

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИФУРКАЦИИ РЕЖИМОВ СТАБИЛИЗАТОРА ТОКА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Дж. А. Саид

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Статья посвящена разработке алгоритмов моделирования процессов бифуркации режимов стабилизатора тока светодиодных осветительных приборов. Приведен алгоритм расчета бифуркационной диаграммы, иллюстрирующей характер усложнения колебаний при изменении параметров. Выявлен новый тип С-бифуркации, приводящей к мягкому переходу от двухчастотных колебаний к устойчивому периодическому режиму. Описана математическая модель данной схемы. Алгоритмы реализованы в виде программного обеспечения. Даны результаты выполнения программы, написанной на языке программирования С++.

Ключевые слова: моделирование, светоизлучающие диоды, стабилизаторы тока, бифуркационные диаграммы.

Введение

Светодиодное освещение занимает лидирующие позиции на светотехническом рынке, так как это световое решение максимально экологично и помогает сберечь энергетические ресурсы [1]. Современные светоизлучающие диоды имеют высокие технические характеристики. Создание светодиодных энергосберегающих осветительных приборов требует разработки малогабаритных вторичных источников питания на базе устройств современной силовой электроники.

Функционирование малогабаритных вторичных источников питания светодиодных приборов характеризуются сложными нелинейными динамическими процессами. Так, в них могут наблюдаться хаотические колебания и бифуркации.

Возможны бифуркации двух типов. Первый тип – так называемые локальные бифуркации. Второй тип – С-бифуркации.

Изучению С-бифуркаций и закономерностей хаотизации колебаний в последние годы уделяется значительное внимание [2, 3, 6–20]. Особо следует отметить работы Ж.Т. Жусубалиева по бифуркациям и хаотическим колебаниям в релейных системах и С-бифуркациям режимов стабилизаторов тока [2, 3, 9–12].

Данная статья посвящена моделированию процессов бифуркации режимов стабилизатора тока светоизлучающих диодов.

Анализ бифуркаций динамических систем при изменении параметров системы позволяет построить бифуркационную диаграмму системы. Бифуркационные диаграммы представляют собой решение модели в зависимости от ключевых переменных, это помогает лучше понять общее поведение модели стабилизатора и обоснованно выбрать его параметры.

1. Формирование математической модели

Исследуемая в работе схема приведена на рис. 1. Здесь E_0 – входное напряжение; VT – МДП-транзистор n -типа; L – индуктивность; x – ток, протекающий через катушку индуктивности; $VD2$ – светоизлучающий диод; DT – датчик тока; DA – компаратор; $VD1$ – диод; DD – управляющий триггер RS; I_{ref} – задающий электрический ток; K_F – выходной сигнал; Φ_1 и Φ_2 – формователи импульсов запрещенного состояния триггера.

Датчик тока измеряет электрический ток, протекающий через светоизлучающий диод. Компаратор принимает на свои входы два аналоговых сигнала x и I_{ref} и выдает логическую «1», если сигнал на прямом входе «+» больше чем на инверсном входе «-», и логический «0», если сигнал на прямом входе меньше, чем на инверсном входе.

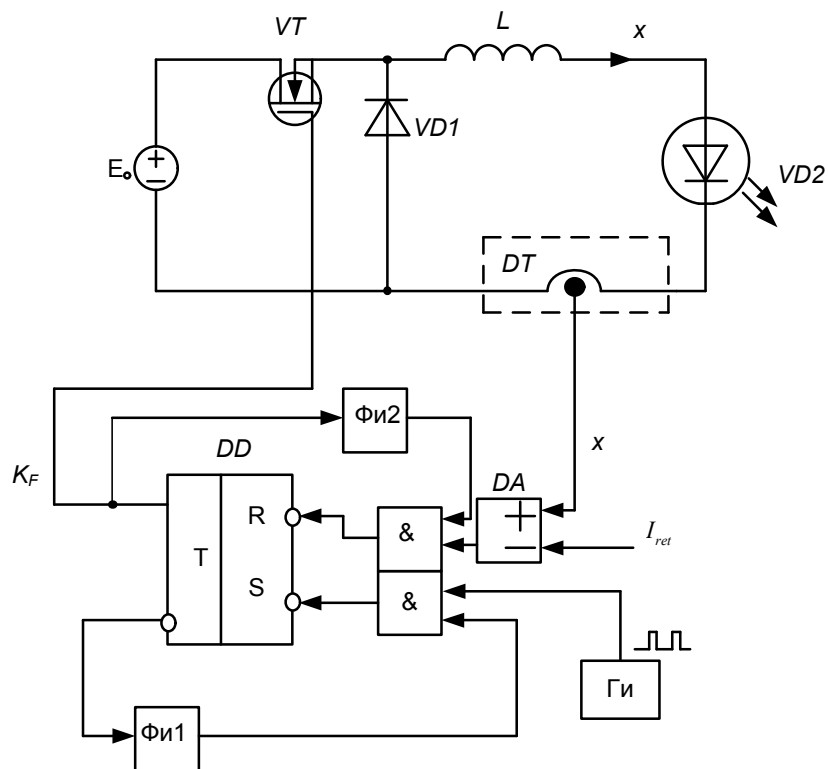


Рис. 1. Функциональная схема стабилизатора тока

Временные диаграммы, описывающие работу стабилизатора тока, приведены на рис. 2.

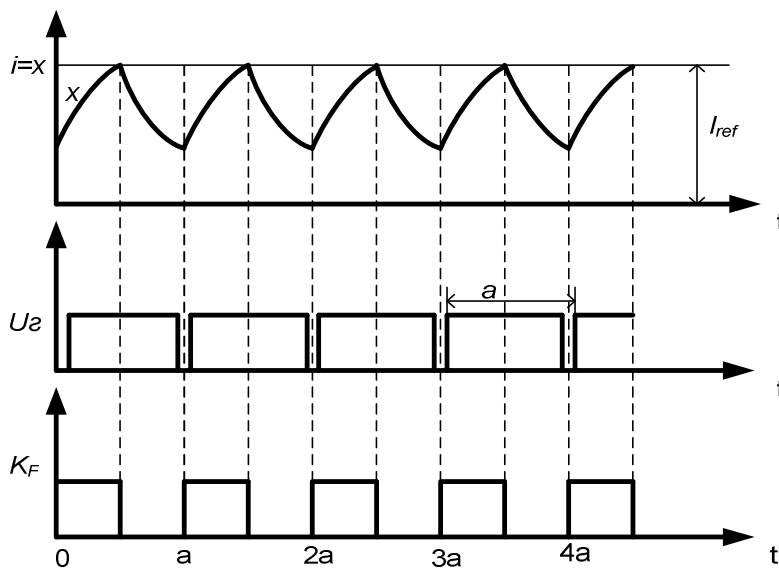


Рис. 2. Диаграмма работы устройства

Схема замещения преобразователя приведена на рис. 3.

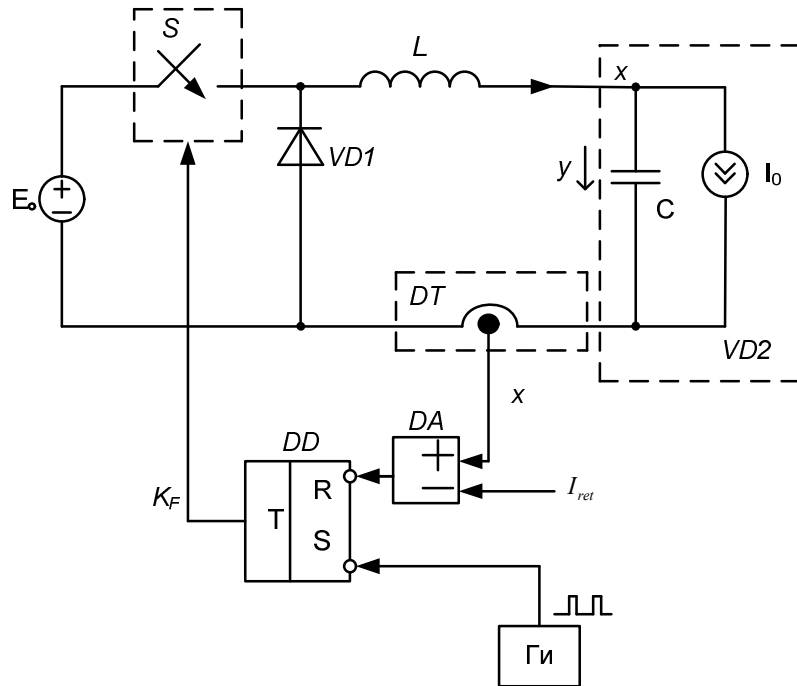


Рис. 3. Схема замещения

Состояние преобразователя согласно схеме замещения, изображенной на рис. 3, описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -U_c + E_0 \cdot K_F, \\ C \frac{dU_c}{dt} = i - I_0, \end{cases} \quad (1)$$

здесь i – ток в катушке индуктивности; U_c – напряжение на конденсаторе; L – индуктивность катушки; C – ёмкость конденсатора; K_F – сигнал на выходе схемы управления. Сигнал K_F в режиме непрерывного тока дросселя формируется следующим образом:

$$K_F = \begin{cases} 1, & \text{если } t = (k-1)a, k = 1, 2, \dots \\ 0, & \text{если } i(t) \geq I_{ret}, \end{cases}$$

где a – период следования тактовых импульсов. Введем обозначения:

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad B(t, X) = \begin{bmatrix} \frac{E_0}{L} \cdot K_F \\ -\frac{I_0}{C} \end{bmatrix}.$$

Математическая модель принимает вид

$$\frac{dX}{dt} = AX + B(t, X). \quad (2)$$

$$B(t, X) = \begin{cases} B^+, & K_F = 1, \\ B^-, & K_F = 0, \end{cases}$$

здесь

$$K_F = \begin{cases} 1, & t = (k-1)a, k = 1, 2, \dots \\ 0, & x(t) \geq I_{ret}. \end{cases} \quad B^+ = \begin{bmatrix} \frac{E_0}{L} \\ -\frac{I_0}{C} \end{bmatrix}, \quad B^- = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{I_0}{C} \end{bmatrix}.$$

Параметры модели:

$$c = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}, \quad L = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}, \quad a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad 12 \leq E_0 \leq 20 \text{ В}, \quad 0 \leq I_{ret} \leq 1,2 \text{ А}.$$

В режиме прерывистого тока i , ток в катушке индуктивности достигает нулевого значения в момент времени \hat{t}_k , появляется интервал

$$\hat{t}_k < t < ka,$$

где ключ S разомкнут, а диод $VD1$ замкнут.

В этом интервале состояние схемы описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = 0, \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{I_0}{C}, \end{cases}, \quad x(t) = 0, \quad (3)$$

или $\frac{dx}{dt} = B^-, \quad x(t) = 0.$

2. Построение стробоскопического отображения

Вначале рассмотрим режим непрерывных токов. В области $(k-1)a < t < t_k$ сигнал K_F равен 1 и состояние схемы описывается уравнением

$$\frac{dX}{dt} = AX + B^+, \quad X((k-1)a) = X_{k-1}.$$

Решение этой системы находится по формуле

$$X(t) = e^{A(t-(k-1)a)} \left\{ X_{k-1} + \int_{(k-1)a}^t e^{-A(\tau-(k-1)a)} \cdot B^+ d\tau \right\},$$

где

$$\int_{(k-1)a}^t e^{-A(\tau-(k-1)a)} \cdot B^+ d\tau = -A^{-1} \left(e^{-A(t-(k-1)a)} - E \right) \cdot B^+ = \left(E - e^{-A(t-(k-1)a)} \right) \cdot X_S^+, \quad X_S^+ = A^{-1} \cdot B^+ = - \begin{bmatrix} I_0 \\ E_0 \end{bmatrix}.$$

Отсюда имеем

$$X(t) = e^{A(t-(k-1)a)} \left\{ X_{k-1} + X_S^+ \right\} - X_S^+, \quad (4)$$

где $e^{A\tau} = \begin{bmatrix} \cos \omega\tau & -\omega C \cdot \sin \omega\tau \\ \omega L \cdot \sin \omega\tau & \cos \omega\tau \end{bmatrix}$, $\tau = t - (k-1)a$, $\omega = 1/\sqrt{LC}$.

Перепишем решение в развернутой форме записи:

$$\begin{aligned} x(t) &= (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos(\omega\tau) - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin(\omega\tau) + I_0, \\ y(t) &= \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin(\omega\tau) + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos(\omega\tau) + E_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} x(t_k) &= (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos(\omega\tau_k) - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin(\omega\tau_k) + I_0, \\ y(t_k) &= \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin(\omega\tau_k) + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos(\omega\tau_k) + E_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tau_k = t_k - (k-1)a$ – длительность импульса, $0 \leq \tau_k \leq a$.

Длительность импульса τ_k находим согласно следующему алгоритму:

Если $\varphi(0) < 0$, то $\tau_k = 0$.

Если $\varphi(0) > 0$, $\varphi(a) < 0$, то τ_k есть наименьший положительный корень уравнения $\varphi(\tau_k) = 0$, где

$$\varphi(\tau_k) = I_{ret} - I_0 - (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos(\omega\tau_k) + \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin(\omega\tau_k). \quad (7)$$

Найдем корень уравнения $\varphi(\tau_k) = 0$.

Обозначим $A = I_{ret} - I_0$, $B = (x_{k-1} - I_0)$, $G = \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0)$.

$$\begin{aligned}
 A - B \cdot \frac{1 - \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)} + G \cdot \frac{2\operatorname{tg}\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)} &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{A + A \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) - B + B \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) + 2G \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right)} &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow (A + B) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) + 2G \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) + A - B &= 0.
 \end{aligned}$$

Решим тригонометрическое уравнение, обозначим $\operatorname{tg}\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) = y$, следует

$$\begin{aligned}
 (A + B) \cdot y^2 + 2G \cdot y + A - B &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow \sqrt{\Delta} &= \sqrt{4G^2 - 4(A + B)A - B} = \sqrt{4G^2 - 4(A^2 - B^2)} = 2 \cdot \sqrt{G^2 - (A^2 - B^2)}, \\
 y_{1,2} &= \frac{-2G \pm 2\sqrt{\Delta}}{2(A + B)} = \frac{-G \pm \sqrt{\Delta}}{(A + B)}, \quad \operatorname{tg}\left(\frac{\omega\tau_k}{2}\right) = y_{1,2} \Rightarrow \tau_k^1 = \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} y_1 + \frac{2\pi n}{\omega}, \quad n = 0. \\
 \tau_k^2 &= \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} y_2 + \frac{2\pi n}{\omega}, \quad n = 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Если τ_k^1 и τ_k^2 положительные, из них нужно выбрать наибольший. Если один отрицательный, а другой положительный, надо выбрать положительный, где τ_k находится в интервале между 0 и a ($0 < \tau_k < a$). В области $t_k < t < ka$, $K_F = 0$ и состояние схемы описывается уравнением

$$\frac{dX}{dt} = AX + B^-, \quad X(t_k) = e^{A\tau_k} \{X_{k-1} + X_s^+\} - X_s^+. \tag{9}$$

Решение находится по формуле

$$X(t) = e^{A(t-t_k)} \left\{ X(t_k) + \int_{t_k}^t e^{-A(\tau-t_k)} \cdot B^- d\tau \right\}. \tag{10}$$

Отсюда имеем

$$X(t) = e^{A(t-t_k)} \{X(t_k) + X_s^-\} - X_s^-, \tag{11}$$

где

$$X_s^- = A^{-1} \cdot B^- = \begin{bmatrix} 0 & c \\ -L & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -I_0 \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ или } X(t) = e^{A(t-(k-1)a)} (X_{k-1} + X_s^+) + e^{A(t-t_k)} X_s^0 - X_s^-, \tag{12}$$

где $X_s^0 = X_s^- - X_s^+ = \begin{bmatrix} -I_0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_0 \\ E_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_0 \end{bmatrix}$, $\tau = t - (k-1)a$, $\tau^- = t - t_k$.

Запишем решение в развернутой форме

$$x(t) = (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos(\omega\tau) - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin(\omega\tau) + I_0 - \omega c \cdot E_0 \cdot \sin(\omega\tau^-), \tag{13}$$

$$y(t) = \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin(\omega\tau) + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos(\omega\tau_k) + E_0 \cdot \cos(\omega\tau^-). \tag{14}$$

Отсюда следует

$$X_k = e^{Aa} (X_{k-1} + X_s^+) + e^{A(a-\tau_k)} \cdot X_s^0 - X_s^-, \tag{15}$$

или

$$\begin{cases} x_k = (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos(\omega a) - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin(\omega a) + I_0 - \omega c \cdot E_0 \cdot \sin[\omega(a - \tau_k)], \\ y_k = \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin(\omega a) + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos(\omega a) + E_0 \cdot \cos[\omega(a - \tau_k)]. \end{cases} \quad (16)$$

Если $x_k < 0$, то возникает режим прерывистого тока дросселя. В момент прерывания тока дросселя имеем

$$X(\hat{t}_k) = e^{A(\hat{t}_k - (k-1)a)} (X_{k-1} + X_s^+) + e^{A(\hat{t}_k - t_k)} \cdot X_s^0 - X_s^-, \quad (17)$$

где $\hat{t}_k = t_k + \tau_k^s$, $\tau_k^s = \hat{t}_k - t_k$, $\hat{t}_k - (k-1)a = t_k + \tau_k^s - (k-1)a = \tau_k + \tau_k^s$,

или

$$\begin{aligned} x(\hat{t}_k) &= (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + I_0 - \omega c \cdot E_0 \cdot \sin[\omega\tau_k^s], \\ y(\hat{t}_k) &= \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + E_0 \cdot \cos[\omega\tau_k^s], \end{aligned}$$

здесь τ_k^s – корень уравнения $\Psi(\tau_k^s) = 0$, где

$$\Psi(\tau_k^s) = (x_{k-1} - I_0) \cdot \cos[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + I_0 - \omega c \cdot E_0 \cdot \sin[\omega\tau_k^s] = 0.$$

Найдем решение этого уравнения:

$$\begin{cases} x_k = 0, \\ y_k = \omega L \cdot (x_{k-1} - I_0) \cdot \sin[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + (y_{k-1} - E_0) \cdot \cos[\omega(\tau_k + \tau_k^s)] + E_0 \cdot \cos[\omega\tau_k^s] - \frac{I_0(a - \tau_k - \tau_k^s)}{c}. \end{cases}$$

Найдем корни τ_k^s :

$$(x_{k-1} - I_0) \cdot \cos[\omega(x + \tau_k)] - \omega c \cdot (y_{k-1} - E_0) \cdot \sin[\omega(x + \tau_k)] - \omega c \cdot E_0 \cdot \sin[\omega\tau_k] + I_0 = 0.$$

$$\beta_k = x_{k-1} - I_0, \quad \alpha_k = \omega c \cdot (E_0 - y_{k-1}), \quad C_0 = -I_0, \quad J = -\omega c \cdot E_0.$$

$$\beta_k \cdot \cos[\omega(x + \tau_k)] + \alpha_k \cdot \sin[\omega(x + \tau_k)] + J \cdot \sin[\omega\tau_k] - C_0 = 0.$$

$$\beta_k \cdot \cos \omega x \cdot \cos \omega \tau_k - \beta_k \cdot \sin \omega x \cdot \sin \omega \tau_k + \alpha_k \cdot \sin \omega x \cdot \cos \omega \tau_k + \alpha_k \cdot \cos \omega x \cdot \sin \omega \tau_k + J \cdot \sin \omega x - C_0 = 0.$$

$$(\alpha_k \cdot \cos \omega \tau_k - \beta_k \cdot \sin \omega \tau_k) \cdot \sin \omega x + J \cdot \sin \omega x + (\beta_k \cdot \cos \omega \tau_k + \alpha_k \cdot \sin \omega \tau_k) \cdot \cos \omega x - C_0 = 0.$$

$$(J + \alpha_k \cdot \cos \omega \tau_k - \beta_k \cdot \sin \omega \tau_k) \cdot \sin \omega x + (\beta_k \cdot \cos \omega \tau_k + \alpha_k \cdot \sin \omega \tau_k) \cdot \cos \omega x - C_0 = 0.$$

Подставим $A_k = (J + \alpha_k \cdot \cos \omega \tau_k - \beta_k \cdot \sin \omega \tau_k)$, $B_k = (\beta_k \cdot \cos \omega \tau_k + \alpha_k \cdot \sin \omega \tau_k)$.

$$A_k \cdot \sin \omega x + B_k \cdot \cos \omega x - C_0 = 0, \quad 2A_k \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega x}{2} + B_k \cdot \left(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2}\right) - C_0 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2}\right) = 0.$$

$$2A_k \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega x}{2} + B_k \cdot \left(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2}\right) - C_0 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2}\right) = 0.$$

$$-(B_k + C_0) \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2} + 2A_k \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega x}{2} + B_k - C_0 = 0, \quad \operatorname{tg}^2 \frac{\omega x}{2} - \frac{2A_k}{C_0 + B_k} \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega x}{2} - \frac{B_k - C_0}{C_0 + B_k} = 0.$$

$$y^2 - \frac{2A_k}{C_0 + B_k} y - \frac{B_k - C_0}{C_0 + B_k} = 0.$$

$$y_{1,2} = \frac{A_k}{C_0 + B_k} \pm \sqrt{\frac{A_k^2}{(C_0 + B_k)^2} + \frac{B_k - C_0}{C_0 + B_k}} = \frac{1}{C_0 + B_k} \left(A_k \pm \sqrt{A_k^2 + B_k^2 - C_0^2} \right).$$

$$x = \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} \left[\frac{1}{C_0 + B_k} \left(A_k \pm \sqrt{A_k^2 + B_k^2 - C_0^2} \right) \right] + \frac{2\pi n}{\omega}, \quad (18)$$

где $0 \leq x \leq a$.

На рис. 4 представлен алгоритм расчета бифуркационной диаграммы. Диаграммы изменения тока и напряжения фильтра в рабочем режиме приведены на рис. 5.

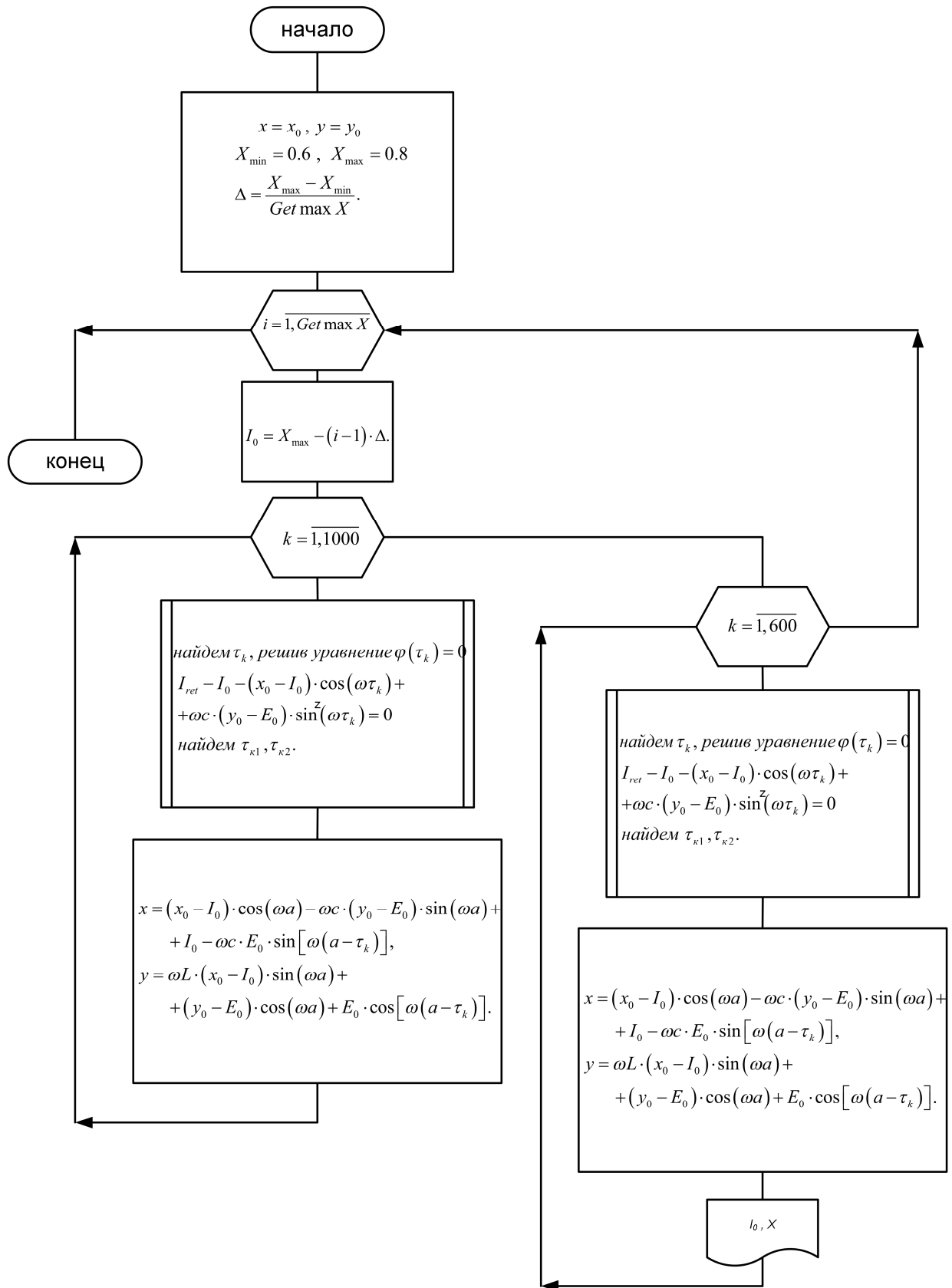


Рис. 4. Алгоритм расчета бифуркационной диаграммы

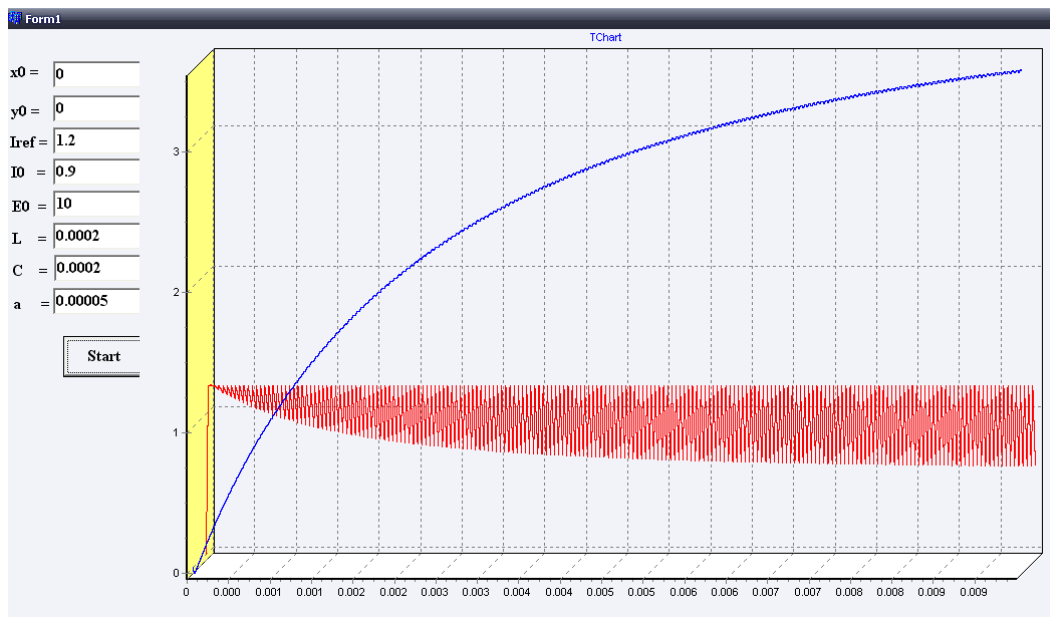


Рис. 5. Диаграммы изменения тока и напряжения фильтра в рабочем режиме

Заключение

Разработаны алгоритмы моделирования и расчета бифуркационной диаграммы. Выявлен новый тип С-бифуркации, приводящей к мягкому переходу от двухчастотных колебаний к устойчивому периодическому режиму, существо которой состоит в следующей: в точке ветвления неустойчивая периодическая орбита сливается с двумерным тором, сталкиваясь с границей, разделяющей области кусочной непрерывности на фазовой плоскости. При этом мягко рождается устойчивая периодическая орбита.

Литература

1. Philips, светодиодные освещение, справочник, принцип работы, преимущества и области применения / Philips – Solid-State Lighting Solutions, Inc, 2010. –156 с.
2. Жусубалиев, Ж.Т. Бифуркации в широтно-импульсных системах автоматического управления: учеб. пособие / Ж.Т. Жусубалиев, В.С. Титов. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т., 2007. – 100 с.
3. Жусубалиев, Ж.Т. Колебания, бифуркации и хаос в технических системах: учеб. пособие / Ж.Т. Жусубалиев, В.Г. Полищук, В.С. Титов. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т., 2000. – 166 с.
4. Пасынков, В.В. полупроводнике приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. – 5-е изд.– Изд-во Лань, 2001. – 480 с.
5. Анищенко, В.С. Лекции по нелинейной динамике: учеб. пособие для вузов / В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 516 с.
6. Фейгин, М.И. Удвоение периода колебаний при С-бифуркациях в кусочно-непрерывных системах / М.И. Фейгин // ПММ. – 1970. – Т. 34, № 5. – С. 861–869.
7. Фейгин, М.И. О структуре С-бифуркационных границ кусочно-непрерывных систем / М.И. Фейгин // ПММ. – 1978. – Т. 42, № 5. – С. 820–829.
8. Border-collision bifurcation in the buck converter / G. Yuan, S. Banerjee, E. Ott, J.A. Yorke // IEEE Trans. Circuits Syst. I. – 1998. – Vol. 45. – P. 707–716.
9. Жусубалиев Ж.Т. К исследованию хаотических режимов преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Электричество. 1997. № 6. С. 40–46.
10. Детерминированные и хаотические режимы преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Ж.Т. Жусубалиев, Ю.В. Колоколов, С.В. Пинаев, В.Н. Рудаков // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – № 3. – С. 157–170.
11. Жусубалиев, Ж.Т. Бифуркации и хаотические движения в релейных системах автоматического регулирования / Ж.Т. Жусубалиев // Материалы науч.-техн. конф. «Распознавание-97» (Курск, 25–28 ноября, 1997). – Курск, 1997. – С. 25–29.

12. C-bifurcations in the dynamics of control system with pulse-width modulation / Zh.T. Zhusubaliyev, V.S. Titov, E.Yu. Emelyanova, E.A. Soukhoterin // *Proc. of Second Int. Conf. COC'2000 (St. Petersburg, Russia, July 5–7, 2000)*. – St. Petersburg, 2000. – P. 203–204.

13. Фейгин, М.И. Бифуркационный подход к исследованию управляемости судна при ветровом воздействии / М.И. Фейгин // *Вестник Нижегород. ун-та. Математическое моделирование и оптимальное управление*. – 1998. – Вып. 2(19). – С. 41–49.

14. *Chaotic mechanics in systems with impacts and friction* / B. Blazejczyk-Okolewska, K. Czolczynski, T. Kapitaniak, J. Wojewoda. – Singapore: World Scientific, 1999. – 200 p.

15. *Fradkov, A.L. Introduction to Control of Oscillations and Chaos* / A.L. Fradkov. – Singapore: World Scientific, 1998. – 391 p.

16. *Chen, G. From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications* / G. Chen, X. Dong. – Singapore: World Scientific, 1998. – 462 p.

17. Feigin, M.I. The increasingly complex structure of the bifurcation tree of a piecewise-smooth system / M.I. Feigin // *J. Appl. Maths. Mechs.* – 1995. – No. 59. – P. 853–863.

18. Shaw, S. A periodically forced piecewise linear oscillator / S. Shaw, P. Holmes // *J. Sound Vib.* – 1983. – Vol. 90, no. 1. – P. 129–155.

19. Thompson, J. Chaotic dynamics of an impact oscillator / J. Thompson, R. Ghaffari // *Phys. Rev. B.* – 1983. – Vol. 27, no. 3. – P. 1741–1743.

Саид Джахад Абдо, аспирант кафедры автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gehads@mail.ru.

Поступила в редакцию 20 февраля 2015 г.

DOI: 10.14529/ctcr150306

MODELLING OF BIFURCATION PROCESSES OF THE MODES OF THE CURRENT REGULATOR OF LIGHT-EMITTING DIODES

G.A. Saeed, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, gehads@mail.ru

This article is devoted to the development of algorithms for simulation of processes of bifurcations mode of current regulator of LED lighting products. In this paper, algorithm for calculation of the bifurcation diagram is carried out. The character of the complication oscillation when changing parameters is illustrated. New type of C-bifurcation, leading to the smooth transition from the two-frequency oscillations to a stable periodic mode is identified. The mathematical model of this circuit is described. Algorithms are implemented in software. The results of testing the program written in the programming language C++ are shown.

Keywords: modeling, light-emitting diodes, stabilizer, bifurcation diagram.

References

1. Philips, *svetodiodnye osveshchenie, spravochnik, printsip raboty, preimushchestva i oblasti primeneniya* [LED Lighting, Handbook, Principles of Operating, Advantages and Field of Applications]. Philips, Solid-State Lighting Solutions, Inc, 2010. 150 p.

2. Zhusubaliyev T.J. *Bifurkatsii v shirotno-impul'snykh sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* [Bifurcation in Pulse-width Automatic Control Systems]. Kursk, Kursk state technical Univ. Publ., 2007. 100p.

3. Zhusubaliyev J.T. *Kolebaniya, bifurkatsii i khaos v tekhnicheskikh sistemakh* [Oscillations, Bifurcations and Chaos in Technical Systems]. Kursk, Kursk State Technical Univ. Publ., 2000. 166 p.

4. Pasinkov V.V. *Poluprovodnike pribory* [Semiconductor Devices]. 5th edition, Publisher Lan, 2001. 480 p.
5. Anishenko V.S., Vadivasova T.E. *Lektsii po nelineynoy dinamike* [Lectures on Nonlinear Dynamics]. Moscow; Izhevsk, Regular and Chaotic Dynamics, 2011. 516 p.
6. Feigin M.I. [Doubling of the Oscillation Period in C-bifurcations in Piecewise Continuous Systems]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1970, vol. 34, no. 5, pp. 861–869. (in Russ.)
7. Feigin M.I. *O strukture S-bifurkatsionnykh granits kusochno-nepreryvnykh sistem* [The Structure of the C-bifurcation Boundaries of Piecewise Continuous Systems]. *Applied Mechanics and Mathematics*, 1978, vol. 42, no. 5, pp. 820–829. (in Russ.)
8. Yuan G., Banerjee S., Ott E., Yorke J.A. Border-collision Bifurcation in the Buck Converter. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*. 1998, vol. 45, pp. 707–716. DOI: 10.1109/81.703837
9. Zhusubaliev Z.T. [To the Study of Chaotic Modes of Voltage Converter with Pulse Width Modulation]. *Electrical*, 1997, no. 6, pp. 40–46. (in Russ.)
10. Zhusubaliev J.T., Kalakov Y.V., Pinaev S.V., Rudakov V.N., [Determined and Chaotic Modes Voltage Converter with Pulse Width Modulation]. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 1997, no. 3, pp. 157–170. (in Russ.)
11. Zhusubaliev J.T. [Bifurcation and chaotic motions in relay automatic control systems]. *Mat. nauchno-tekhn. konferentsiya "Raspoznavanie-97"* [Math. Scientific-techn. Conf. "Recognition-97"]. Kursk, 1997, pp. 25–29. (in Russ.)
12. Zhusubaliyev Zh.T., Titov V.S., Emelyanova E.Yu., Soukhoterin E.A. C-bifurcations in the Dynamics of Control System with Pulse-width Modulation. *Proc. of Second Int. Conf. COC'2000. 2000. (St.Petersburg, Russia, July 5–7)*, pp. 203–204.
13. Feigin M.I. [Bifurcation Approach to the Study of Boat Control under the Effects of Wind]. *Bulletin of Nizhny Novgorod University. Series Mathematical Modeling and Optimal Control*, 1998, vol. 2 (19), pp. 41–49. (in Russ.)
14. Blazejczyk-Okolewska B., Czolczynski K., Kapitaniak T., Wojewoda J. *Chaotic Mechanics in Systems with Impacts and Friction*. Singapore, World Scientific, 1999. 200 p.
15. Fradkov A.L., *Introduction to Control of Oscillations and Chaos*. Singapore, World Scientific, 1998. 391 p.
16. Chen G., Dong X., *From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications*. Singapore, World Scientific, 1998. 462 p. DOI: 10.1142/3033
17. Feigin M.I., The Increasingly Complex Structure of the Bifurcation Tree of a Piecewise-smooth System. *J. Appl. Maths. Mechs*, 1995, no. 59, pp. 853–863.
18. Shaw S., Holmes P. A Periodically Forced Piecewise Linear Oscillator. *J. Sound Vib.*, 1983, vol. 90, no. 1, pp. 129–155.
19. Thompson J., Ghaffari R. Chaotic Dynamics of an Impact Oscillator. *Phys. Rev. B*, 1983, vol. 27, no. 3, pp. 1741–1743.

Received 20 February 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Саид, Дж.А. Моделирование процессов бифуркации режимов стабилизатора тока светоизлучающих диодов / Дж.А. Саид // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 40–49. DOI: 10.14529/ctcr150306

FOR CITATION

Saeed G.A. Modelling of Bifurcation Processes of the Modes of the Current Regulator of Light-Emitting Diodes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 40–49. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150306