

ШКОЛА MATLAB

Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB-Simulink

Урок 18. Аналитическое и модельное исследование активного трехфазного полупроводникового выпрямителя

Статья продолжает цикл, посвященный исследованиям динамики полупроводниковых преобразователей с регулируемым эффектом накопления энергии. Динамические свойства этих преобразователей определяются с помощью структурных моделей на основании математического описания электромагнитных процессов по «гладкой» составляющей. В настоящей статье осуществлено аналитическое и модельное исследование активного трехфазного полупроводникового выпрямителя.

Сергей Герман-Галкин,
д. т. н., профессор

germangalkin@gmail.com

Введение

Основу активного трехфазного полупроводникового выпрямителя (АВ) составляет схема, представленная на рис. 1а. В этой схеме, так же как и в повышающем импульсном преобразователе [2, 3], на периоде модуляции имеют место лишь два состояния силовой цепи. В первом состоянии (назовем его импульсом) источник питания через дроссели и соответствующие полупроводниковые ключи подсоединен к выходным зажимам АВ (к конденсатору). Состояние импульса может быть реализовано при включении шести различных сочетаний силовых полупроводниковых ключей (VT1, VT4, VT6; VT3, VT2, VT6; VT5, VT2, VT4; VT2, VT3, VT5; VT4, VT1, VT5; VT6, VT1, VT3).

Во втором состоянии (назовем его паузой) источник питания через дроссели замкнут накоротко. Состояние паузы реализуется при включении двух сочетаний силовых полупроводниковых ключей (VT1, VT3, VT5; VT2, VT4, VT6).

Математическое описание АВ

Базой аналитических методов рассматриваемого класса систем служит теоретическое положение, разработанное А. А. Булгаковым [1], заключающееся в том, что электромагнитные и энергетические характеристики АВ определяются основной (глад-

кой) составляющей. Пульсации токов и мощностей в системе, вызванные переключением силовых полупроводниковых элементов, приводят к незначительным искажениям формы токов и дополнительным (обычно незначительным) потерям. Основываясь на этом положении, удается аналитически описать и исследовать некоторые характерные режимы работы АВ по гладкой (основной) составляющей.

В дальнейшем, после создания модели, эти режимы можно протестировать на модельной установке, сравнить их с полученными аналитическими результатами и доказать адекватность модели. Построение модели системы сродни разработке экспериментального образца. Поэтому обычно такая задача решается методом последовательных приближений, при котором приходится иногда возвращаться к началу, перепроверяя аналитический и модельный эксперименты.

В основе математического описания электромагнитных процессов в АВ по гладкой составляющей лежит метод пространственного вектора [5]. При описании электромагнитных процессов с использованием метода пространственного вектора функциональная схема АВ преобразуется к виду, представленному на рис. 1б. В этой функциональной схеме преобразователь с одной стороны подключен к трехфазной сети переменного тока с напряжением ($-U_1$) через дроссель, с другой — к цепи постоянного тока с фильтром.

Со стороны сети математическое описание АПП может быть представлено в виде:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_{01} + L \frac{d\bar{i}_1}{dt} + r\bar{i}_1 + jx\bar{i}_1, \quad (1)$$

где \bar{U}_1 — результирующий вектор напряжения сети; \bar{E}_{01} — результирующий вектор противо-ЭДС АВ по первой гармонике; r, x — активное и реактивное сопротивления, учитывающие сопротивление источника, дросселя и двух проводящих полупроводниковых приборов АВ.

По отношению к сети переменного тока АВ генерирует ЭДС, первая гармоника (гладкая составляющая) которой равна [5]:

$$\bar{E}_{01} = \frac{mu_d}{2} \exp(j\varphi_m), \quad (2)$$

где u_d — напряжение в звене постоянного тока, m — коэффициент модуляции, φ_m — фаза напряжения модуляции по отношению к напряжению сети.

В синхронно вращающейся системе координат (x — вещественная ось и y — мнимая ось) при совмещении вещественной оси с вектором напряжения сети уравнения (1, 2) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} U_x &= U_1 = E_x + L \frac{di_x}{dt} + r i_x - x i_y, \\ 0 &= E_y + L \frac{di_y}{dt} + r i_y + x i_x, \\ E_x &= \frac{mu_d}{2} \cos \varphi_m, \\ E_y &= \frac{mu_d}{2} \sin \varphi_m. \end{aligned} \quad (3)$$

Для полного описания АВ систему уравнений (3) следует дополнить уравнением энергетического баланса между сетью и нагрузкой и уравнением Кирхгофа в цепи постоянного тока:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_1 i_x &= u_d i_d + \frac{3}{2} r (i_{x1}^2 + i_{y1}^2), \\ C \frac{du_d}{dt} &= i_d - i_H = i_d - \frac{u_d}{R}, \end{aligned} \quad (4)$$

где C, R — емкость конденсатора фильтра и сопротивление нагрузки.

Статические характеристики АВ

В установленном режиме уравнения (3, 4), описывающие АВ, преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_x + r I_x - x I_y, \\ 0 &= E_y + r I_y + x I_x, \\ E_x &= \frac{mU_d}{2} \cos \varphi_m, \\ E_y &= \frac{mU_d}{2} \sin \varphi_m. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} U_1 i_x &= U_d I_d + \frac{3}{2} r (I_x^2 + I_y^2), \\ I_d &= \frac{U_d}{R}. \end{aligned} \quad (6)$$

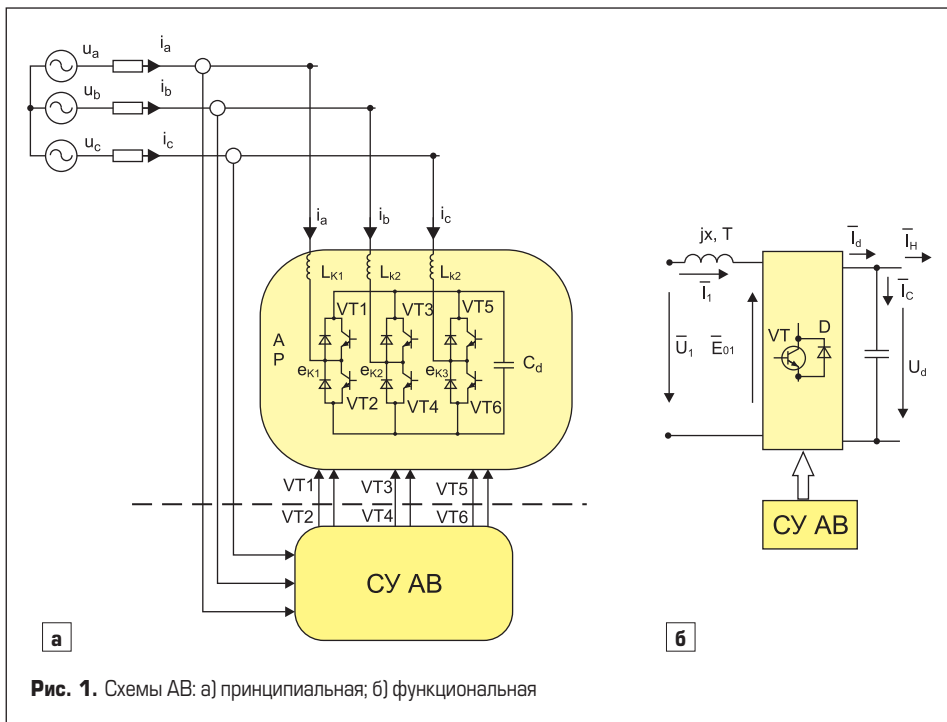


Рис. 1. Схемы АВ: а) принципиальная; б) функциональная

Некоторые свойства АВ удобно выяснить не прибегая к решению, используя векторные диаграммы, построенные для установившегося режима работы. Векторные диаграммы АВ в синхронно вращающейся системе координат (x) и (y) для двух характерных режимов работы, построенные по уравнениям (5, 6), показаны на рис. 2. Эти диаграммы построены в предположении $x \gg r$, что обычно и имеет место в АВ.

При работе активного выпрямителя фаза между напряжением сети и током, потребляемым АВ, $\varphi < 90^\circ$, при этом для $E_{01} < U_1$ этот ток имеет индуктивный характер, а для $E_{01} > U_1$ — емкостный характер. При работе АВ в режиме активного выпрямителя фаза модуляции φ_m отрицательна. Этот предварительный качественный анализ позволяет в дальнейшем построить модель АВ и оценить ее адекватность. Здесь необходимо заметить, что активная мощность, передаваемая преобразователем в нагрузку, главным образом зависит от значения фазы модуляции.

Уравнения (5, 6) позволяют аналитически исследовать статические характеристики АВ. Основная статическая характеристика, представляющая зависимость выходного напряжения от коэффициента и фазы модуляции, определяется на основании совместного решения уравнений (5, 6) в установленном режиме. Тогда уравнение для определения напряжения на нагрузке (в звене постоянного тока) будет записано в виде:

$$U_d = \frac{\frac{3}{4} m U_1 \frac{R}{z^2} (r \cos \varphi_m - x \sin \varphi_m)}{1 + \frac{3}{8} m^2 \frac{rR}{z^2}}, \quad (7)$$

где R — сопротивление нагрузки, $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ — полное сопротивление АВ на стороне переменного тока. Все дальнейшие исследования осуществляются в относительных

(безразмерных, pu — per units) величинах. За базовые значения приняты следующие напряжение и ток: $U_b = U_1, I_b = U_b/z$, уравнение (7) в относительных величинах запишем в виде:

$$U_d (pu) = \frac{\frac{3}{4} m \frac{R}{z^2} (r \cos \varphi_m - x \sin \varphi_m)}{1 + \frac{3}{8} m^2 \frac{rR}{z^2}}. \quad (8)$$

Напряжение на выходе АВ зависит от его собственных параметров, от сопротивления нагрузки и параметров управления. Взяв производную по фазе в уравнении (8), можно определить ее значение, при котором напряжение на выходе максимально.

$$\varphi_{mmax} = -\arctg(x/r). \quad (9)$$

Из уравнения (8) следует, что напряжение на нагрузке при постоянных параметрах АВ зависит как от коэффициента модуляции m , так и от фазы модуляции φ_m . Предельная для любого значения сопротивления нагрузки R величина выходного

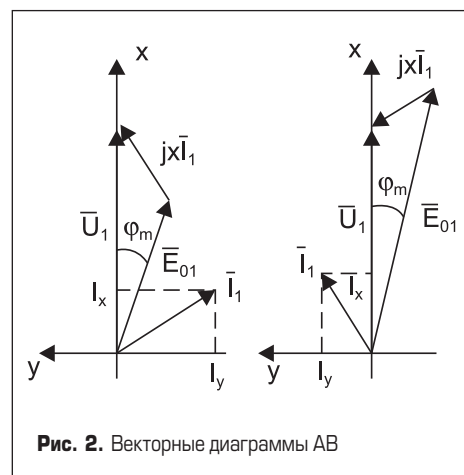


Рис. 2. Векторные диаграммы АВ

напряжения достигается при единственном значении фазы модуляции, определенной уравнением (9).

На рис. 3 показаны рассчитанные по уравнениям (8) регулировочные характеристики,

построенные в функции от коэффициента модуляции m при фазе модуляции $\varphi_m = \pm 1,5$ рад для АВ с различными сопротивлениями нагрузки и со следующими параметрами: $U_1 = 310$ В, $r = 0,4$ Ом, $x = 3,14$ Ом.

На рис. 4 представлены рассчитанные по уравнениям (8) для тех же параметров АВ регулировочные характеристики, построенные в функции от фазы модуляции φ_m при постоянном (максимальном) коэффициенте модуляции $m = 1,0$.

Из системы уравнений (3) рассчитываются электромагнитные и энергетические характеристики АВ в относительных единицах (pu — per units).

$$I_x(pu) = \frac{r}{z} - \frac{mU_d(pu)}{z}(r \cos \varphi_m + x \sin \varphi_m),$$

$$I_y(pu) = -\frac{x}{z} + \frac{mU_d(pu)}{z}(x \cos \varphi_m - r \sin \varphi_m),$$

$$I_1(pu) = \sqrt{I_x^2(pu) + I_y^2(pu)}. \quad (10)$$

$$P_1(pu) = 1,5UI_x(pu), \quad Q_1(pu) = -1,5I_y(pu),$$

$$S_1(pu) = 1,5\sqrt{I_x^2(pu) + I_y^2(pu)}, \quad (11)$$

где $U_d(pu) = U_d/U_b$, $I_x(pu) = I_x/I_b$, $I_y(pu) = I_y/I_b$ — относительные величины напряжения и токов.

Относительная мощность в звене постоянного тока и относительные потери в АВ определяются из уравнений:

$$P_d(pu) = \frac{U_d^2}{RU_b I_b} = \frac{z}{R} U_d^2(pu),$$

$$\Delta P(pu) = 1,5 \frac{I_1^2 r}{U_b I_b} = 1,5 \frac{r}{z} I_1^2(pu). \quad (12)$$

Зависимости токов от коэффициента модуляции при постоянном значении фазы модуляции $\varphi_m = -1,5$ рад показаны на рис. 5. Уравнения (11) свидетельствуют о том, что такие же зависимости имеют активная и реактивная (с обратным знаком) мощности, потребляемые АВ от сети.

Составляющая тока I_x определяет активную мощность, потребляемую АВ из сети. Составляющая тока I_y , сдвинутая по фазе на 90 градусов относительно напряжения, определяет реактивную мощность, потребляемую АВ из сети. При значениях φ_m , не превышающих величины, определенной уравнением (9), АВ потребляет из сети положительную (индуктивную) мощность.

Результаты исследования, представленные выше, свидетельствуют о том, что при независимом алгоритме управления АВ может обеспечить требование $PF = 1$ только при фиксированных значениях коэффициента модуляции, напряжения на нагрузке и сопротивлении нагрузки.

Исследование динамических характеристик АВ

Полное математическое описание, выраженное уравнениями (3, 4), свидетельствует о том, что АВ представляет собой существенно нелинейную динамическую систему. Возможности аналитического исследования такой системы весьма ограничены, но представленное математическое описание позволяет построить

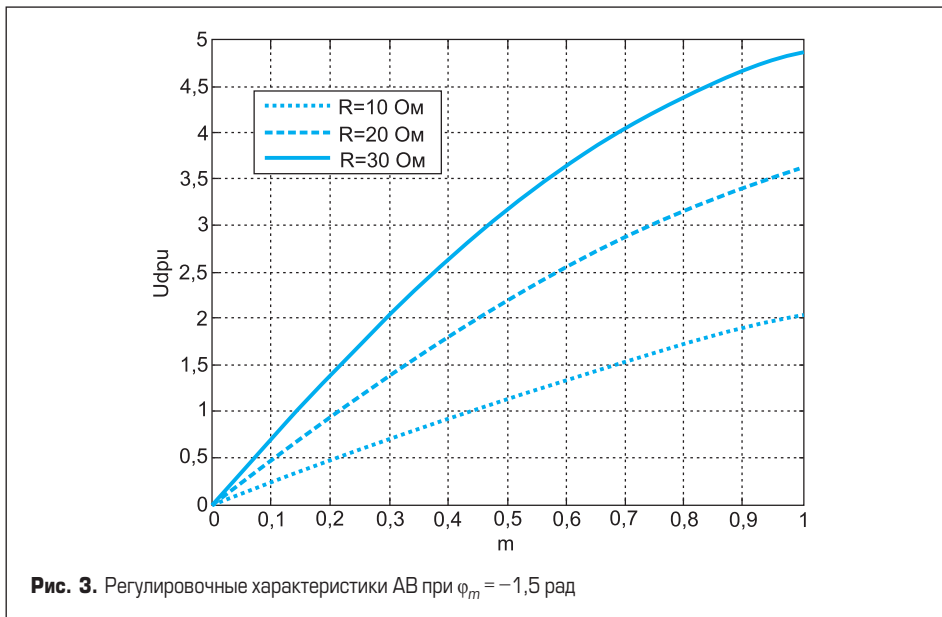


Рис. 3. Регулировочные характеристики АВ при $\varphi_m = -1,5$ рад

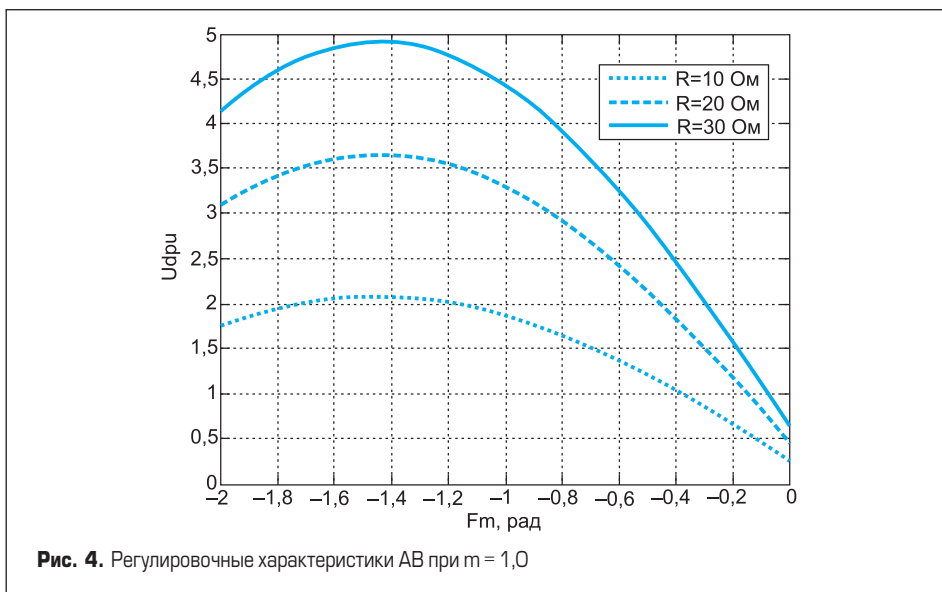


Рис. 4. Регулировочные характеристики АВ при $m = 1,0$

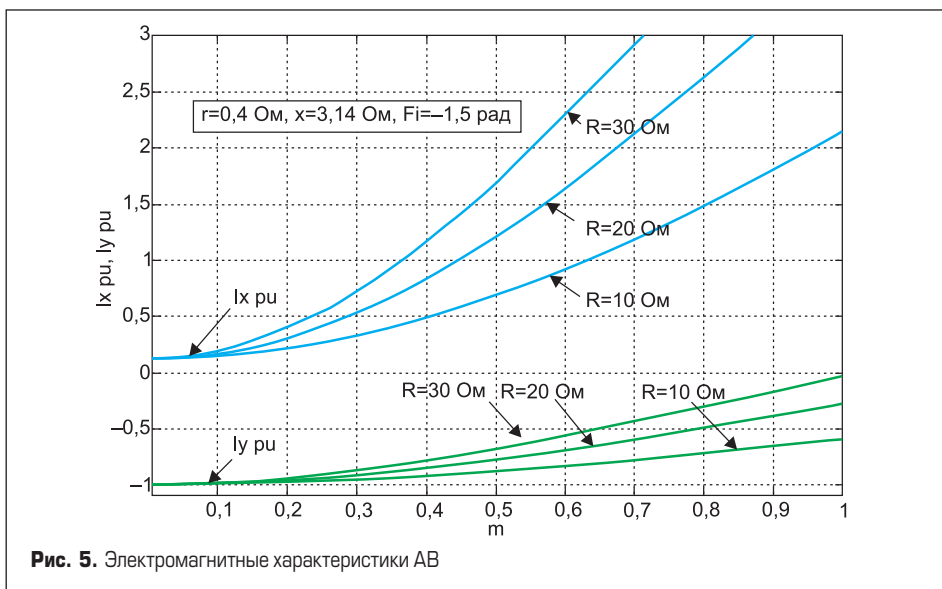


Рис. 5. Электромагнитные характеристики АВ

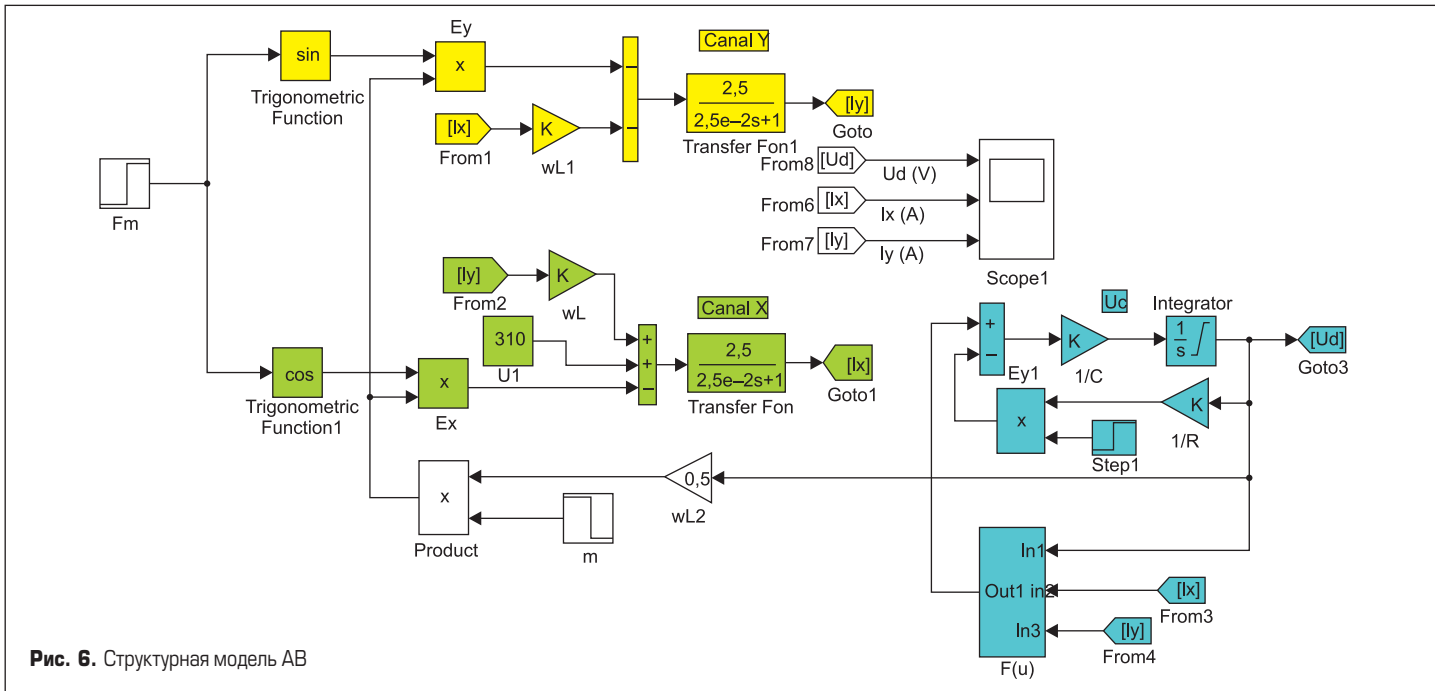


Рис. 6. Структурная модель АВ

структурную модель АВ, на которой можно оценить его динамические свойства. Такая модель построена в пакете Simulink и представлена на рис. 6.

Модель содержит два канала определения токов, составленных по уравнениям (3) (Canal_X, Canal_Y), в блоке Uс вычисляется напряжение на выходе АВ по второму уравнению (4), в блоке F(u) вычисляется ток i_d по первому уравнению (4). Блоки m, Fm, Step1 задают время и величину изменения коэффициента модуляции, фазы модуляции и сопротивления нагрузки. При исследовании динамических режимов последовательно изменялся только один сигнал, а два других оставались постоянными. Результаты моделирования приведены на рис. 7–9. На рис. 7 показан переходной процесс напряжения на выходе, активного I_x и реактивного I_y тока в сети от времени при скачкообразном (в момент времени 0,2 с) изменении коэффициента модуляции от 0,2 до 1 при постоянной фазе модуляции $\varphi_m = -1,5$ и постоянном сопротивлении нагрузки $R = 30$ Ом.

На рис. 8 показан переходной процесс по напряжению на выходе, активному I_x и реактивному I_y току в сети от времени при скачкообразном (в момент времени 0,2 с) изменении фазы модуляции от $\varphi_m = -0,5$ до $-1,5$ при постоянном коэффициенте модуляции $m = 1$ и постоянном сопротивлении нагрузки $R = 30$ Ом.

На рис. 9 показан переходной процесс по напряжению на выходе, активному I_x и реактивному I_y току в сети от времени при скачкообразном (в момент времени 0,2 с) изменении сопротивления нагрузки R от 30 до 10 Ом, при этом коэффициент и фаза модуляции оставались постоянными $\varphi_m = -1,5$, $m = 1$.

Анализ результатов моделирования показывает:

- переходные процессы в АВ при независимом управлении носят колебательный характер;

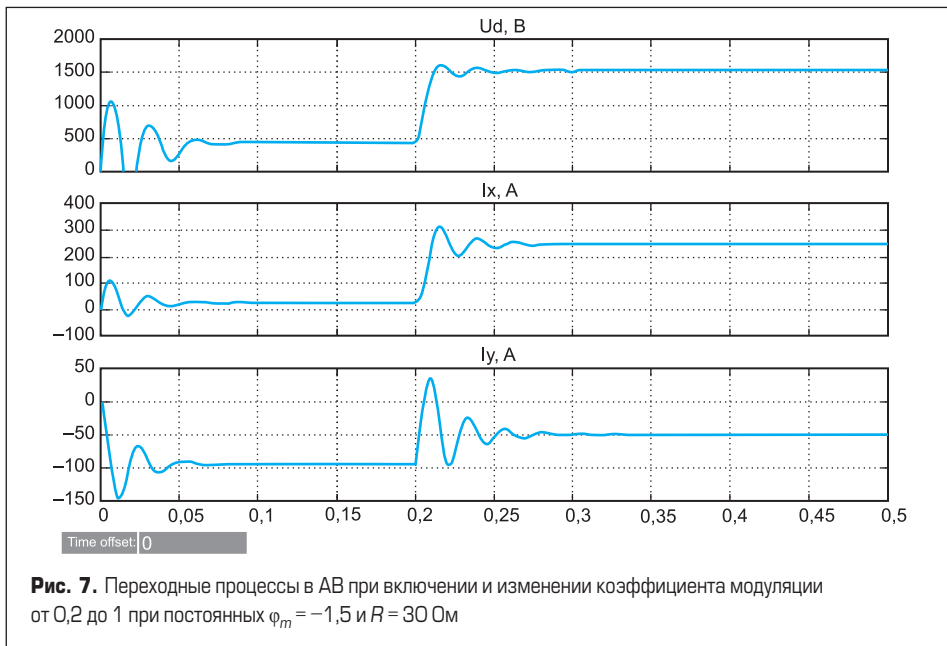


Рис. 7. Переходные процессы в АВ при включении и изменении коэффициента модуляции от 0,2 до 1 при постоянных $\varphi_m = -1,5$ и $R = 30$ Ом

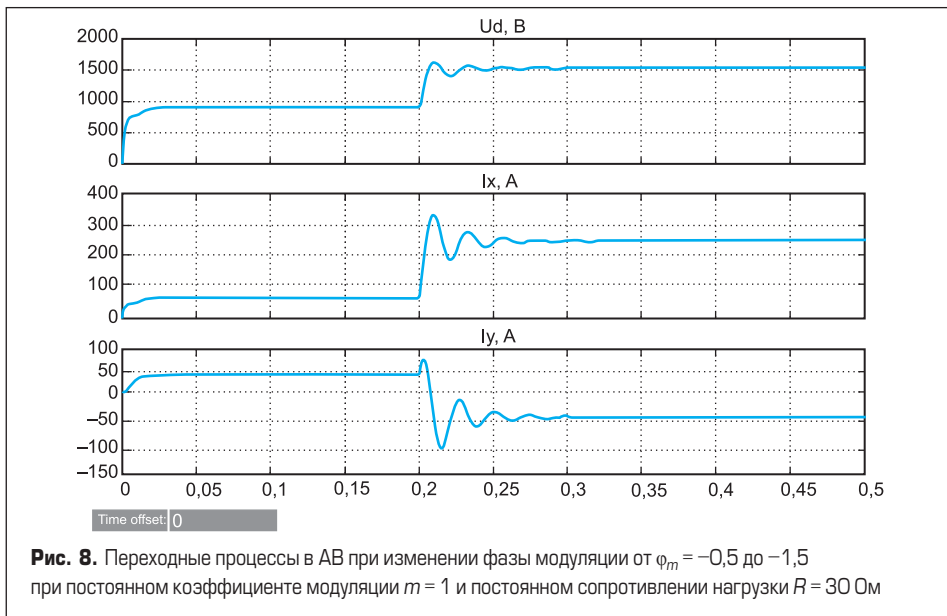


Рис. 8. Переходные процессы в АВ при изменении фазы модуляции от $\varphi_m = -0,5$ до $-1,5$ при постоянном коэффициенте модуляции $m = 1$ и постоянном сопротивлении нагрузки $R = 30$ Ом

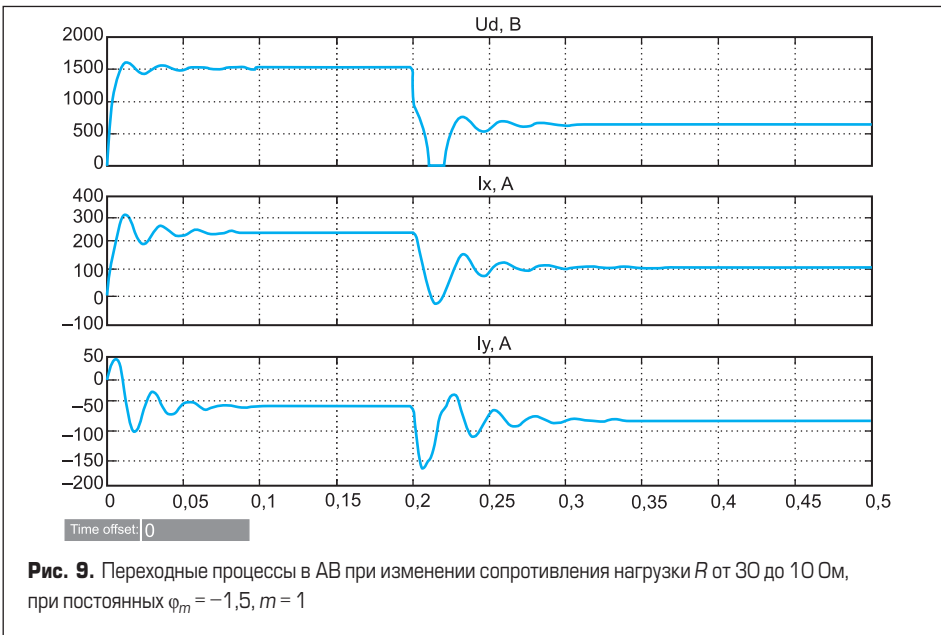


Рис. 9. Переходные процессы в АВ при изменении сопротивления нагрузки R от 30 до 10 Ом, при постоянных $\varphi_m = -1,5, m = 1$

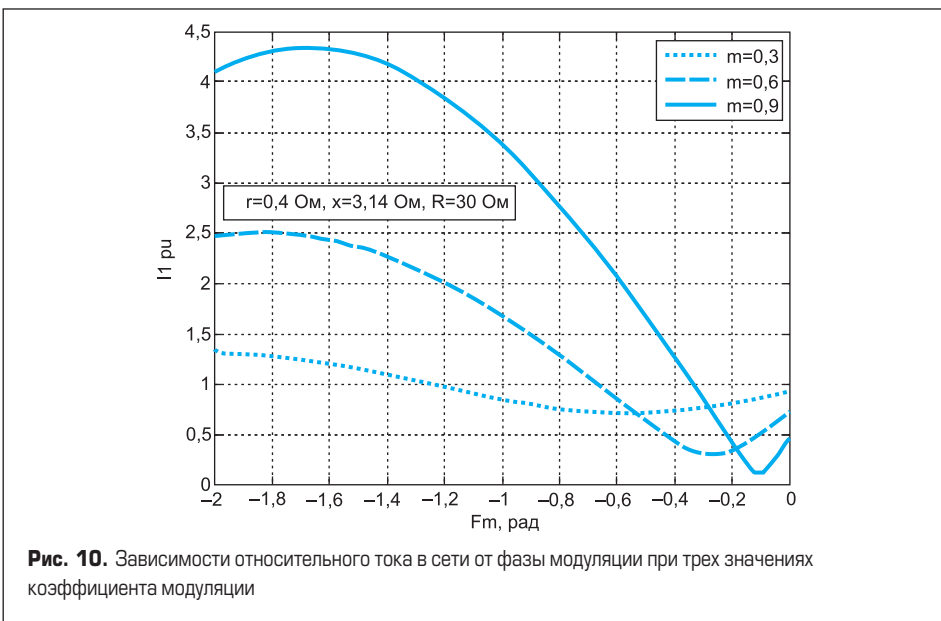


Рис. 10. Зависимости относительного тока в сети от фазы модуляции при трех значениях коэффициента модуляции

- напряжение на выходе во время переходных процессов не может быть отрицательным вследствие наличия диодного моста в схеме АВ;
- установившиеся значения переменных совпадают со значениями, рассчитанными выше и представленными на рис. 3, 4.

Статические характеристики АВ при токовом управлении

Как было показано выше, при независимом алгоритме управления АВ может обеспечить требование $PF = 1$ только при фиксированных значениях коэффициента модуляции, напряжении на нагрузке и сопротивлении нагрузки.

Поэтому при построении схемы управления АВ, рассчитываемого на работу с изменяющимся сопротивлением нагрузки, приходится отказаться от независимого алгоритма управления. Для непосредственного задания активной и реактивной составляющих тока на входе АВ необходимо организовать токовое управление преобразователем. В этом случае управление организуется в синхронно вращающейся системе координат (x, y) , с релейной отрицательной обратной связью по составляющим i_x, i_y тока. Такое управление получило название «токовый коридор».

Решающе важными для исследования и последующего построения адекватной модели АВ с токовым управлением являются вопросы, связанные с ограничениями. Эти ограничения связаны с физическими процессами в схеме, они позволяют определить диапазон изменения задающих токовых сигналов, при которых аналитические зависимости (3, 4), описывающие АВ, остаются справедливыми.

Физическим ограничением в схеме является ток в сети, который определяется по уравнению (10). На рис. 10 построены

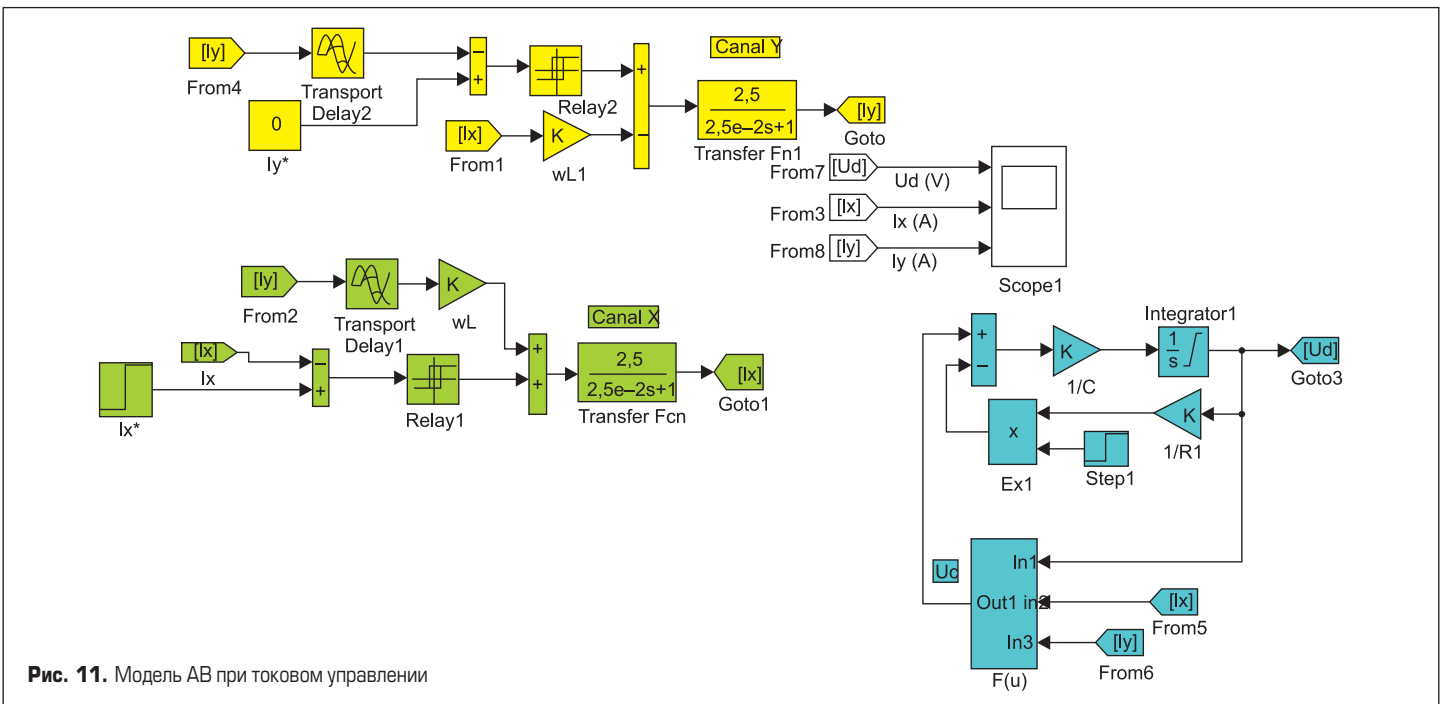


Рис. 11. Модель АВ при токовом управлении

зависимости относительного тока в сети от фазы модуляции при трех значениях коэффициента модуляции. Эти зависимости имеют максимум и минимум, которые и определяют диапазон изменения тока задания при токовом управлении. Для реализации $PF = 1$ следует задавать только активный ток I_x , а ток $I_y = 0$. В этом случае полный ток сети равен активному току и зависимости (рис. 10) определяют диапазон возможного изменения задания активного тока.

Исследование динамических характеристик АВ в замкнутой по току системе

Для непосредственного задания активной и реактивной составляющих тока на входе АВ необходимо реализовать управление инвертором в синхронно вращающейся системе координат (x, y) , с релейной отрицательной обратной связью по току.

При таком управлении электромагнитные и энергетические характеристики АВ описываются уравнениями (4), в которых i_x и i_y являются заданными функциями. Модель АВ, в которой реализовано раздельное управление по проекциям тока в сети I_x и $I_y = 0$, представлена на рис. 11.

Результаты моделирования электромагнитных процессов в АВ при токовом управлении показаны на рис. 12, 13.

На рис. 12 представлены переходные процессы при подключении АВ при заданном активном токе 50 А с последующим (в момент 0,2 с) изменением заданного тока до 250 А при неизменном сопротивлении нагрузки $R = 30$ Ом. На рис. 13 показаны переходные процессы при постоянном заданном токе 250 А и изменении сопротивления нагрузки (в момент времени 0,2 с) от 30 до 10 Ом.

Анализ переходных процессов при токовом управлении с поддержанием нулевого значения реактивной составляющей тока сети свидетельствует о том, что АВ в этом случае можно считать аperiodическим звеном с постоянной времени $\tau \approx RC$.

Модельное исследование АВ в замкнутой по напряжению системе

Для стабилизации или регулирования выходного напряжения активного выпрямителя канал управления активным током включает в контур стабилизации напряжения в звене постоянного тока АВ. Причем контур напряжения строится как внешний по отношению к контуру активного тока. Поэтому в модель (рис. 11) добавляется внешний контур по напряжению АВ.

Модель, которая позволяет исследовать электромагнитные, энергетические и динамические характеристики АВ при задании напряжения в звене постоянного тока и раздельном управлении по проекциям тока в сети I_x и I_y , представлена на рис. 14.

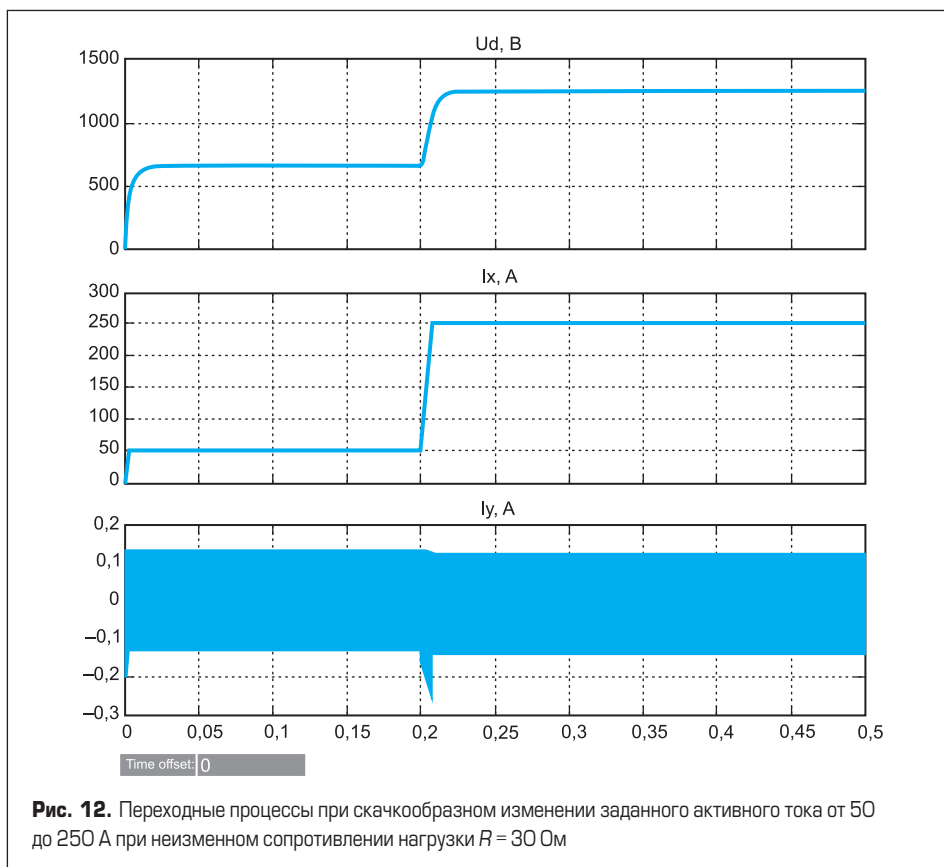


Рис. 12. Переходные процессы при скачкообразном изменении заданного активного тока от 50 до 250 А при неизменном сопротивлении нагрузки $R = 30$ Ом

В отличие от структурной модели (рис. 11) здесь добавлен внешний контур стабилизации напряжения с ПИД-регулятором. Переходные процессы по активному току в сети и напряжению на выходе при включении АВ и при изменении нагрузки показаны на рис. 15. Параметры ПИД-регулятора рассчитываются исходя из требований к переходному процес-

су в системе, которая приблизительно описывается аperiodическим звеном.

Закключение

Активный трехфазный полупроводниковый выпрямитель является нелинейной динамической системой с дискретно изменяющимися

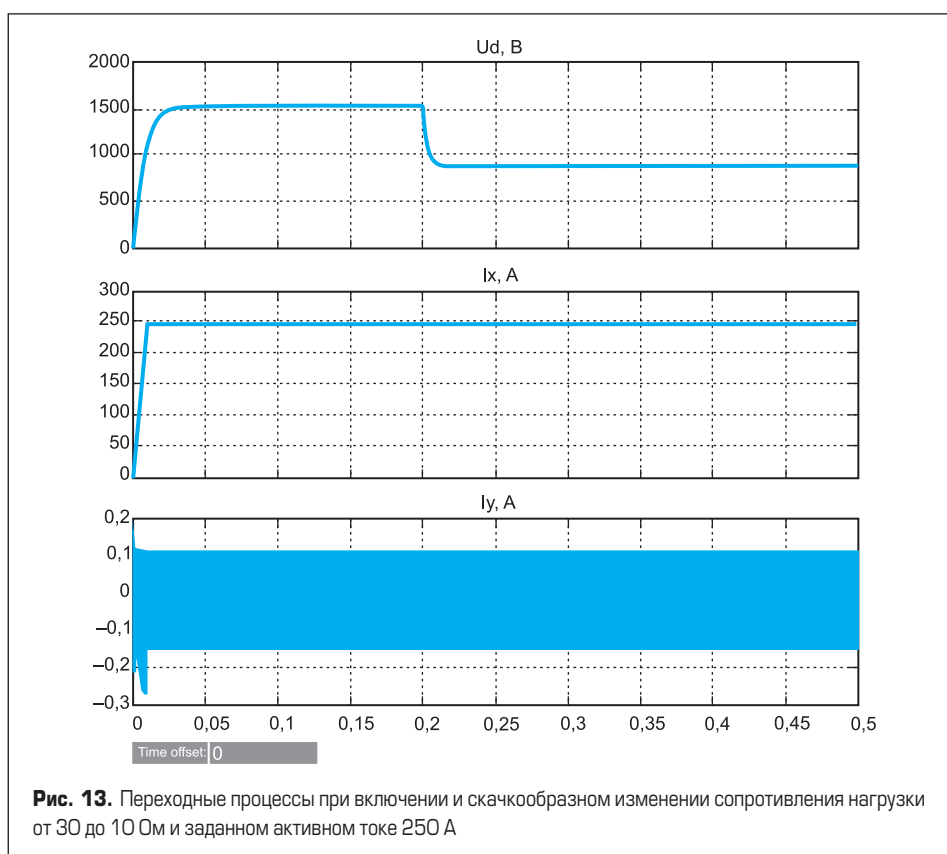


Рис. 13. Переходные процессы при включении и скачкообразном изменении сопротивления нагрузки от 30 до 10 Ом и заданном активном токе 250 А

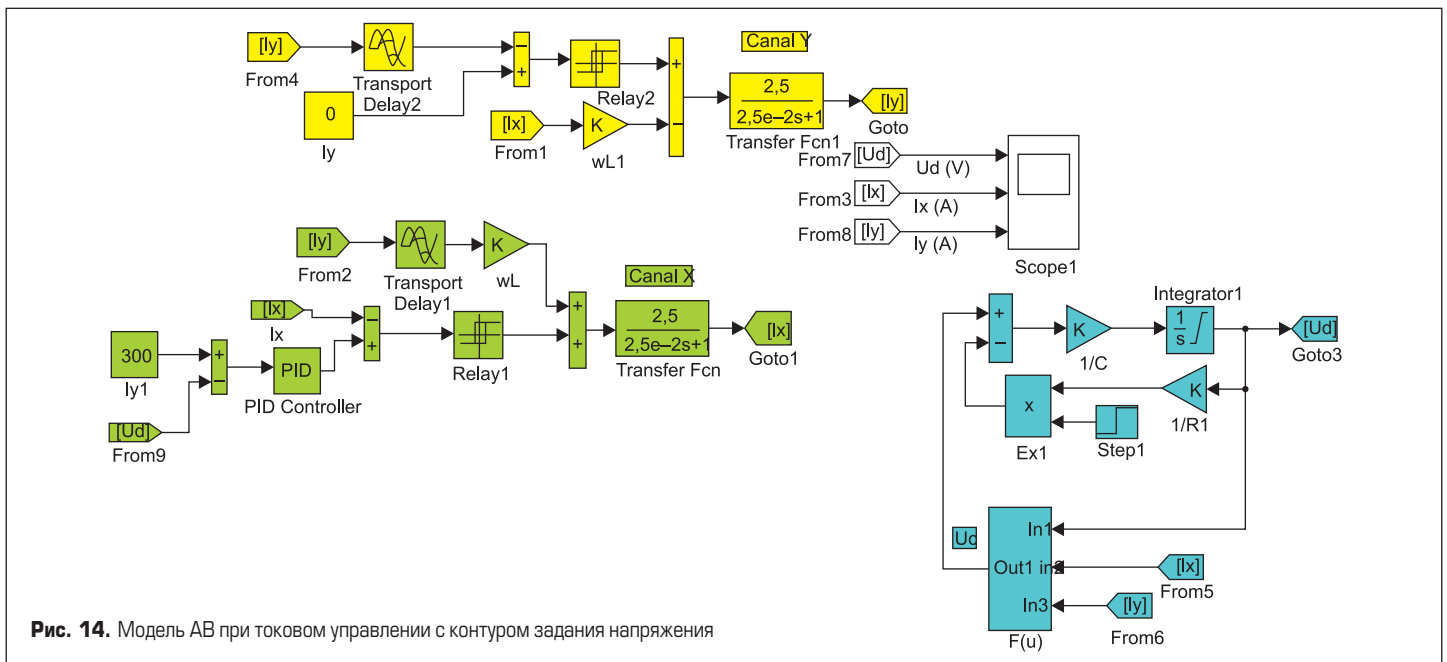


Рис. 14. Модель АВ при токовом управлении с контуром задания напряжения

параметрами и регулируемым эффектом накопления энергии. Математическое описание такой системы по «гладкой» составляющей представляется дифференциальным уравнением первого и второго порядка. Всестороннее исследование динамических свойств АВ может быть осуществлено с использованием структурных моделей, в которых учтены как его линейные, так и нелинейные свойства.

Любозытный читатель может провести исследование динамических процессов АВ с помощью виртуальных моделей, описанных в [4], и убедиться в аналогичности результатов анализа с приведенными в статье.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

Литература

1. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
2. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab — Simulink. Урок 17. Динамические режимы работы импульсного повышающего преобразователя // Силовая электроника. 2013. № 4.
3. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab — Simulink. Урок 12. Исследование импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения // Силовая электроника. 2010. № 1.
4. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab — Simulink. Изд-во «Лань», Санкт-Петербург, 2013.
5. Розанов Ю. К. Силовая электроника. Москва. Издательский дом МЭИ, 2007.

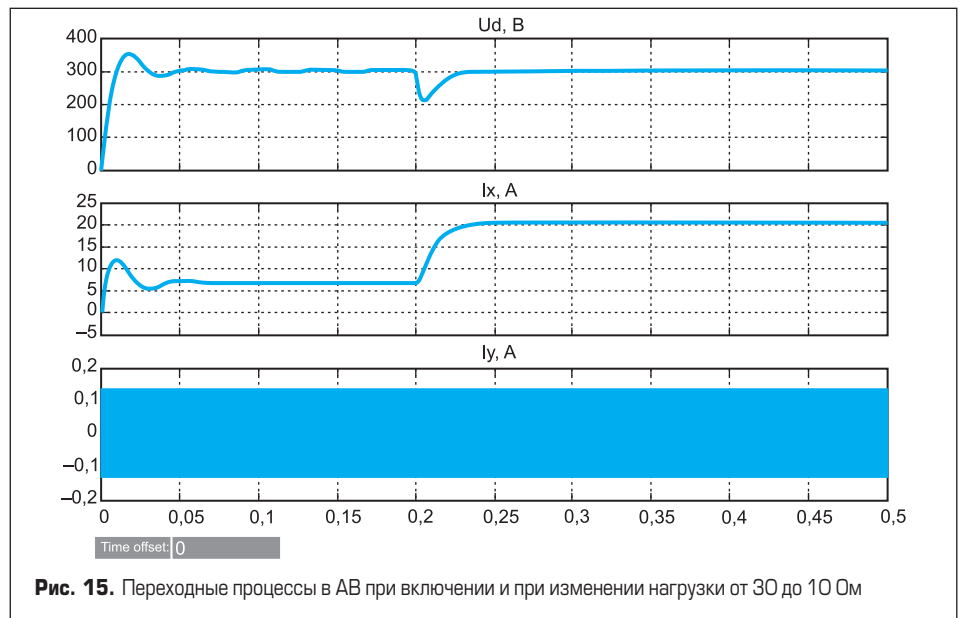


Рис. 15. Переходные процессы в АВ при включении и при изменении нагрузки от 30 до 10 Ом