказывается очень большой, что не позволяет оценивать параметры с заданной точностью. Критерий D -оптимальности требует такого расположения точек в области планирования Σ_X , при котором определитель ковариационной матрицы оценок коэффициентов $\det \mathbf{V}_B$ минимален [5]. D -оптимальный план определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \det \mathbf{V}_B(\Pi^0) &= \min_{\Pi \in \Sigma_X} \det \mathbf{V}_B(\Pi) = \\ &= \min_{\Pi \in \Sigma_X} \det \left\{ \sum_{j=1}^n \mathbf{P}(\mathbf{B}, \mathbf{X}_j) \mathbf{V}_E^{-1} [\mathbf{P}(\mathbf{B}, \mathbf{X}_j)]^T \right\}^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Pi^0 = \{\mathbf{X}_1^0, \mathbf{X}_2^0, \dots, \mathbf{X}_n^0\}$ — оптимальный план в смысле критерия D -оптимальности.

Для повышения точности оценивания параметров использовалась процедура последовательного планирования [5]. В этом случае задается некоторый заранее определенный план эксперимента с небольшим количеством точек контроля. В качестве такого плана можно использовать, например, равномерный план эксперимента. При использовании этого плана выполняются измерения и рассчитываются оценки коэффициентов модели и определитель ковариационной матрицы этих оценок $\det \mathbf{V}_B$. На основании полученных оценок отыскивается следующая точка контроля, обеспечивающая наилучшую точность оценивания. Количество измерений увели-

чивается до достижения необходимой фактической точности оценивания параметров данного конкретного прибора. Алгоритм построения последовательного плана может быть представлен следующим выражением:

$$\det \mathbf{V}_B(\Pi + \mathbf{X}^0, \mathbf{B}) = \min_{\mathbf{X} \in \Sigma_X} \det \mathbf{V}_B(\Pi + \mathbf{X}, \mathbf{B}), \quad (9)$$

где $\mathbf{X}^0$ — добавляемая в план Π точка.

Для получения экспериментальных данных использовался программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить измерения в автоматизированном режиме [6]. Комплекс состоит из ЭВМ, на которой установлена управляющая программа, управляемых нагрузок, управляемых источников питания, блока преобразований, блока коммутации, измерительной аппаратуры. В комплексе используется универсальная промышленная измерительная аппаратура с интерфейсом для подключения к ЭВМ. Блок коммутации управляется специализированным контроллером, в свою очередь получающим команды от управляющей программы посредством Ethernet LAN-интерфейса.

Программное обеспечение, установленное на ЭВМ:

- 1) задает режимы источников питания E_1 и E_2 в соответствии с планом эксперимента;
- 2) проводит измерение токов I_{MOS} и I_{VCE} для заданных режимов;
- 3) рассчитывает величины параметров эквивалентной схемы (3);
- 4) рассчитывает величину определителя ковариационной матрицы $\det \mathbf{V}_B$ (6);
- 5) если величина $\det \mathbf{V}_B$ больше заданной, то рассчитывает следующую точку последовательного плана эксперимента (9).

В результате обеспечивается заданная точность определения параметров эквивалентной схемы.

Результаты эксперимента

Описанный метод был реализован для оценивания параметров эквивалентной схемы IGB транзисторов типа IRGPC40F. Были проведены измерения BAX при изменении напряжения на затворе в диапазоне 0,1÷15 В и на коллекторе в диапазоне 1÷600 В. Для каждого прибора выполнялось 100 и 250 измерений тока соответственно относительной погрешности при равномерном распределении точек контроля для получения значимых величин оцениваемых параметров.

На рис.2. показаны зависимости величины логарифма определителя ковариационной матрицы оценок параметров эквивалентной схемы $\det \mathbf{V}_B$ (6) от количества наблюдений для равномерного и последовательного планов эксперимента.

Как видно на рис. 2, использование последовательного планирования повышает точность оцени-

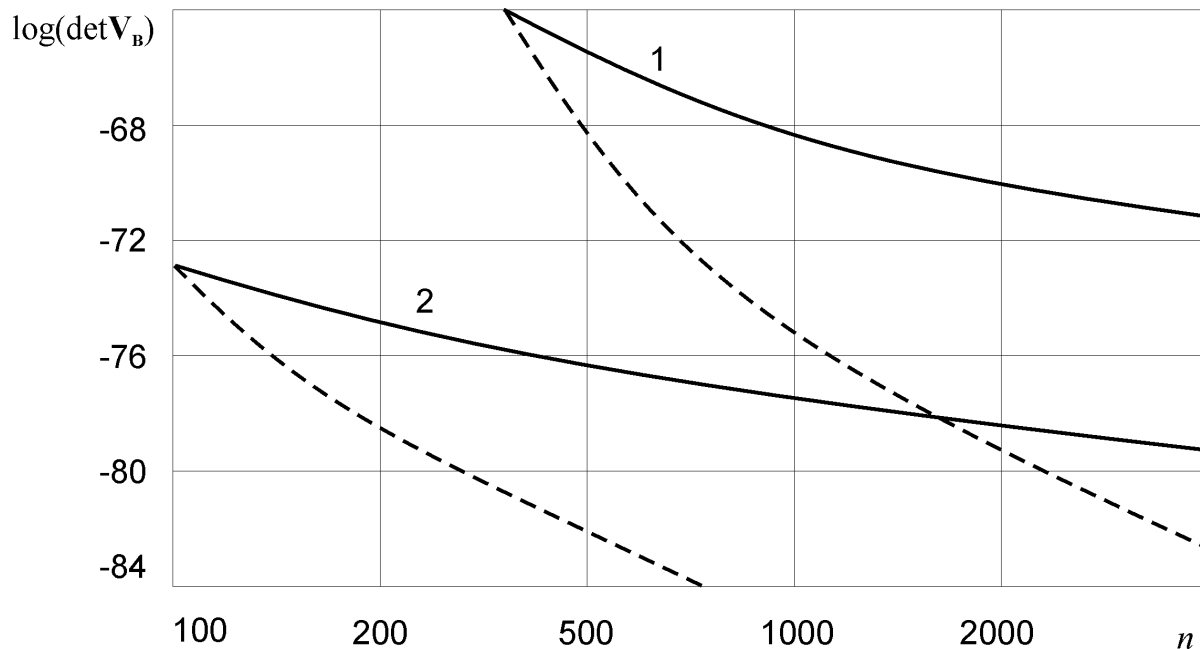


Рис.2. Зависимость логарифма определителя ковариационной матрицы $\det V_B$ оценок параметров модели ВАХ транзистора от количества наблюдений для равномерного плана (сплошная линия) и для последовательного плана (пунктирная линия) для относительной ошибки наблюдения равной 0,05% (1) и 0,01% (2)

вания в десятки раз по сравнению с равномерным планом при одинаковой погрешности оценивания. Кроме того, как показывают расчеты, некоторые параметры эквивалентной схемы вообще невозможно оценивать с достаточной точностью без использования последовательных планов эксперимента.

References

1. Попов С.А., Корчагин А.Ф. Оценивание параметров эквивалентной схемы многополосников с помощью многооткликковых моделей // Вестник НовГУ. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2001. № 19. С.175-179.
2. Попов С.А., Корчагин А.Ф. Использование многооткликковых моделей для расчета параметров электронных приборов // Измерительная техника. 2003. № 4. С.47-51.
3. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 349 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.
5. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
6. Васильев И.С. Автоматизация тестирования радиоэлектронных компонентов, выпускаемых малыми сериями // Вестник Новгородского государственного университета. Сер.: Техн. науки. 2013. № 5. Т.1. С.98-100.
1. Popov S.A., Korchagin A.F. Otsenivanie parametrov ekvivalentnoi skhemy mnogopolusnikov s pomoshch'iu mnogootklikovykh modelei [Estimation of equivalent-circuit parameters of multipoles using multiresponse models]. Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University. Issue: Natural Sciences and Engineering, 2004, no. 19, pp. 175 -179.
2. Popov S.A., Korchagin A.F. Ispol'zovanie mnogootklikovykh modelei dlia rascheta parametrov elektronnykh priborov [Using multiresponse models for estimation of electronic devices' parameters]. Izmeritel'naia tekhnika – Measurement Technique, 2003, no. 4, pp. 47-51.
3. Bard I. Nelineinoe otsenivanie parametrov [Nonlinear estimation of parameters]. Moscow, "Statistika" Publ., 1979. 349 p.
4. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematics reference book for researchers and engineers]. Moscow, "Nauka" Publ., 1968. 720 p.
5. Fedorov V.V. Teoriia optimal'nogo eksperimenta [Optimal experiment theory]. Moscow, "Nauka" Publ., 1971. 312 p.
6. Vasil'ev I.S. Avtomatizatsiia testirovaniia radioelektronnykh komponentov, vypuskaemykh malymi seriiami [Automating testing of radioelectronic components produced by limited editions]. Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University. Issue: Engineering Sciences, 2013, no. 75, vol. 1, pp. 98 -100.