

Фролов А. В., Ботманов А. В.
A. V. Frolov, A. V. Botmanov

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С АКТИВНО-ЁМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

STUDY OF BRIDGE RECTIFIER OPERATION PECULIARITIES WITH ACTIVE-CAPACITIVE LOAD

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Ботманов Антон Вадимович – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Anton V. Botmanov – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Аннотация. Приводятся результаты теоретических расчётов и компьютерного моделирования работы мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром и активной нагрузкой. Предложены эмпирические зависимости среднего значения и коэффициента пульсаций напряжения нагрузки от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки с точностью аппроксимации не менее 0,99. Указанные зависимости могут использоваться для расчёта оптимального значения ёмкости сглаживающего фильтра под заданный ток нагрузки.

Summary. The results of theoretical calculations and computer modeling of bridge rectifier with capacitive filter and active load are given. Empirical dependences of average value and load voltage ripple factor on filter capacitance and load resistance with approximation accuracy not less than 0,99 are proposed. These dependences can be used to calculate the optimal value of the smoothing filter capacitance for a given load current.

Ключевые слова: мостовой, выпрямитель, расчёт, моделирование, SimInTech, ёмкостный фильтр, среднее напряжение, коэффициент пульсаций.

Key words: bridge, rectifier, calculation, simulation, SimInTech, capacitive filter, medium voltage, ripple factor.

Статья подготовлена при поддержке ФГБОУ ВО «КНАГУ» (грант № ВН001/2023).

УДК 621.314.6

Введение. Мостовые выпрямители являются наиболее распространёнными типами выпрямителей переменного тока и используются практически во всех современных источниках вторичного электропитания. В большинстве случаев относительно низкого тока нагрузки и низкой частоты пульсаций (менее 1 кГц) для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения технически и экономически выгодно применение ёмкостных фильтров.

Существующие методики расчёта работы выпрямителя с фильтром, как правило, отдельно анализируют работу выпрямителя (как правило, на холостом ходу или при работе на активную нагрузку) и работу сглаживающего фильтра. При этом считается, что фильтр сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, но не изменяет его среднего значения, т. к. применяемые фильтры являются пассивными элементами. То есть фактически схема выпрямителя представляется источником ЭДС заданной формы. Но выпрямитель содержит диоды, в результате чего заряд кон-

денсаторов фильтра выполняется от выпрямителя, а разряд – через нагрузку, а не через внутреннее сопротивление выпрямителя, вопреки описанной модели с источником ЭДС. В результате этого режим работы реальной схемы выпрямителя с фильтром значительно отличается от расчётного и совпадает с ним только в случае больших токов нагрузки. Эти отличия касаются как величины среднего значения выходного напряжения, так и коэффициента его пульсаций.

Осциллограмма выходного напряжения выпрямителя с ёмкостным фильтром определяется постоянной времени цепи, т. е. ёмкостью конденсатора фильтра и сопротивлением нагрузки (см. рис. 1) [8; 10; 12; 23]. В зависимости от тока нагрузки напряжение нагрузки может принимать значения $U_H = \left(\frac{2}{\pi} \dots 1\right) \sqrt{2} U_{BX}$, коэффициент пульсаций – значение $K_{\Pi} = \frac{2}{3} \dots 0$. Представленные на рис. 1 диаграммы получены для ёмкости конденсатора фильтра 500 мкФ и сопротивления нагрузки 2 Ом; 20 Ом; 200 Ом; 1 кОм. При этом форма выходного напряжения становится сопоставимой с классически анализируемой лишь при достаточно низких сопротивлениях нагрузки – порядка 2 Ом.

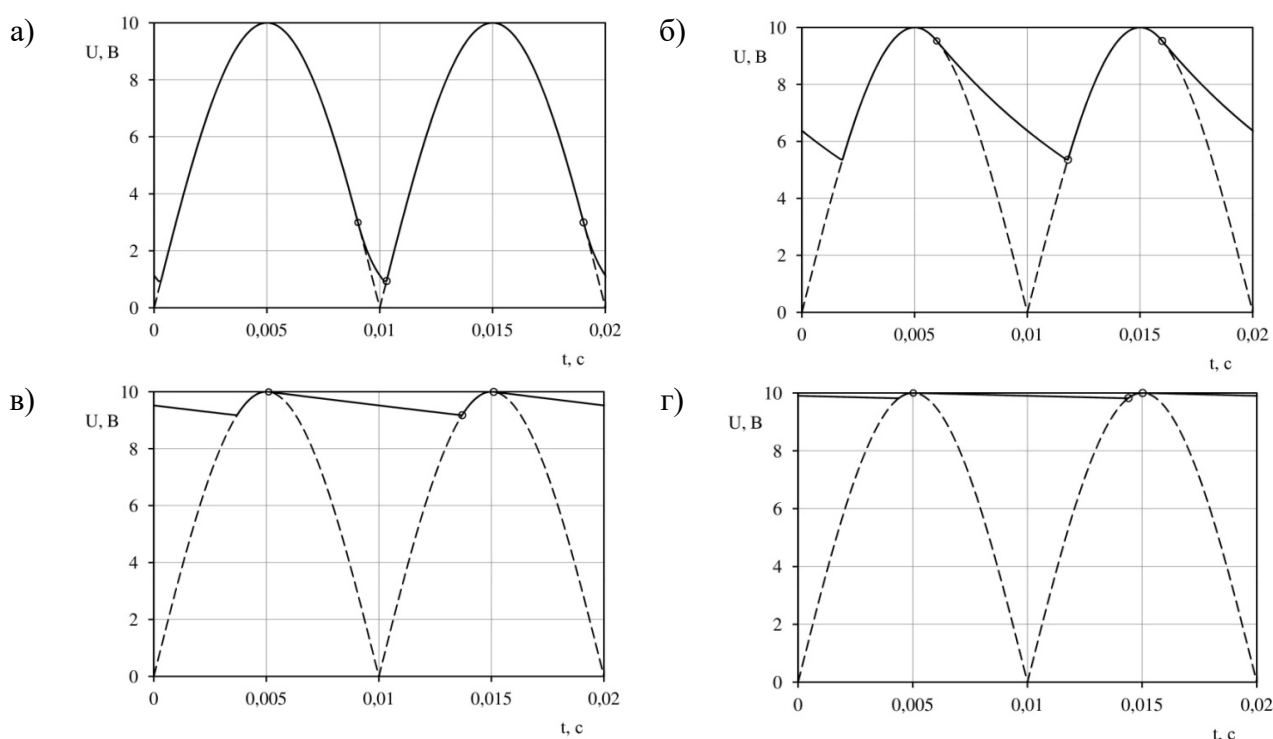


Рис. 1. Осциллограммы напряжения нагрузки мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром 500 мкФ и сопротивлением нагрузки: а – 2 Ом; б – 20 Ом; в – 200 Ом; г – 1 кОм

Большинство методик расчёта режима работы мостового выпрямителя применяется при активной нагрузке. Также существуют методики расчёта выпрямителя на индуктивную нагрузку. Реже встречаются методики расчёта работы выпрямителя на чисто ёмкостную нагрузку. При этом выражения для среднего значения напряжения нагрузки и коэффициента пульсаций [3; 8; 10–12; 14; 15; 18; 20] достаточно приближённые. Часто они рассчитываются по сложным алгоритмам с помощью номограмм и только для ограниченных режимов работы [16], в частности $\frac{4}{(m\omega CR_H)^2} > \frac{R_{BH}}{R_H} \geq \frac{10}{(m\omega CR_H)^2}$ [23].

Литературный поиск показывает [2; 4; 6–8; 10; 12; 16–21], что при «классическом» расчёте выпрямителя обычно используются выражения

$$\begin{aligned} U_H &\approx 0,9U_{BX}, \\ K_{\Pi} &\approx 0,67, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_H – напряжение нагрузки (среднее), В; $U_{вх}$ – напряжение на входе выпрямителя (действующее значение), В; $K_{п}$ – коэффициент пульсаций напряжения нагрузки выпрямителя.

В литературе встречается следующая зависимость напряжения нагрузки от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки:

$$\begin{cases} U_H = \sqrt{2}U_{вх} \left(1 - \frac{1}{2fCR_H}\right) \\ CR_H > \frac{100}{f} \end{cases}, \quad (2)$$

где C – ёмкость конденсатора фильтра, Ф; R_H – сопротивление нагрузки, Ом.

Формул расчёта ёмкостного фильтра для схемы двухполупериодного выпрямителя в современной литературе встречается несколько [2; 3; 7; 12; 17; 19; 20; 23], и они противоречивы. В большинстве работ приводится формула

$$K_{п} = \frac{1}{2\pi f_{п} CR_H}. \quad (3)$$

Но встречаются и другие выражения:

$$K_{сп} = \sqrt{(2\pi f_{п} CR_H)^2 + 1}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_{п.н} = \frac{1}{\sqrt{3}(4f_{п} CR_H - 1)}; \\ CR_H \gg \frac{1}{2\pi f_{п}} \end{cases}; \quad (5)$$

$$K_{п} = \frac{3}{CR_H}; \quad (6)$$

$$K_{сп} = \frac{k}{k^2 - 1} 2\pi f_c CR_H = \frac{4}{3} \pi f_c CR_H; \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{сп} = 2\pi f_{п} CR_H; \\ CR_H > 10 \end{cases}; \quad (8)$$

$$K_{сп} = \frac{K_{п.вх}}{K_{п}},$$

где $K_{сп}$ – коэффициент сглаживания пульсаций фильтра; $K_{п.вх}$, $K_{п}$ – соответственно коэффициенты пульсаций напряжения на входе фильтра и в нагрузке соответственно; $f_{п}$ – частота пульсаций, Гц.

В связи с недостаточной изученностью зависимости режима работы мостового выпрямителя с С-фильтром от ёмкости фильтра и сопротивления нагрузки в статье приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования работы выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой.

Методика исследований. Теоретические исследования заключались в расчёте идеализированной электрической цепи мостового выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой (см. рис. 2) с использованием законов электротехники. При расчётах принимались следующие допущения [23]: нагрузка – чисто активная; выпрямитель идеальный (отсутствуют падение

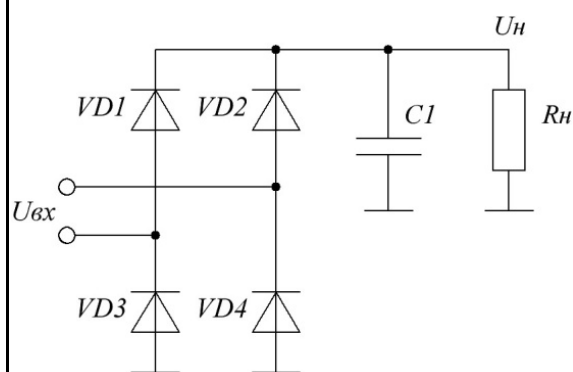


Рис. 2. Исследуемая схема

напряжения, обратный ток и сопротивление).

Среднее значение напряжения нагрузки

$$U_{н.ср} = \frac{2}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} U_H(t) dt,$$

где $U_{н.ср}$ – среднее напряжение нагрузки, В; T – период напряжения, с; $U_H(t)$ – мгновенное напряжение нагрузки, В.

Для исключения зависимости результатов расчётов и моделирования от входного напряжения схемы в работе использовалось не абсолютное значение напряжения нагрузки, а относительное (U_H):

$$U_H = \frac{U_{н.ср}}{U_{вх}}.$$

Расчёт коэффициента пульсаций напряжения k_p выполнялся по формуле

$$k_p = \frac{U_{1.m}}{U_{н.ср}},$$

где $U_{1.m}$ – амплитуда первой гармоники, В.

Расчёт амплитуды первой гармоники выполняется с помощью преобразования Фурье:

$$U_{1.m} = \sqrt{A1^2 + B1^2};$$

$$A1 = \frac{4}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} \left(U_H(t) \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \right) dt;$$

$$B1 = \frac{4}{T} \int_{\frac{1}{4}T}^{\frac{3}{4}T} \left(U_H(t) \sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \right) dt.$$

Для проверки результатов теоретических расчётов полученные зависимости проверялись с помощью математического имитационного моделирования [1; 5; 13; 22] в программе SimInTech (см. рис. 3).

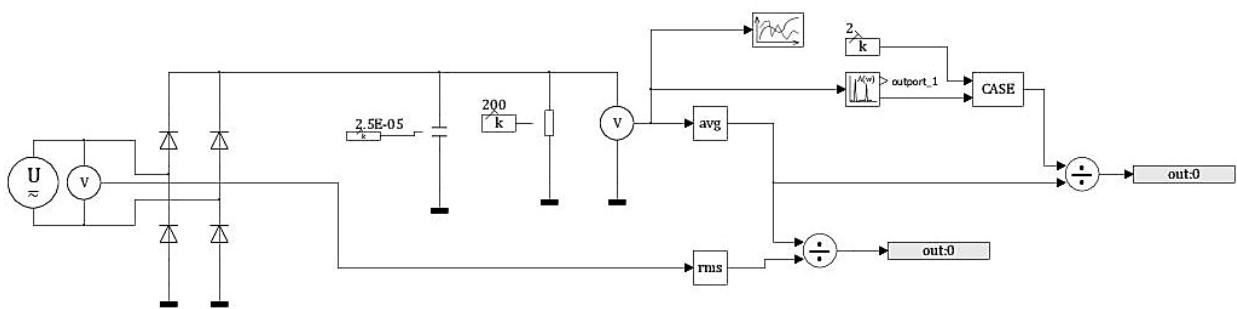


Рис. 3. Модель схемы в программе SimInTech

Параметры элементов модели:

- входное напряжение (U) – амплитуда – 100 В; частота – 10 Гц; фаза – 0;
- диод – вид BAX – экспоненциальная; $RL = 10$ МОм; $RS = 42,9$ мОм; $IS = 31,98$ нА; $N = 2$; $TT = 8,87$ мкс; $CJO = 46,77$ пФ; $VJ = 0,4$ В; $M = 0,469$; $FC = 0,5$; $EG = 0,784$ эВ; $TEG1 = 0,000473$; $TEG2 = 636$; $XTI = 0,504$; $TRS = 0$; $BV = 440$ В; $IBV = 0,1$ мА; $TBV = 0$; $T_{nom} = 27$ °С; $T = 27$ °С;
- сопротивление нагрузки $R = 200$ Ом;

– ёмкость фильтра $C = 10 \text{ мкФ} \dots 0,1$.

Параметры расчёта: $h_{\min} = 5 \cdot 10^{-6}$; $h_{\max} = 10^{-4}$; $startstep = 0$; $intmet = RK45$; $starttime = 0$; $endtime = 10^9$; $relerr = 10^{-4}$; $abserr = 10^{-6}$; $tim_{relerror} = 10^{-12}$; $synstep = 10^{-4}$.

Результаты исследований. Выходное напряжение исследуемой схемы разбивается на участки (см. рис. 4) [23]:

- заряд конденсатора через выпрямитель (интервалы «В-А'», «В'-А»);
- разряд конденсатора в нагрузку (интервал «А-В»).

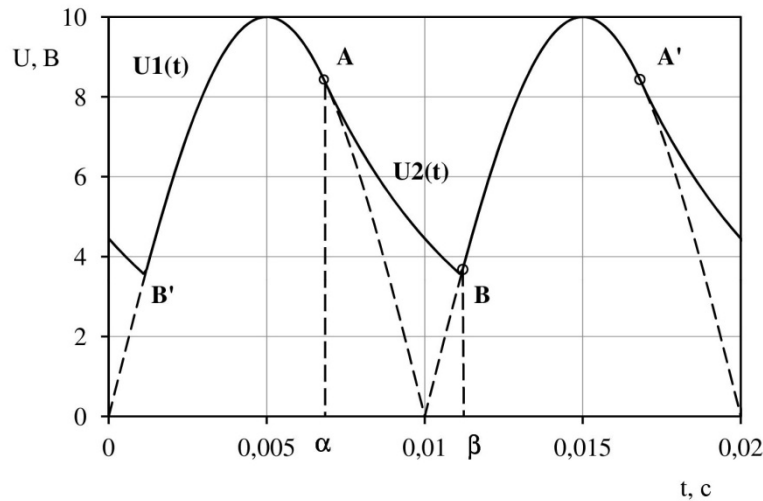


Рис. 4. Осциллограмма напряжения нагрузки исследуемой схемы

Заряд конденсатора описывается формулой

$$U_1(t) = |U_m \sin(2\pi ft)|,$$

где $U_1(t)$ – выходное напряжение выпрямителя, В.

Конденсатор фильтра разряжается через сопротивление нагрузки следующим образом:

$$U_2(t) = U_1(\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}} = U_m \sin(2\pi f\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}};$$

$$\tau = CR_n,$$

где $U_2(t)$ – напряжение конденсатора, В; α – момент переключения питания нагрузки с выпрямителя на конденсатор (аналог угла выключения диода, но во временной области), с; τ – постоянная времени цепи, с; C – ёмкость конденсатора, Ф; R_n – сопротивление нагрузки, Ом.

Разряд конденсатора происходит при закрытом диоде выпрямителя, т. е. в случае $U_2(t) > U_1(t)$.

Рассчитаем угол коммутации исходя из следующих заключений. На интервале времени $\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2}$ функция $U_1(t)$ монотонно убывает при повышении скорости убывания:

$$-\frac{dU_1(t)}{dt} = -U_m 2\pi f \cos(2\pi ft).$$

Функция $U_2(t)$ на указанном интервале времени монотонно убывает, но со снижением скорости:

$$-\frac{dU_2(t)}{dt} = \frac{U_m}{\tau} \sin(2\pi f\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}.$$

Точка коммутации «А» соответствует моменту времени (α), в котором равны как указанные функции, так и их производные:

$$\begin{cases} U_1(\alpha) = U_2(\alpha) \\ \frac{dU_1(\alpha)}{dt} = \frac{dU_2(\alpha)}{dt} ; \\ \frac{T}{4} \leq \alpha \leq \frac{T}{2} \end{cases}$$

$$U_m \omega \cos(\omega\alpha) = -\frac{U_m}{\tau} \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{\alpha-\alpha}{\tau}};$$

$$\alpha = \frac{\text{atg}(-\omega\tau) + \pi}{\omega};$$

$$\omega = 2\pi f.$$

Точка коммутации «В» соответствует моменту равенства выражений $U_1(t) = U_2(t)$ на интервале времени $\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} + \frac{T}{4}$ (см. рис. 4). Точка коммутации находится из решения следующего уравнения:

$$\begin{cases} U_1(\beta) = U_2(\beta) \\ \frac{T}{2} \leq \beta \leq \frac{5T}{4} ; \end{cases}$$

$$U_m \sin(\omega\beta) = U_m \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{\beta-\alpha}{\tau}};$$

$$\frac{\beta - \alpha}{\tau} = -\ln \frac{\sin(\omega\beta)}{\sin(\omega\alpha)}.$$

Полученное уравнение аналитически неразрешимо, поэтому будем искать его решение в каждом случае численными методами.

С учётом вышеизложенного напряжение нагрузки (см. рис. 5) рассчитывается следующим образом:

$$U_H(t) = \begin{cases} U_1(t), \text{ при } U_1(t) \geq U_2(t) ; \\ U_2(t), \text{ при } U_1(t) < U_2(t) ; \end{cases}$$

$$\alpha \leq t < \alpha + \frac{T}{2};$$

$$U_H(t) = \begin{cases} |U_m \sin(\omega t)|, \text{ при } \beta - \frac{T}{2} \leq t < \alpha ; \\ U_m \sin(\omega\alpha) e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}, \text{ при } \alpha \leq t < \beta \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{\text{atg}(-\omega\tau) + \pi}{\omega}.$$

Рис. 5 показывает, что известная в литературе формула (1) справедлива лишь для $\tau < 0,02T$. Формула (2) справедлива для $\tau > 100T$. А для диапазона $0,02T \leq \tau \leq 100T$ аналитических зависимостей в литературе найти не удалось, а между тем именно в этом интервале работает большое количество схем.

В работе авторами выведена эмпирическая зависимость вида

$$y(x) = a \left(1 - \frac{b-1}{\sqrt[n]{(c \cdot x)^n + b^n}} \right),$$

график которой имеет вид S-образной кривой. При значении $x \rightarrow 0$ $y(x) \rightarrow \frac{a}{b}$; при значении $x \rightarrow \infty$ $y(x) \rightarrow a$. Для исследуемой кривой справедливо следующее:

$$U_H(0) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi};$$

$$U_H(\infty) = \sqrt{2},$$

поэтому для выбранной аппроксимирующей функции $a = \sqrt{2}$; $b = \frac{a}{U_H(0)} = \frac{\pi}{2}$. В результате получим следующую эмпирическую зависимость:

$$U_H\left(\frac{\tau}{T}\right) = \sqrt{2} \left(1 - \frac{\frac{\pi}{2} - 1}{\sqrt[n]{\left(c \frac{\tau}{T}\right)^n + \left(\frac{\pi}{2}\right)^n}} \right).$$

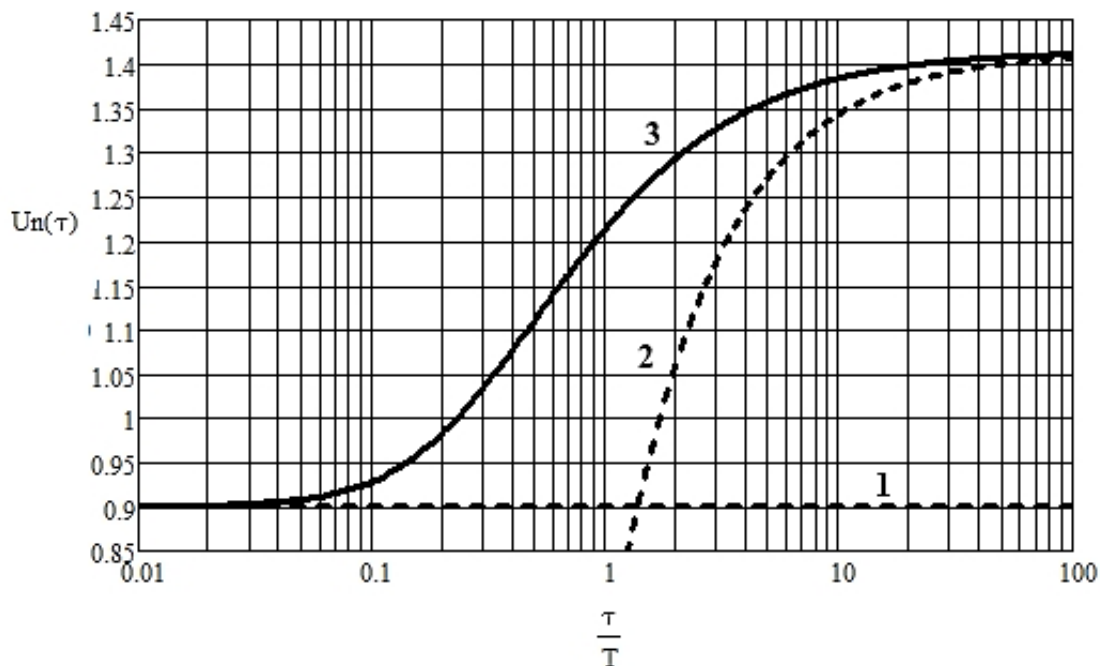


Рис. 5. Влияние постоянной времени RC-цепи нагрузки выпрямителя с C-фильтром на относительное напряжение нагрузки, рассчитанное по формулам:

1 – по формуле (1); 2 – по формуле (2); 3 – по формуле (3)

Коэффициенты « n » и « c » подберём методом последовательного приближения таким образом, чтобы максимизировать точность аппроксимации (коэффициент детерминации). В результате получена следующая зависимость (см. рис. 6) с точностью аппроксимации $R^2 = 0,99$:

$$U_H\left(\frac{\tau}{T}\right) = \sqrt{2} \left(1 - \frac{\frac{\pi}{2} - 1}{\sqrt[1,1]{\left(\sqrt{2} \frac{\tau}{T}\right)^{1,1} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1,1}}} \right). \quad (9)$$

Влияние постоянной времени нагрузки на коэффициент пульсаций продемонстрировано на рис. 7. Из рисунка видно, что формула (6) практически не может использоваться для расчёта коэффициента пульсаций; формулы (3), (5), (7), (8) могут применяться при $\tau > 10T$; формула (4) может использоваться во всём диапазоне τ , но её точность достаточно низкая – $R^2 = 0,62$.

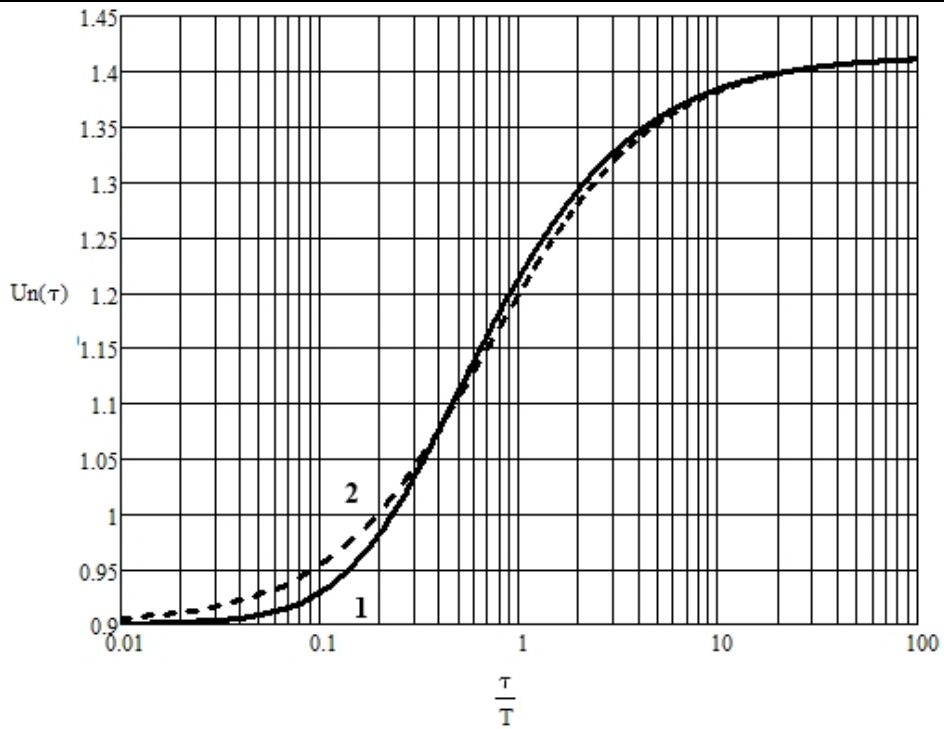


Рис. 6. Расчётная (1) и эмпирическая (2) зависимости напряжения нагрузки от постоянной времени RC-цепи

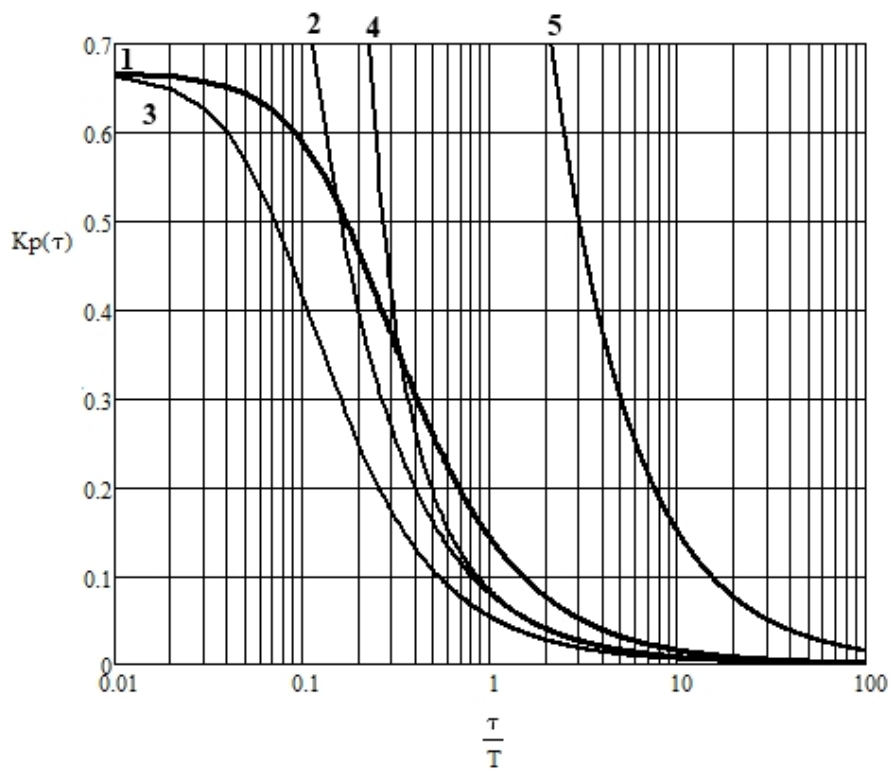


Рис. 7. Влияние постоянной времени цепи нагрузки на коэффициент пульсаций:
 1 – теоретический расчёт; 2 – по формулам (3), (7) и (8); 3 – по формуле (4);
 4 – по формуле (5); 5 – по формуле (6)

Для аппроксимации зависимости коэффициента пульсаций от параметров нагрузки была использована зависимость вида (4) с учётом следующего:

$$K_p(0) = \frac{2}{3};$$

$$K_p(\infty) = 0,$$

поэтому зависимость (4) модифицируется до следующего вида:

$$K_p\left(\frac{\tau}{T}\right) = \frac{\frac{2}{3}}{\sqrt[n]{\left(c \frac{\tau}{T}\right)^n + 1}}.$$

Коэффициенты «*n*» и «*c*» подберём методом последовательного приближения таким образом, чтобы максимизировать точность аппроксимации (коэффициент детерминации). В результате получена следующая зависимость (см. рис. 8) с точностью аппроксимации $R^2 = 0,999$:

$$K_p\left(\frac{\tau}{T}\right) = \frac{2}{3 \sqrt[1,85]{\left(4,6 \frac{\tau}{T}\right)^{1,85} + 1}} \quad (10)$$

Проверка результатов расчётов выполнялась в программе SimInTech. Результаты моделирования представлены на рис. 9-11. Из рисунков следует, что расчётные диаграммы, среднее напряжение и коэффициент пульсаций напряжения нагрузки соответствуют результатам моделирования, за исключением меньшего значения напряжения нагрузки на величину падения напряжения на диодах.

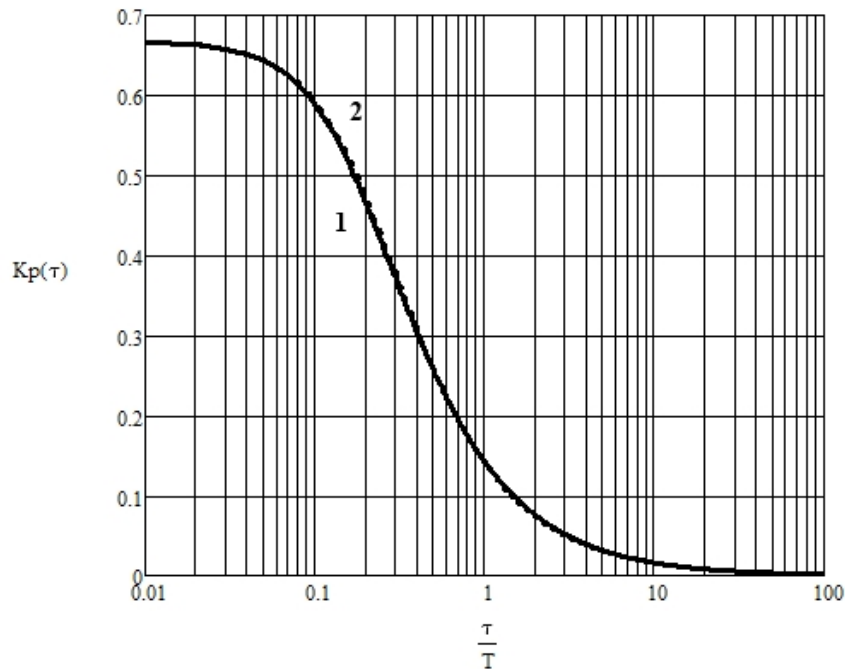


Рис. 8. Теоретически рассчитанная (1) и эмпирическая (2) зависимости коэффициента пульсаций от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром

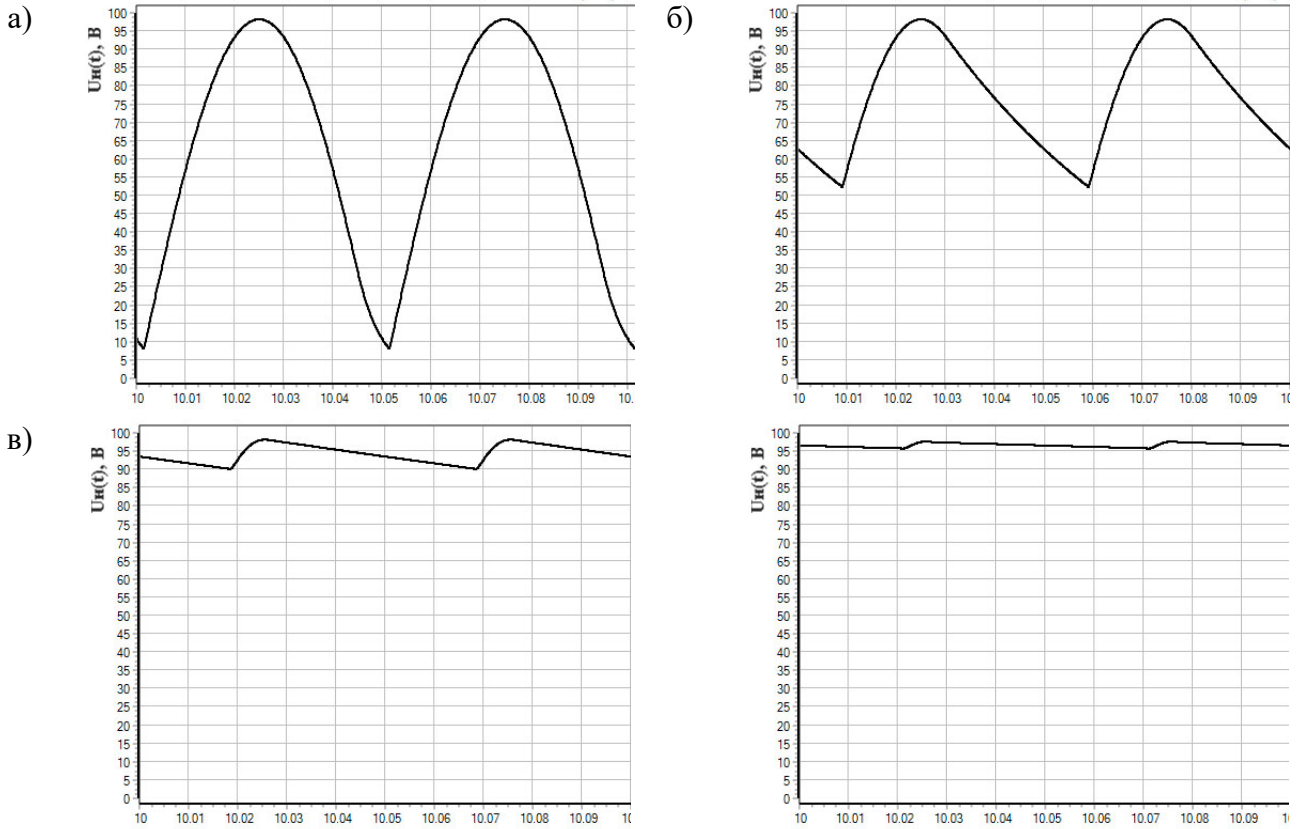


Рис. 9. Осциллограммы напряжений нагрузки при различных значениях постоянных времени цепи нагрузки: а – $\tau = 0,05T$; б – $\tau = 0,5T$; в – $\tau = 5T$; г – $\tau = 25T$

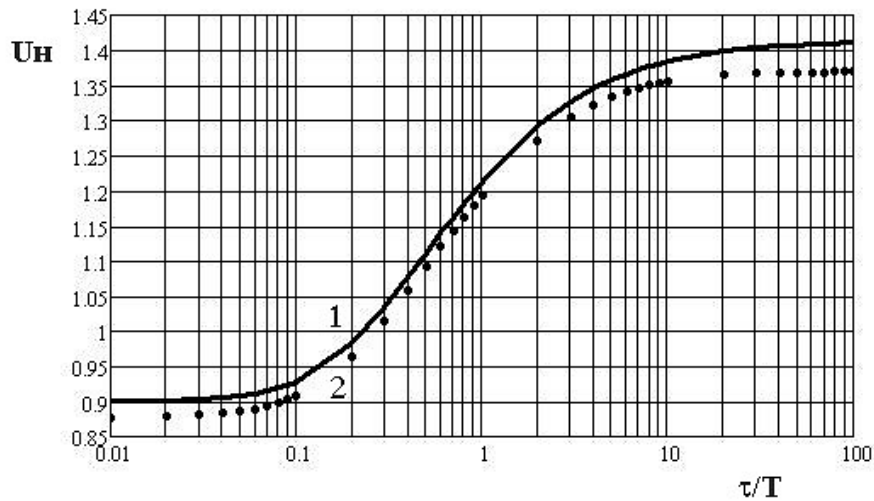


Рис. 10. Зависимость напряжения нагрузки от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром: 1 – полученная расчётным путём; 2 – полученная путём моделирования

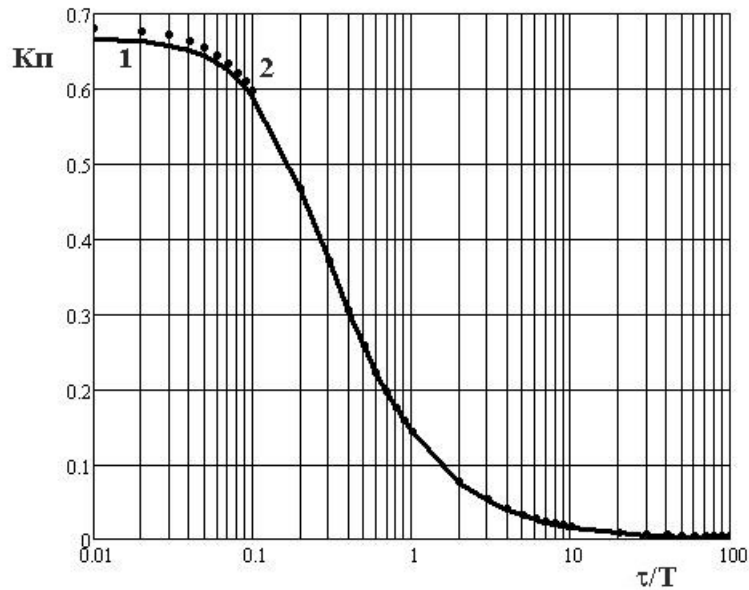


Рис. 11. Зависимость коэффициента пульсаций от постоянной времени цепи мостового выпрямителя с ёмкостным фильтром: 1 – полученная расчётным путём; 2 – полученная путём моделирования

Выводы:

1. Среднее напряжение нагрузки и коэффициент пульсаций напряжения нагрузки значительно зависят от ёмкости С-фильтра и сопротивления нагрузки мостового выпрямителя. Наибольшие изменения указанных показателей происходят в диапазоне $0,01T < \tau < 10T$.

2. Аналитический расчёт зависимостей среднего значения напряжения нагрузки и коэффициента пульсаций от ёмкости фильтра представляется сложной задачей. Приводимые в литературе эмпирические формулы указанных зависимостей имеют очень низкую точность аппроксимации и применимы лишь для условий работы схемы, близких либо к холостому ходу, либо к короткому замыканию. Это обуславливает непригодность существующих формул для расчёта значительного количества реальных выпрямителей с ёмкостным фильтром.

3. Получены эмпирические зависимости среднего напряжения нагрузки (9) и коэффициента пульсаций напряжения нагрузки (10) мостового выпрямителя от постоянной времени цепи с точностью аппроксимации не менее 0,99 при любых значениях постоянной времени цепи.

4. Использование в полученных формулах вместо постоянной времени цепи (τ) относительного значения этого параметра ($\frac{\tau}{T}$) позволяет применять формулы (9) и (10) для расчёта цепей с разной частотой сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Использование среды динамического моделирования технических систем SimInTech в задачах полунатурного моделирования / С. А. Ахрамович [и др.] // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов, Евпатория, 30 июня – 07 июля 2019 г. – Евпатория: Изд-во МАИ-Принт, 2019. – С. 71-73.
2. Белоусова, С. А. Исследование зависимости напряжения нагрузки выпрямителя от ёмкости сглаживающего фильтра в симуляторе SimInTech / С. А. Белоусова, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнаГУ», 2023. – С. 143-147.
3. Бладыко, Ю. В. Сглаживающие фильтры / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2010. – № 2. – С. 36-40.
4. Богданович, Б. Краткий радиотехнический справочник / Б. Богданович, Э. Ваксер. – Минск: Беларусь, 1968. – 560 с.

5. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горькавый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
6. Борисов, П. А. Расчёт и моделирование выпрямителей: учеб. пособие / П. А. Борисов, В. С. Томасов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2009. – 169 с.
7. Боцманов, А. В. Исследование в программе SimInTech влияния постоянной времени цепи нагрузки выпрямителя на минимальное значение выпрямленного напряжения / А. В. Боцманов, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 161-164.
8. Бурков, А. Т. Электроника и преобразовательная техника. Т. 2: Электронная преобразовательная техника: учеб. / А. Т. Бурков. – М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 307 с.
9. Воронцов, И. Н. Моделирование в SimInTech устройств силовой электроники / И. Н. Воронцов, И. С. Ситников // Материалы 76-й студенческой научной конференции, Брянск, 25 марта 2021 г. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. – С. 597-598.
10. Гейтенко, Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчёт / Е. Н. Гейтенко. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2016. – 448 с.
11. Егоров, В. А. Микроконтроллерная система управления автономным инвертором с упрощённой пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией / В. А. Егоров, Ю. Г. Егорова, Е. В. Плотников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 36-42.
12. Ефимов, И. П. Источники питания РЭА: учеб. пособие / И. П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 136 с.
13. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
14. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещённых энергетических устройствах / С. Н. Иванов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 37-44.
15. Климаш, В. С. Разработка конденсаторных установок и способа регулирования реактивной мощности в системах промышленного электроснабжения / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 7-14.
16. Коновалов, Б. И. Основы преобразовательной техники: учебно-методическое пособие / Б. И. Коновалов, В. С. Мишуров, В. Д. Семенов. – М.: ТУСУР, 2006. – 97 с.
17. Ллойд, П. Справочник по полупроводниковой электронике / П. Ллойд. – М.: Машиностроение, 1975. – 508 с.
18. Петров, А. Трансформаторы, выпрямители, фильтры / А. Петров // RadioRadar, 2024. – URL: https://www.radioradar.net/hand_book/documentation/tran.html#5 (дата обращения: 22.02.2024). – Текст: электронный. – Режим доступа: свободный.
19. Рогатова, Е. А. Зависимость коэффициента пульсаций напряжения выпрямителя от характера нагрузки / Е. А. Рогатова, А. В. Фролов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных. В 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 05-11 декабря 2022 г. / Редкол.: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 242-245.
20. Романов, В. П. Электропитание средств вычислительной техники: учебно-методический комплекс / В. П. Романов. – Новокузнецк: ФГОУ СПО «Кузнецкий индустриальный техникум», 2008. – 94 с.
21. Сажнев, А. М. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Сборник примеров и задач: учебное пособие / А. М. Сажнев, Л. Г. Рогулина. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012. – 267 с.
22. Сочелев, А. Ф. Математическая модель регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. Ф. Сочелев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1 (39). – С. 27-37.
23. Фролов, А. В. Исследование особенностей работы однополупериодного выпрямителя на ёмкостную нагрузку / А. В. Фролов, Н. Ю. Грунина // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 134-139.