

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЛС

С.В. ХВАТОВ, д-р техн. наук, В.В. ВАНЯЕВ, В.Ф. СТРЕЛКОВ, кандидаты техн. наук

Исследованы электромагнитные процессы в системе полупроводниковый преобразователь – емкостной накопитель – передающее устройство радиолокационной станции. Получены аналитические зависимости для определения токов и напряжений в системе. Определены качественные показатели преобразователя, влияющие на тактико-технические характеристики РЛС.

Ключевые слова: система питания, радиолокационная станция, передающее устройство, полупроводниковый преобразователь, электромагнитные процессы, математическая модель.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN POWER SUPPLY SYSTEM OF TRANSMISSION DEVICES OF RADAR STATIONS

S.V. KHVATOV, Doctor of Engineering, V.V. VANYAEV, V.F. STRELKOV, Candidates of Engineering

The authors investigate the electromagnetic processes in the following system: semiconductor converter-capacitive storage - transmission device of radar station (RS). The analytical dependences for current and voltage definition in system were received. The qualitative converter indicators influencing the tactical-technical characteristics of RS are defined.

Key words: power supply system, radar, transmission device, semiconductor converter, electromagnetic processes, mathematical model.

Совершенствование средств воздушного нападения привело к повышению требований к радиолокационным станциям (РЛС) воздушно-космической обороны по обнаружению низколетящих и высокоскоростных объектов [1]. Особую роль в РЛС играет передающее устройство (ПУ), в котором формируются периодические импульсы тока с заданными параметрами, определяющими, в конечном счете, параметры зондирующих импульсов антенны. В отличие от ПУ, построенных на базе СВЧ-вакуумных приборов и имеющих моноструктуру [2], в новом поколении РЛС с активной фазированной антенной решеткой ПУ реализуют на СВЧ-полупроводниковых приборах, в модульном исполнении. Каждый модуль ПУ с источником питания, выполненным на базе полупроводниковых преобразователей (П) [3, 4], расположен на решетке антенны РЛС и работает на индивидуальный диполь. Размеры антенны могут достигать нескольких десятков метров, а количество модулей нескольких десятков и даже сотен единиц. Это повышает значение массогабаритных показателей ПУ, его системы питания и делает актуальной задачу исследования электромагнитных процессов в ней в целях улучшения тактико-технических характеристик РЛС.

Система питания ПУ включает в себя П-емкостной накопитель (ЕН) – ПУ РЛС.

На рис. 1 приведена эквивалентная структурная схема системы питания ПУ РЛС, содержащая источник постоянного напряжения U_n и емкостной накопитель C . В состав ПУ входит ключевой элемент S_1 и резистор нагрузки R .

Диаграммы токов и напряжений, поясняющие работу цепи питания ПУ, представлены на рис. 2, где u_n – напряжение ЕН; i_n – выходной ток П; i_n – ток нагрузки.

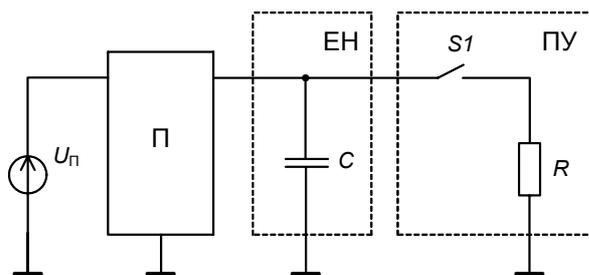


Рис. 1. Эквивалентная структурная схема цепи питания ПУ

Для упрощения анализа процессов в цепи питания ПУ приняты следующие допущения:

- эквивалентное активное сопротивление П равно нулю;
- активное сопротивление конденсаторов ЕН отлично от нуля;
- пульсации токов в контурах, обусловленные работой П, отсутствуют;
- контуры стабилизации выходного напряжения и тока безынерционные и астатичные;
- величина энергии, накапливаемой в реактивных элементах П, равна нулю.

На рис. 3 приведены общая эквивалентная схема системы питания ПУ (рис. 3,а) и эквивалентные схемы на интервалах непрерывности (рис. 3,б,в,г), в которых П на различных интервалах (стадиях) работы (в зависимости от состояния ключей S_1 – S_3) представлен либо источником тока I , либо источником напряжения U_0 . ЕН на схемах представлен конденсатором C с последовательным резистором r , характеризующим его внутреннее сопротивление.

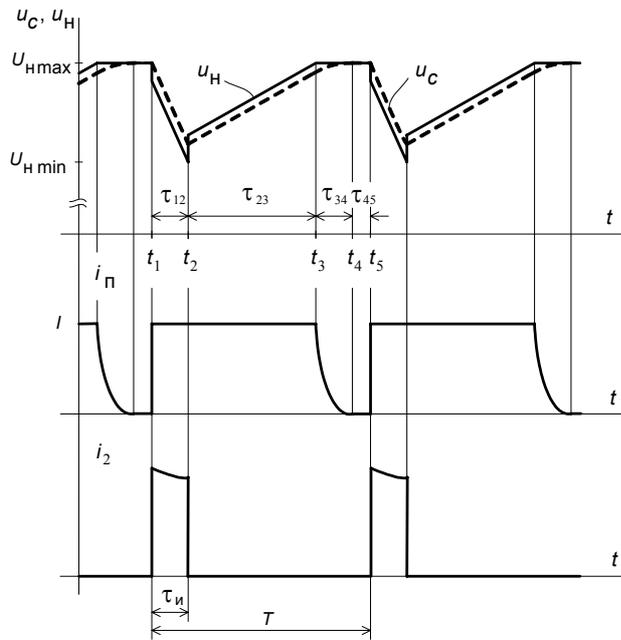


Рис. 2. Диаграммы токов и напряжений в цепи питания ПУ

Для работы П характерны следующие интервалы:

- токовой отсечки – при формировании импульса ПУ и заряде ЕН;
- стабилизации напряжения – при токе заряда меньше тока отсечки;
- холостого хода – при токе заряда, равном нулю.

Рассмотрим процессы на указанных интервалах.

На интервале $t_1 - t_2$ токовой отсечки (рис. 2) ключевые элементы S_1, S_2 замкнуты, а S_3 разомкнут. Происходит формирование импульса тока в нагрузке.

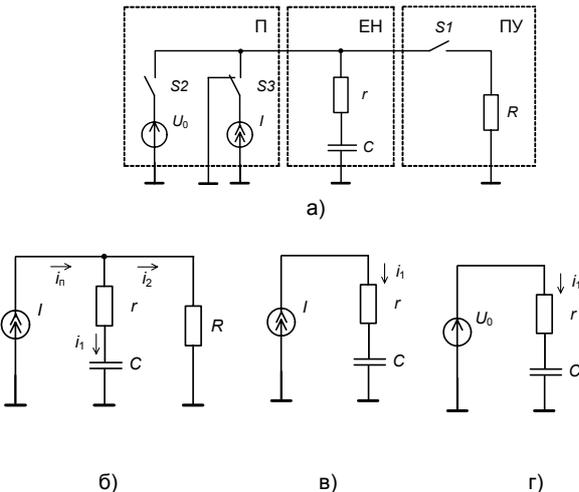


Рис. 3. Общая эквивалентная схема (а) цепи питания ПУ и эквивалентные схемы (б, в, г) на интервалах непрерывности

Схема замещения, соответствующая рассматриваемой части этого интервала (рис. 3,б), описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} rC \frac{du_C}{dt} + u_C &= Ri_2, \\ i_1 &= C \frac{du_C}{dt}, \\ i_1 + i_2 &= i_P = I, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где u_C, i_1 – напряжение и ток конденсатора C соответственно; i_P, i_2 – выходной ток П и ток, потребляемый ПУ, соответственно; I – величина тока отсечки.

Решение системы уравнений (1) в операторной форме имеет вид

$$U(p) = \frac{RI}{(R+r)Cp \left[p + \frac{1}{(R+r)C} \right]} + \frac{U_0}{p + \frac{1}{(R+r)C}}, \quad (2)$$

где $U(p)$ – изображение напряжения u_C ; p – оператор преобразования Лапласа.

Переходя к оригиналам, получаем

$$u_C = U_0 \left[I^* + (1 - I^*) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right], \quad (3)$$

где $I^* = \frac{RI}{U_0}$ – относительное значение тока отсечки; $\tau_1 = (R+r)C$ – постоянная времени цепи питания ПУ на интервале $\tau_{12} = t_2 - t_1$.

Подставляя (3) в уравнения системы (1), получаем выражения токов i_1, i_2 и напряжения u_H ЕН:

$$i_1 = \frac{U_0}{R+r} (I^* - 1) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \quad (4)$$

$$i_2 = I + \frac{U_0}{R+r} (1 - I^*) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}}; \quad (5)$$

$$u_H = U_0 \left(I^* + \frac{1 - I^*}{1 + r^*} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right), \quad (6)$$

где $r^* = \frac{r}{R}$ – относительное значение активного сопротивления ЕН.

Напряжение нагрузки U_H^{\max} в начале и U_H^{\min} в конце формирования импульса, относительное снижение его ΔU_H^* , а также конечное напряжение конденсатора C , согласно выражениям (3) и (6), будут иметь значения, определяемые по формулам:

$$U_H^{\max} = U_0 \left(\frac{1 + r^* I^*}{1 + r^*} \right); \quad (7)$$

$$U_H^{\min} = U_0 \left(I^* + \frac{1 - I^*}{1 + r^*} \cdot e^{-\frac{\tau_{12}}{\tau_1}} \right); \quad (8)$$

$$\Delta U_H^* = 1 - \frac{U_H^{\min}}{U_H^{\max}} = \frac{1 - I^*}{1 + r^* I^*} \left(1 - e^{-\frac{\tau_{12}}{\tau_1}} \right); \quad (9)$$

$$U_c^{\min} = U_0 \left[I^* + (1 - I^*) \cdot e^{-\tau_{и}^*} \right], \quad (10)$$

где $\tau_{и} = \tau_{12}$, $\tau_{и}^* = \frac{\tau_{и}}{\tau_1}$ – абсолютная и относительная длительности импульса соответственно.

Выражение (9) можно также представить в виде

$$\Delta U_{н}^* = \frac{1 - I^*}{1 + r^* I^*} \left(1 - e^{-\frac{1}{q \tau_1^*}} \right), \quad (11)$$

где $\tau_1^* = \frac{\tau_1}{T}$ – относительное значение постоянной времени цепи питания ПУ на интервале $\tau_{и}$;

T , $q = \frac{T}{\tau_{и}}$ – период следования и скважность выходных импульсов ПУ соответственно.

Наибольшее снижение напряжения ЕН на интервале токовой отсечки относительно его начального стабилизируемого значения U_0 рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{н}^{* \max} = 1 - \frac{U_{н}^{\min}}{U_0} = (1 - I^*) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + r^*} e^{-\tau_{и}^*} \right). \quad (12)$$

При выполнении соотношения $R \gg r$ выражение (12) идентично (9).

На интервале $t_2 - t_3$ токовой отсечки ключевые элементы S_1 , S_2 разомкнуты, а S_3 замкнут (рис. 3,в), происходит заряд ЕН постоянным током I .

Напряжение на ЕН определяется по формуле

$$u_{н} = U_c^{\min} + \left(r + \frac{t}{C} \right) I. \quad (13)$$

Интервал токовой отсечки заканчивается при достижении напряжением ЕН и конденсатора C значений соответственно

$$u_{н} = U_0, \quad (14)$$

$$u_c = U_0 - rI, \quad (15)$$

когда вступает в действие отрицательная обратная связь по напряжению ЕН.

Длительность интервала $\tau_{23} = t_3 - t_2$, в соответствии с (13) и (14), будет определяться как

$$\tau_{23} = \frac{C(U_0 - U_c^{\min} - rI)}{I}, \quad (16)$$

или с учетом (10) в относительных единицах

$$\tau_{23}^* = \frac{\tau_{23}}{\tau_1} = \frac{(1 - I^*) \cdot \left(1 - e^{-\tau_{и}^*} \right) - r^* I^*}{I^* (1 + r^*)}. \quad (17)$$

На интервале $t_3 - t_4$ (рис. 2) продолжается заряд ЕН током, меньшим тока отсечки. П начинает работать в режиме стабилизации выходного напряжения, при этом ключевые элементы S_1 , S_3 разомкнуты, а S_2 замкнут (рис. 3,г).

Процессы на интервале с учетом принятых допущений описываются уравнениями

$$\left. \begin{aligned} rC \frac{du_c}{dt} + u_c &= U_0, \\ u_{н} &= U_0, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

решая которые определяем временные зависимости напряжения конденсатора C , а также тока и напряжения ЕН:

$$u_c = U_0 - rI \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}; \quad (19)$$

$$i_1 = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (20)$$

где $\tau_2 = rC$ – постоянная времени цепи питания ПУ на интервале τ_{34} .

Процесс зарядки заканчивается в момент времени t_4 , когда напряжение конденсатора C достигает значения U_0 . Длительность интервала $\tau_{34} = t_4 - t_3$ в соответствии с (19) составляет

$$\tau_{34} \approx (3 \div 4) \tau_2. \quad (21)$$

На интервале $t_4 - t_5$ протекающий незначительный ток подзарядки компенсирует снижение напряжения ЕН за счет токов утечки. Интервал $\tau_{45} = t_5 - t_4$ заканчивается в момент времени t_5 с началом формирования очередного импульса в нагрузке. Далее процессы повторяются.

Длительность интервала τ_{23} токовой отсечки при $\tau_{45} \geq 0$ можно определить из формулы

$$\tau_{23} \leq (q - 1) \tau_{и} - \tau_{34}. \quad (22)$$

Из условия (22) с учетом (17), (21) можно найти выражение для определения наименьшего относительного значения длительности формируемого импульса:

$$\tau_{и}^* = \frac{\Delta U_{н}^* / I^* + 3r^*}{q - 1}. \quad (23)$$

Временные диаграммы мгновенных значений токов в цепях питания ПУ и напряжения ЕН при различных соотношениях параметров, полученные на имитационной модели, представлены на рис. 4–6 (U_R – напряжение на нагрузке). На диаграммах наблюдаются явно выраженные рассмотренные выше временные интервалы, длительность которых при постоянных величинах сопротивления нагрузки R , тока I , периода следования выходных импульсов T и относительного снижения $\Delta U_{н}^*$ напряжения ЕН определяется их скважностью q .

Анализ диаграмм показывает, что при этих условиях увеличение q ведет к сокращению длительности интервала токовой отсечки и увеличению бестоковой паузы (рис. 4). Это объясняется не только уменьшением длительности формируемого импульса тока в нагрузке, но и снижением в соответствии с выражением (9) требуемой величины емкости ЕН для формирования выходных импульсов меньшей длительности и времени ее зарядки. При уменьшении q наблюдается противоположная тенденция (рис. 5). Рост длительности бестоковой паузы происходит также при увеличении тока отсечки I за счет уменьшения времени зарядки ЕН (рис. 6).

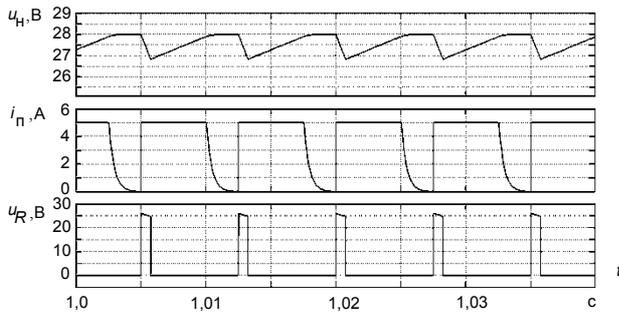


Рис. 4. Диаграммы токов и напряжений в цепи питания ПУ ($q = 10$; $I = 5$ А; $R = 0,7$ Ом; $C = 20$ мФ; $r = 20$ мОм)

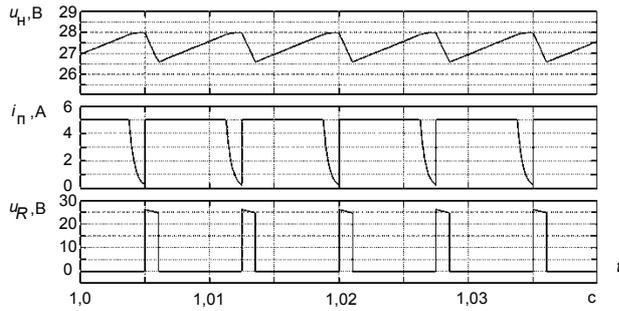


Рис. 5. Диаграммы токов и напряжений в цепи питания ПУ ($q = 7$; $I = 5$ А; $R = 0,7$ Ом; $C = 20$ мФ; $r = 20$ мОм)

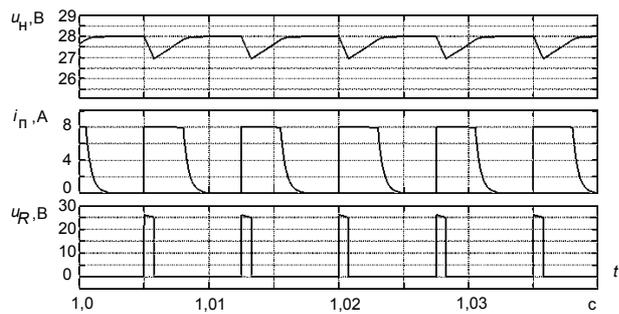


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений в цепи питания ПУ ($q = 10$; $I = 8$ А; $R = 0,7$ Ом; $C = 20$ мФ; $r = 20$ мОм)

На рис. 7 приведены зависимости минимальной относительной длительности импульса $\tau_{и}^*$, соответствующей нулевой длительности интервала τ_{45} холостого хода, от скажности q при различных токах отсечки I^* .

Анализ кривых (рис. 7) показывает, что при одном и том же значении тока отсечки I^* относительная длительность формируемых импульсов $\tau_{и}^*$ находится, практически, в обратной зависимости от их скажности. При одной и той же скажности q относительная длительность $\tau_{и}^*$ уменьшается при увеличении тока отсечки I^* . Это объясняется тем, что при увеличении тока I^* сокращается длительность интервала токовой отсечки τ_{23} , что при неизменной длительности интервала τ_{34} и скажности q ведет к относительному уменьшению длительности импульса. Так, при изменении I^* от $I^* = 0,1$ до $I^* = 0,4$ и значениях $q = 2-10$ длительность $\tau_{и}^*$ уменьшается в 2,8–3 раза.

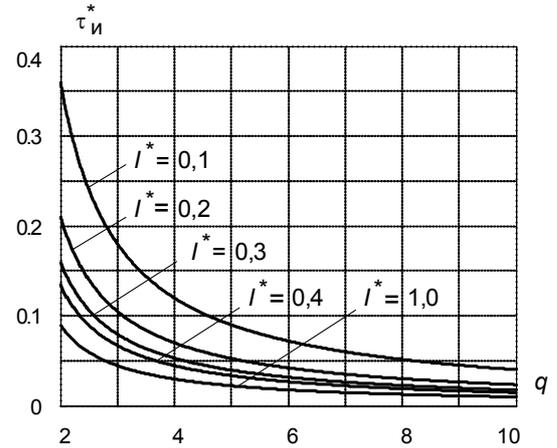


Рис. 7. Зависимости относительной длительности импульса от скажности при различных токах отсечки ($\Delta U_n^* = 0,03$; $r^* = 0,02$)

Степень влияния нагрузок с неравномерным характером потребляемой мощности на первичный источник питания оценивают коэффициентом использования первичного источника $k_{и}$, определяемым по формуле

$$k_{и} = \frac{P_{1cp}}{P_{1max}} \quad (24)$$

Если пренебречь потерями в преобразователе и незначительным изменением напряжения ЕН на различных рабочих интервалах, то кривые зависимости мощности, передаваемой в нагрузку, и гладкие составляющие мощности и тока, потребляемых П, будут повторять кривую выходного тока $i_{п}$.

Импульсный характер тока $i_{п}$ ведет также к увеличению его коэффициента формы $k_{ф}$, определяемого по формуле

$$k_{ф} = \frac{I_{пд}}{I_{пср}} \quad (25)$$

где $I_{пд}$, $I_{пср}$ – действующее и среднее на периоде T значение тока $i_{п}$ соответственно. При этом возрастает также расчетная мощность тех электромагнитных элементов, токи которых повторяют форму $i_{п}$.

Значения $I_{пср}$ и $I_{пд}$ могут быть определены по следующим формулам:

$$I_{пср} = I \cdot \left(\frac{\tau_{23} + \tau_{и}}{T} \right), \quad (26)$$

$$I_{пд} = I \sqrt{\frac{\tau_{23} + \tau_{и}}{T}}. \quad (27)$$

Подставляя (26) и (27) в (24) и (25), с учетом выражения (17) получаем

$$k_{и} = 1 - \frac{1}{q \tau_{и}^*} \cdot \frac{4r^*}{1+r^*}, \quad (28)$$

$$k_{ф} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{q \tau_{и}^*} \cdot \frac{4r^*}{1+r^*}}}. \quad (29)$$

Выражения (26)–(29) получены при условии равенства нулю длительности интервала паузы $\tau_{45} = 0$.

Графики зависимостей коэффициента использования первичного источника $k_{и}$ и коэффициента формы $k_{ф}$ потребляемого тока от скажности при различных токах отсечки представлены на рис. 8, а, б, соответственно.

Анализ приведенных кривых (рис. 8) показывает, что при малых величинах I^* и r^* коэффициенты $k_{и}$ и $k_{ф}$ близки по величине к единице. При изменении I^* в пределах $I^* = 0,1$ – $0,4$ относительная длительность τ_{23}^* интервала токовой отсечки уменьшается, что приводит к уменьшению на 25–65 % величины $k_{и}$ и увеличению на 15–30 % величины $k_{ф}$. С ростом q при тех же значениях I^* также происходит снижение $k_{и}$ на 12–45 % и повышение $k_{ф}$ на 6–20 %.

При выборе параметров и режимов работы элементов цепи питания ПУ следует иметь в виду следующее.

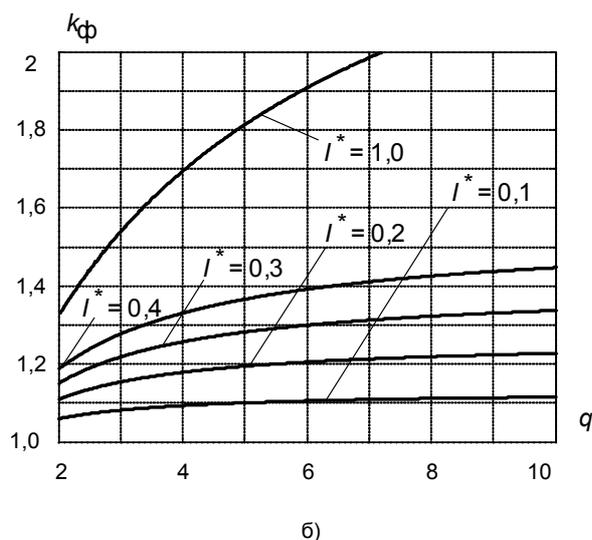
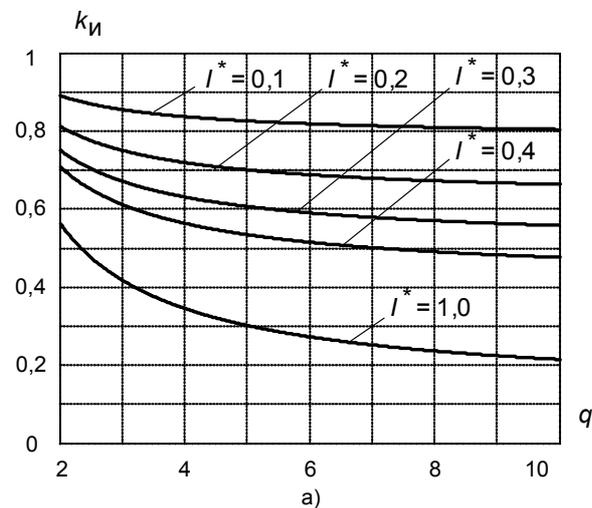


Рис. 8. Зависимости коэффициента использования первичного источника $k_{и}$ (а) и коэффициента формы тока $k_{ф}$ (б) от скажности при различных токах отсечки ($\Delta U_{н}^* = 0,03$; $r^* = 0,02$; $\tau_{45} = 0$)

При работе ПУ с переменной частотой следования выходных импульсов необходим интервал холостого хода, что соответствует зарядке ЕН до напряжения заданного уровня. В противном случае возможна неполная его зарядка и возникновение амплитудной модуляции формируемых импульсов, что ухудшает важнейшую тактическую характеристику РЛС – точность определения дальности объектов наблюдения. По этой причине приведенные зависимости $k_{и}$ и $k_{ф}$ (рис. 8) следует рассматривать как предельные максимальное и минимальное значения этих величин.

Увеличение $k_{ф}$, емкости ЕН приводит к увеличению массы и габаритов системы питания и ухудшает технические характеристики РЛС.

Снижение величины емкости ЕН и сопутствующее увеличение $\Delta U_{н}^*$ вызывают появление паразитной фазовой модуляции СВЧ-импульса приемопередающего тракта и ухудшают селекцию объектов наблюдения, движущихся на малой высоте.

Заключение

Предложенная математическая модель системы питания ПУ РЛС позволила выявить основные закономерности протекающих в ней процессов, с учетом режимов работы ПУ и параметров ее элементов.

Полученные аналитические соотношения дают возможность выполнять обоснованный выбор параметров и режимов работы элементов цепи питания ПУ с учетом заданных тактико-технических характеристик РЛС и являются основой инженерной методики расчета и проектирования таких систем.

Результаты проведенных исследований использованы при разработке источников питания ПУ, выполненных на базе П, с выходным напряжением 28–50 В, мощностью 0,1–2 кВт и рабочими частотами 30–200 кГц.

Список литературы

1. Кириенко В.П., Копелович Е.А., Стрелков В.Ф. Преобразовательные устройства для систем электропитания импульсных нагрузок // Мат-лы Всемирн. электротехн. конгресса по электротехнике. ВЭЛК-2005. – М., 2005. – С. 110–111.
2. Кириенко В.П., Стрелков В.Ф. Регулятор напряжения импульсного источника электропитания радиолокационной станции // Электротехника. – 2005. – № 7. – С. 49–54.
3. Двухтактный преобразователь с импульсной нагрузкой: пат. на полезную модель 47146 Рос. Федерация: Н 02 М 3/325, 3/337, H02P 7/29 / Кириенко В.П., Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В., Ваняев В.В.; заявитель и патентообладатель НГТУ им. Р.Е.Алексеева – №2010119117/07; заявл. 12.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31.
4. Математическое моделирование источника питания передающего устройства РЛС / В.В. Ваняев, С.В. Хватов, В.Ф. Стрелков, Л.В. Тетенькин // Актуальные проблемы электроэнергетики / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2009. – Т. 77. – С. 15–20.

Ваняев Валерий Владимирович,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон 8-960-18-99-352,
e-mail: epa@nntu.nnov.ru

Стрелков Владимир Федорович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
телефон 8-910-13-62-770,
e-mail: strelkov.428@mail.ru

Хватов Станислав Вячеславович,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон 8-(831)-4-360-369,
e-mail: epa@nntu.nnov.ru