

УДК 004.051

МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСТАБИЛЬНОСТИ НУЛЕВОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ПРИ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

© 2020 г. В. И. Анисимов^{1,2,*}, В. Н. Гридин^{1,**}

Представлено академиком РАН Ю. В. Гуляевым 21.05.2020 г.

Поступило 01.06.2020 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принято к публикации 04.06.2020 г.

Одним из важнейших этапов проектирования электронных схем различного класса и назначения является расчет неустойчивости нулевого уровня разрабатываемого устройства под влиянием на параметры его компонентов внешних воздействий (изменение температуры, влажность, давление, радиация и т.д.), а также технологического разброса параметров при серийном изготовлении компонентов и всего устройства. Рассматривается построение математического описания задачи расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем для распространенного случая, когда координаты рабочих точек всех компонентов схемы известны и требуется найти их отклонения при вариации параметров компонентов схемы под влиянием внешних воздействий, а также технологического разброса параметров компонентов при их изготовлении. Достоинством предлагаемой методики является возможность исключить необходимость многократного расчета нелинейной схемы и ее чувствительности к вариации параметров и перейти к рассмотрению математического описания линеаризованной схемы для отклонений переменных от начального стационарного значения. При этом резко уменьшается объем вычислительных операций и снижается время решения, что особенно важно при решении оптимизационных задач проектирования электронных схем.

Ключевые слова: неустойчивость нулевого уровня, внешние воздействия, моделируемая схема, линеаризация, неавтономные и автономные параметры

DOI: 10.31857/S2686954320040037

ВВЕДЕНИЕ

Нулевой уровень электронных схем определяется значением координат рабочих точек всех компонентов схемы при отсутствии управляющих сигналов на входах этой схемы. В зависимости от назначения схемы координаты ее рабочих точек влияют либо только на значения рассеиваемой мощности на компонентах схемы, а также на режимные значения рабочих параметров компонентов в этих точках, либо, кроме того, определяют приведенный к входу нулевой уровень, являющийся основной характеристикой широкого класса электронных схем, к которым относятся операционные усилители, стабилизаторы и т.д. [1, 2]. Анализ неустойчиво-

сти нулевого уровня электронных схем является важнейшим этапом проектирования современной электронной аппаратуры [3, 4]. Недостаточное внимание к этой проблеме может привести к изменению основных характеристик проектируемой электронной схемы или даже к необратимому нарушению их функционирования вследствие превышения допустимой мощности, рассеиваемой на некоторых компонентах. Поэтому современные системы автоматизации схемотехнического проектирования должны иметь в своем составе инструментальные средства для решения такой задачи. При этом в процессе расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем необходимо учитывать, как влияние на параметры компонентов внешних воздействий (изменение температуры, влажности, давления, радиации и т.д.), так и технологический разброс параметров при серийном изготовлении компонентов.

Возможны два подхода к выбору метода построения математического описания подсистемы для автоматизации расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем. Первый подход предусматривает реализацию расчета вектора ба-

¹ Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, Одинцово, Московская обл., Россия

² Санкт-Петербургский электротехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: info@ditc.ras.ru

**E-mail: info2@ditc.ras.ru

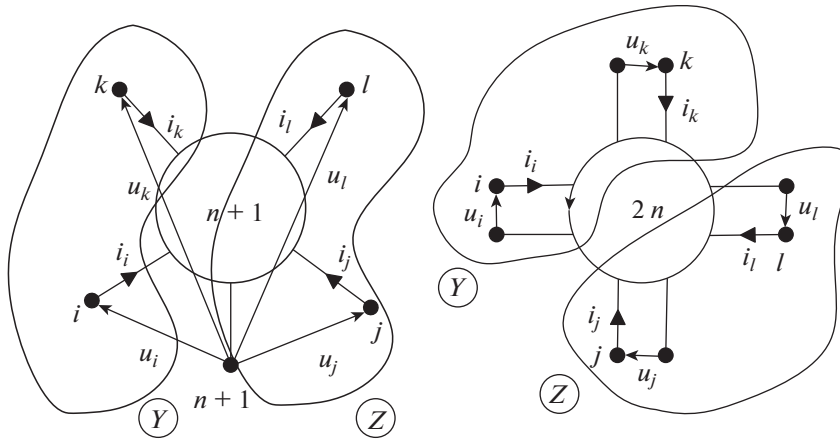


Рис. 1. Структура $(n + 1)$ -полюсника и $2n$ -полюсника.

зисных переменных стационарного режима нелинейной электронной схемы путем схемотехнической интерпретации метода Ньютона–Рафсона с запоминанием результатов линеаризации схемы на последней итерации [5, 6]. Эти результаты затем используются для расчета векторной или скалярной чувствительности переменных моделируемой схемы к вариации параметров компонентов путем построения соответствующих моделирующих схем. Такая задача решается либо путем дифференцирования уравнений нелинейной схемы, либо методом присоединенной схемы, которая строится на основании теоремы Теллегена [7, 8]. Решение задачи расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем при таком подходе неизбежно связано с необходимостью выполнения большого объема вычислительных операций, требующих для своей реализации большого объема оперативной памяти и значительного времени для полного решения задачи расчета стационарного режима нелинейной схемы с последующим расчетом чувствительности ее переменных.

Второй подход к построению математического описания подсистемы для автоматизации расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем учитывает то обстоятельство, что при проектировании электронных схем часто встречаются ситуации, когда координаты рабочих точек всех компонентов схемы известны и требуется определить лишь отклонения значений этих координат при вариации параметров компонентов схемы и внешних воздействий [9]. При этом появляется возможность исключить необходимость расчета чувствительности нелинейной схемы к вариации ее параметров и перейти к рассмотрению математического описания, в качестве переменных которого выступают отклонения переменных от начального стационарного значения. При таком подходе к реализации математического описания резко

уменьшается объем вычислительных операций и снижается время расчета неустойчивости нулевого уровня, что особенно важно при решении оптимизационных задач проектирования электронных схем, требующих многократного расчета схемы для нахождения оптимального значения ее параметров.

В работе рассматривается методика построения математического описания подсистемы автоматизации расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем, отличительной особенностью которой является использование только линеаризованных уравнений, на основании которых возможен расчет неустойчивости нулевого уровня электронных схем при вариации параметров компонентов как вследствие внешних воздействий, так и вследствие технологического разброса при серийном изготовлении компонентов.

КОМПОНЕНТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Компоненты электронных схем можно представить в виде многополюсников типа $(n + 1)$ и $2n$ -полюсников, структура которых приведена на рис. 1.

Для каждого многополюсника зависимость между двумя переменными может быть описана уравнениями $p = f(\dots, q, \dots)$, которые в явной форме определяют для каждого полюса одну из полюсных переменных, при этом переменная p в общем случае может быть как токовой, так и потенциальной переменной. В зависимости от характера этой переменной все полюсы многополюсников могут быть разделены на две группы [10]. Первой группой, которую обычно называют группой u -полюсов, являются полюсы, для которых зависимая переменная p является переменной токового типа, а второй группой, обычно называемой группой z -полюсов, являются полюсы,

для которых зависимая переменная p является переменной потенциального типа.

Учитывая, что характеристики компонентов зависят от внешних воздействий ϵ_m (изменение температуры, влажность, давление, радиация и т.д.) уравнения y -полюсов и z -полюсов нелинейных многополюсников можно записать в следующем виде:

$$i_{i1} = f_i(\dots, u_{k1}, \dots, i_{l1}, \dots, \epsilon_m), \quad (1)$$

$$u_{j1} = f_j(\dots, u_{k1}, \dots, i_{l1}, \dots, \epsilon_m). \quad (2)$$

Выполняя разложение уравнений y -полюсов и z -полюсов нелинейных многополюсников в ряд Тейлора в окрестности рабочих точек с координатами $i_{i1}^0, u_{k1}^0, i_{l1}^0, u_{j1}^0$ и внешних воздействий ϵ_m^0 и ограничиваясь в этом разложении членами первого порядка малости, получим систему линеаризованных уравнений

$$i_{i1} = i_{i1}^0 + \sum_k \frac{\partial i_{i1}}{\partial u_{k1}}(u_{k1} - u_{k1}^0) + \sum_l \frac{\partial i_{i1}}{\partial i_{l1}}(i_{l1} - i_{l1}^0) + \sum_m \frac{\partial i_{i1}}{\partial \epsilon_m}(\epsilon_m - \epsilon_m^0), \quad (3)$$

$$u_{j1} = u_{j1}^0 + \sum_k \frac{\partial u_{j1}}{\partial u_{k1}}(u_{k1} - u_{k1}^0) + \sum_l \frac{\partial u_{j1}}{\partial i_{l1}}(i_{l1} - i_{l1}^0) + \sum_m \frac{\partial u_{j1}}{\partial \epsilon_m}(\epsilon_m - \epsilon_m^0). \quad (4)$$

Вводя обозначения

$$y_{ik1}^0 = \frac{\partial i_{i1}}{\partial u_{k1}}, \quad \beta_{il1}^0 = \frac{\partial i_{i1}}{\partial i_{l1}}, \quad \mu_{jk1}^0 = \frac{\partial u_{j1}}{\partial u_{k1}}, \quad z_{jl1}^0 = \frac{\partial u_{j1}}{\partial i_{l1}}$$

и переходя к отклонениям переменных и внешних воздействий от начальных значений

$$\Delta i_{i1} = i_{i1} - i_{i1}^0, \quad \Delta i_{l1} = i_{l1} - i_{l1}^0, \quad \Delta u_{k1} = u_{k1} - u_{k1}^0, \\ \Delta u_{j1} = u_{j1} - u_{j1}^0, \quad \Delta \epsilon_m = \epsilon_m - \epsilon_m^0,$$

можно представить уравнения линеаризованного многополюсника (3) и (4) в виде

$$\Delta i_{i1} = \sum_k y_{ik1}^0 \Delta u_{k1} + \sum_l \beta_{il1}^0 \Delta i_{l1} + \Delta j_{i1}, \quad (5)$$

$$\Delta u_{j1} = \sum_k \mu_{jk1}^0 \Delta u_{k1} + \sum_l z_{jl1}^0 \Delta i_{l1} + \Delta e_{j1}, \quad (6)$$

где

$$\Delta j_{i1} = \sum_m \frac{\partial i_{i1}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m, \quad \Delta e_{j1} = \sum_m \frac{\partial u_{j1}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m. \quad (7)$$

Уравнения (5) и (6) определяют отклонения координат рабочих точек нелинейных компонентов при изменении внешних воздействий, при этом значения приращений автономных параметров под воздействием внешних возмущений ϵ_m определяются выражениями (7). Графически прира-

щения автономных параметров можно интерпретировать как сдвиг рабочей точки характеристик компонента вдоль вертикальной оси при изменении некоторого внешнего воздействия $\Delta \epsilon_m$.

Введем векторы $\Delta I_{y1}, \Delta I_{z1}, \Delta U_{y1}, \Delta U_{z1}$ для приращений переменных $\Delta i_{y1}, \Delta i_{z1}, \Delta u_{y1}, \Delta u_{z1}$, векторы $\Delta J_1, \Delta E_1$ для приращений автономных параметров $\Delta j_{i1}, \Delta e_{j1}$ и матрицы $Y_1^0, B_1^0, M_1^0, Z_1^0$ для значений неавтономных параметров $y_{ik1}^0, \beta_{il1}^0, \mu_{jk1}^0, z_{jl1}^0$. Тогда можно записать линеаризованные уравнения (5) и (6) для y -полюсов и z -полюсов в матричной форме:

$$\Delta I_{y1} = Y_1^0 \Delta U_{y1} + B_1^0 \Delta I_{z1} + \Delta J_1, \quad (8)$$

$$\Delta U_{z1} = M_1^0 \Delta U_{y1} + Z_1^0 \Delta I_{z1} + \Delta E_1. \quad (9)$$

Объединяя уравнения (8) и (9), получим матричное уравнение для отклонений переменных линеаризованных в рабочих точках нелинейных многополюсников схемы

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{y1} \\ \Delta U_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^0 & B_1^0 \\ M_1^0 & Z_1^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{y1} \\ \Delta I_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta J_1 \\ \Delta E_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Уравнения линейных многополюсников имеют вид

$$i_{i2} = \sum_k y_{ik2} u_{k2} + \sum_l \beta_{il2} i_{l2} + j_{i2}, \quad (11)$$

$$u_{j2} = \sum_k \mu_{jk2} u_{k2} + \sum_l z_{jl2} i_{l2} + e_{j2}, \quad (12)$$

где $y_{ik2}, \beta_{il2}, \mu_{jk2}, z_{jl2}$ – неавтономные параметры, j_{i2}, e_{j2} – автономные параметры (задающие источники) линейных многополюсников, которые зависят от внешних воздействий ϵ_m .

Выполняя дифференцирование уравнений (11) и (12) с учетом зависимостей неавтономных и автономных параметров линейных многополюсников от внешних воздействий ϵ_m и переходя к конечным приращениям, получим уравнения

$$\Delta i_{i2} = \sum_k (y_{ik2} \Delta u_{k2} + \Delta y_{ik2} u_{k2}) + \sum_l (\beta_{il2} \Delta i_{l2} + \Delta \beta_{il2} i_{l2}) + \Delta j_{i2}, \quad (13)$$

$$\Delta u_{j2} = \sum_k (\mu_{jk2} \Delta u_{k2} + \Delta \mu_{jk2} u_{k2}) + \sum_l (z_{jl2} \Delta i_{l2} + \Delta z_{jl2} i_{l2}) + \Delta e_{j2}, \quad (14)$$

где приращения неавтономных параметров при изменении внешних воздействий

$$\begin{aligned} \Delta y_{ik2} &= \frac{\partial y_{ik2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m, & \Delta \beta_{il2} &= \frac{\partial \beta_{il2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m, \\ \Delta \mu_{jk2} &= \frac{\partial \mu_{jk2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m, & \Delta z_{jl2} &= \frac{\partial z_{jl2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m \end{aligned} \quad (15)$$

и приращения для автономных параметров (задающих источники) при изменении внешних воздействий

$$\Delta j_{i2} = \frac{\partial j_{i2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m, \quad \Delta e_{j2} = \frac{\partial e_{j2}}{\partial \epsilon_m} \Delta \epsilon_m. \quad (16)$$

Введем для описания линейных многополюсников матрицы Y_2, B_2, M_2, Z_2 , определяющие значения неавтономных параметров $y_{ik2}, \beta_{il2}, \mu_{jk2}, z_{jl2}$, векторы $\Delta I_{y2}, \Delta I_{z2}, \Delta U_{y2}, \Delta U_{z2}$ для приращений переменных $\Delta i_{y2}, \Delta i_{z2}, \Delta u_{y2}, \Delta u_{z2}$ линейных многополюсников, матрицы $\Delta Y_2, \Delta B_2, \Delta M_2, \Delta Z_2$ для приращений неавтономных параметров $\Delta y_{ik2}, \Delta \beta_{il2}, \Delta \mu_{jk2}, \Delta z_{jl2}$, векторы $\Delta J_2, \Delta E_2$ для приращений автономных параметров $\Delta j_{i2}, \Delta e_{j2}$, векторы U_y, I_z для координат потенциальных и токовых переменных u_{k2}, i_{l2} многополюсника в исходной рабочей точке. Тогда можно записать уравнения (13) и (14) линейных многополюсников для y -полюсов и z -полюсов в матричной форме:

$$\Delta I_{y2} = Y_2 \Delta U_{y2} + B_2 \Delta I_{z2} + \Delta Y_2 U_{y2} + \Delta B_2 I_{z2} + \Delta J_2, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{z2} &= M_2 \Delta U_{y2} + Z_2 \Delta I_{z2} + \\ &+ \Delta M_2 U_{y2} + \Delta Z_2 I_{z2} + \Delta E_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Объединяя уравнения (17) и (18), получим матричное уравнение линейных многополюсников схемы для отклонений переменных и внешних воздействий

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta I_{y2} \\ \Delta U_{z2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_2 & B_2 \\ M_2 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{y2} \\ \Delta I_{z2} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \Delta Y_2 U_{y2} + \Delta B_2 I_{z2} + \Delta J_2 \\ \Delta M_2 U_{y2} + \Delta Z_2 I_{z2} + \Delta E_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (19)$$

Влияние внешних воздействий ϵ_m на неавтономные параметры $y_{ik2}, \beta_{il2}, \mu_{jk2}, z_{jl2}$ в уравнении (19) линейных многополюсников определяется матрицами $\Delta Y_2, \Delta B_2, \Delta M_2, \Delta Z_2$. Составляющие этих матриц задаются приращениями неавтономных параметров при изменении внешних воздействий $\Delta y_{ik2}, \Delta \beta_{il2}, \Delta \mu_{jk2}, \Delta z_{jl2}$, которые вычисляются для конкретного типа внешнего воздействия (изменение температуры, влажность, давление, радиация и т.д.) согласно выражениям (15). В некоторых случаях, например при оценке влияния технологического разброса при серийном изготовлении компонентов, значения $\Delta y_{ik2}, \Delta \beta_{il2}, \Delta \mu_{jk2}, \Delta z_{jl2}$ задаются исходя из имеющейся информации о тех-

нологическом разбросе параметров [11, 12]. Аналогично влияние внешних воздействий ϵ_m на автономные параметры (задающие источники) в уравнении (19) определяется векторами $\Delta J_2, \Delta E_2$. Составляющие этих векторов задаются приращениями автономных параметров при изменении внешних воздействий $\Delta j_{i2}, \Delta e_{j2}$, которые могут быть вычислены согласно выражениям (16) или заданы на основании известной информации о нестабильности источников питания схемы.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА НЕСТАБИЛЬНОСТИ НУЛЕВОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Для построения математического описания подсистемы автоматизации расчета нестабильности нулевого уровня электронных схем необходимо дополнить компонентные уравнения нелинейных и линейных многополюсников (10) и (19) топологическими уравнениями, которые описывают структуру схемных связей многополюсных компонентов электронной схемы. Выбор типа топологических уравнений зависит от выбранного способа формирования координатного базиса. Наиболее просто задача решается путем построения топологических уравнений на основе матрицы инцидентности с последующим объединением компонентных уравнений с построенными топологическими уравнениями. Однако в этом случае в число переменных координатного базиса входят все переменные, отображенные в компонентных уравнениях, а также узловые потенциалы схемы, и решение уравнений связано с обработкой матриц весьма значительного размера. Другим крайним случаем является построение топологических уравнений на основе рассмотрения совокупности главных сечений и главных контуров полюсного графа, в котором выбрано некоторое дерево [13–15]. Такой подход к формированию уравнений позволяет использовать вырождение координат с соответствующим снижением числа составляющих координатного базиса до минимально возможного размера. Однако построение матриц главных контуров и главных сечений на основе выбора и рассмотрения дерева полюсного графа схемы требует использования достаточного сложного программного обеспечения, что связано с большими временными затратами как при его разработке, так и при выполнении для решения задач моделирования. Компромиссным вариантом решения задачи является построение топологического описания схемы на основе матрицы инцидентности с последующим переходом к расширенному координатному базису узловых потенциалов путем исключения из его составляющих всех переменных, кроме узловых потенциалов и токовых переменных z -полюсов.

Топологические уравнения для токовых переменных при расчете неустойчивости нулевого уровня электронных схем можно записать в виде

$$A_{y1}\Delta I_{y1} + A_{z1}\Delta I_{z1} + A_{y2}\Delta I_{y2} + A_{z2}\Delta I_{z2} = 0,$$

где $A_{y1}, A_{z1}, A_{y2}, A_{z2}$ – блочные матрицы общей матрицы инцидентий

$$A = \begin{bmatrix} A_{y1} & A_{z1} & A_{y2} & A_{z2} \end{bmatrix}.$$

Топологические уравнения для потенциальных переменных в координатной форме имеют вид

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{y1} \\ \Delta U_{z1} \\ \Delta U_{y2} \\ \Delta U_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{y1} \\ A'_{z1} \\ A'_{y2} \\ A'_{z2} \end{bmatrix} \Delta V.$$

Объединяя топологические уравнения с компонентными уравнениями (10) и (19) и исключая из них векторы $\Delta I_{y1}, \Delta I_{y2}, \Delta U_{y1}, \Delta U_{y2}, \Delta U_{z1}, \Delta U_{z2}$, получим уравнения схемы в расширенном базисе узловых потенциалов:

$$W\Delta X + \Delta S = 0, \tag{20}$$

где

$$W = \begin{bmatrix} A_{y1}Y_1^0 A'_{y1} + A_{y2}Y_2^0 A'_{y2} & A_{y1}B_1^0 + A_{z1} & A_{y2}B_2 + A_{z2} \\ M_1^0 A'_{y1} - A'_{z1} & Z_1^0 & \\ M_2 A'_{y2} - A'_{z2} & & Z_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta I_{z1} \\ \Delta I_{z2} \end{bmatrix},$$

$$\Delta S = \begin{bmatrix} A_{y2}\Delta Y_2 U_{y2} + A_{y2}\Delta B_2 I_{z2} + A_{y1}\Delta J_1 + A_{y2}\Delta J_2 \\ \Delta E_1 \\ \Delta M_2 U_{y2} + \Delta Z_2 I_{z2} + \Delta E_2 \end{bmatrix}.$$

Уравнение (20) построено в расширенном базисе узловых потенциалов и позволяет реализовать математическое описание моделируемой схемы для расчета неустойчивости ее нулевого уровня при воздействии внешних возмущений с учетом сдвига рабочих точек характеристик нелинейных компонентов вдоль вертикальной оси при изменении некоторого внешнего воздействия $\Delta \epsilon_m$ и с учетом вариации параметров линейных многополюсных компонентов под влиянием этого внешнего воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается методика расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем, основанная на использовании математического

описания линеаризованной схемы для отклонений переменных от начального стационарного значения под влиянием внешних воздействий, а также вследствие технологического разброса параметров компонентов при их изготовлении. При этом исключается необходимость многократного расчета нелинейной схемы, требующего выполнения большого количества итерационных процедур и резко уменьшается объем вычислительных операций, что имеет большое значение при решении оптимизационных задач проектирования электронных схем, в процессе решения которых требуется выполнение многократного расчета схемы. Математическое описание предлагаемой методики расчета неустойчивости нулевого уровня электронных схем основано на использовании расширенного координатного базиса, что позволяет минимизировать число его составляющих и обеспечивает возможность описания электронных схем с произвольными смешанными типами компонентов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполняется в рамках темы № 0071–2019–0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Норенков И.П., Маничев В.Б.* Основы теории и проектирования САПР. М.: Высш. шк., 1990. 335 с.
2. *Глориозов Е.А., Скорин В.Г., Сыпчук П.П.* Введение в автоматизацию схемотехнического проектирования. М.: Советское радио, 1976. 224 с.
3. *Баталов Б.В., Егоров Ю.Б., Русаков С.Г.* Основы математического моделирования больших интегральных схем на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1982. 168 с.
4. *Норенков И.П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Высш. шк., 1986. 304 с.
5. *Ильин В.Н.* Основы автоматизации схемотехнического проектирования. М.: Энергия, 1979. 391 с.
6. *Гридин В.Н., Михайлов В.Б., Шустерман Л.Б.* Численно-аналитическое моделирование радиоэлектронных схем. М.: Наука, 2008. 342 с.
7. *Гридин В.Н., Анисимов В.И., Ахмад А.Д.* Построение веб-сервисов для расчета неустойчивости стационарного режима нелинейных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 3. С. 20–25.
8. *Гридин В.Н., Дмитриевич Г.Д., Анисимов Д.А.* Методика построения веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров. // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 11. С. 834–839.
9. *Анисимов В.И., Дмитриевич Г.Д., Ежов С.Н. и др.* Автоматизация схемотехнического проектирования на мини-ЭВМ. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 198 с.

10. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Советское радио, 1976. 608 с.
11. Анисимов В.И., Дмитриевич Г.Д., Скобельцын К.Б. и др. Диалоговые системы схемотехнического проектирования. М.: Радио и связь, 1988. 288 с.
12. Анисимов В.И., Максимович В.А., Рындин А.А. Автоматизированное определение параметров нелинейных динамических моделей активных компонентов для САПР РЭА // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. 1982. № 6.
13. Ильинский Н.Ф., Цаценкин В.К. Приложение теории графов к задачам электромеханики. М.: Энергия, 1968. 200 с.
14. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. Пер. с англ. М.: Наука, 1974. 366 с.
15. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем. Пер. с англ. М.: Энергия, 1980. 638 с.

METHODS OF CALCULATION OF ZERO LEVEL INSTABILITY OF ELECTRONIC CIRCUITS IN CASE OF VARIATION OF PARAMETERS AND EXTERNAL IMPACTS

V. I. Anisimov^{a,b} and V. N. Gridin^a

^a Design Information Technologies Center Russian Academy of Sciences, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation

^b Saint-Petersburg Electrotechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS Yu.V. Gulyaev

One of the most important stages of design of electronic circuits of different class and purpose is calculation of instability of zero level of the developed device under influence on parameters of its components of external effects (change of temperature, humidity, pressure, radiation, etc.), as well as technological variation of parameters during serial manufacture of components and the whole device. The article considers the construction of a mathematical description of the problem of calculating the instability of the zero level of electronic circuits for the common case, when the coordinates of the working points of all components of the circuit are known, and it is necessary to find their deviations when the parameters of the components of the circuit are varied under the influence of external influences, as well as technological variation of the parameters of the components during their manufacture. The advantage of the proposed technique is the possibility to eliminate the necessity of multiple calculation of the nonlinear circuit and its sensitivity to parameter variation and to proceed to consideration of the mathematical description of the linearized circuit for deviations of variables from the initial stationary value. At the same time, the volume of computational operations is dramatically reduced and the solution time is reduced, which is especially important in solving optimization tasks of electronic circuit design.

Keywords: zero level instability, external effects, simulated diagram, linearization, non-autonomous and autonomous parameters