

ристиками, предложена программа летной отработки перспективных элементов СЭП.

Библиографический список

1. Структурная схема и схемотехнические решения комплексов автоматики и стабилизации СЭП негерметичного геостационарного КА с гальванической развязкой бортовой аппаратуры от солнечных и аккумуляторных батарей / С. А. Поляков, А. И. Чернышев, В. О. Эльман,

В. С. Кудряшов; НПЦ «Полнос» ; НПО ПМ им. ак. М. Ф. Решетнева. Железногорск, 2001.

2. Birchenough, G. The series connected buck boost regulator for high efficiency DC voltage regulation / G. Birchenough ; NASA. Glenn Research Center Cleveland, 2003.

3. Сайт The Saft Group [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.saftbatteries.com/>. Загл. с экрана.

4. Интернет-магазин «Икс-моделс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://xmodels.ru/catalog/>. Загл. с экрана.

P. I. Melnikov, R. V. Kozlov, V. S. Kudryashov

POWER SUPPLY SYSTEM OF SMALL SATELLITE «STUDENT»

Interpretation results in designing power supply system of small satellite «Student» are expounded.

Keywords: power supply system, extreme regulation of power, bridge inverter, Li-ion battery, concentrators.

© Мельников П. И., Козлов Р. В., Кудряшов В. С., 2009

УДК 621.375.54

А. М. Михеенко, С. С. Абрамов, И. И. Резван

К АНАЛИЗУ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Выполнен обобщенный анализ ключевого генератора высокой частоты, который позволяет оценить энергетические показатели генератора в широком диапазоне частот и параметров схемы.

Ключевые слова: бортовые устройства радиосвязи, генераторы класса «Д», энергетическая эффективность генератора.

В условиях освоения космических программ остро встает проблема обеспечения энергоресурсами автономных объектов, предназначенных для длительного пребывания на орбите или в межпланетном пространстве. Одним из путей обеспечения длительной работоспособности космических объектов является повышение энергетической эффективности основных потребителей бортовых электронных систем. В частности, это относится к мощным генераторным устройствам средств радиосвязи.

В мощных радиоустройствах достаточно широко использовался «бигармонический режим» генератора. С появлением мощной твердотельной электроники применение нашли двухтактные схемы последовательных резонансных инверторов (генераторы класса «Д») [1].

Возможность повышения КПД и мощности была обнаружена при работе генератора на расстроенную нагрузку еще в 1960-е гг. Е. П. Хмельницким [2]. Генераторы аналогичного типа в зарубежной литературе получили условное название «генератор класса Е», а в отечественной – «ключевой генератор с формирующим контуром» [3]. Несмотря на то что генераторы класса «Е» обеспечивают высокий КПД на предельных для ключевого режима час-

тотах, в силу ряда причин их применение ограничивается пока стадией эксперимента. Цель настоящей работы – провести анализ энергетической эффективности генератора с формирующим контуром в самом общем виде, в широком диапазоне частот и параметров схемы.

Анализ схемы генератора. Упрощенная схема исследуемого генератора представлена на рис. 1.

Полагая, что отпирание и запираание активного элемента (АЭ) полностью определяется управляющим напряжением U_y , представим исследуемый генератор двумя эквивалентными схемами, отражающими процессы в генераторе при открытом и закрытом состоянии АЭ, где $u_k = U_k \sin(\tau + \varphi)$; $\tau = \omega t$; 2θ – угол, соответствующий времени, в течение которого АЭ находится в открытом состоянии; i_{L1}, i_L – токи во внешней цепи генератора, для соответствующих эквивалентных схем.

Дифференциальные уравнения для эквивалентных схем принимают вид

$$\frac{d^2 i_L}{d\tau^2} + \frac{1}{r\omega C} \frac{di_L}{d\tau} + v^2 i_L = \frac{v^2 E}{r} - u_k \left(\frac{v^2 \sin(\tau + \varphi)}{r} + \frac{\cos(\tau + \varphi)}{\omega L} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d^2 i_{L1}}{d\tau^2} + v^2 i_{L1} = -\frac{u_k}{\omega L} \cos(\tau + \varphi). \quad (2)$$

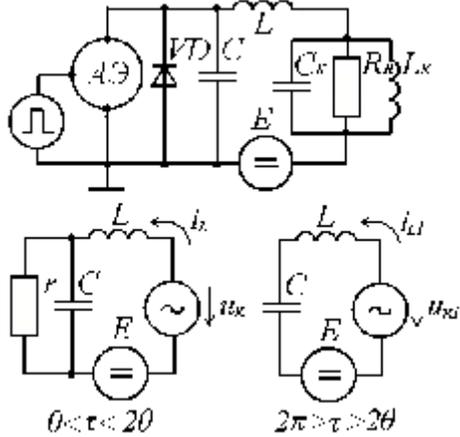


Рис. 1. Схема генератора: АЭ – активный элемент (транзистор, лампа), работающий в режиме «ключа»; VD – диод, обеспечивающий рекуперацию энергии реактивных элементов при «разомкнутом ключе»; L, C – элементы контура, определяющие форму напряжения на АЭ; L_к, C_к – нагрузочный контур, настроенный на частоту управляющего напряжения

Решение этих уравнений может быть записано в следующем виде:

$$i = \sigma + \xi \varepsilon_1 \cos(\tau + \varphi) - \xi \varepsilon_2 \sin(\tau + \varphi) + I_{11} e^{p_1 \tau} + I_{12} e^{p_2 \tau} \dots, \quad (3)$$

$$i_1 = I_{21} \cos v(\tau - 2\theta) + I_{22} \sin v(\tau - 2\theta) - \frac{1}{v^2 - 1} \xi \cos(\tau + \varphi), \quad (4)$$

$$U = -\xi \varepsilon_1 \sin(\tau + \varphi) - \xi \varepsilon_2 \cos(\tau + \varphi) + p_1 I_{11} e^{p_1 \tau} + p_2 I_{12} e^{p_2 \tau}, \quad (5)$$

$$U_1 = v I_{22} \cos v(\tau - 2\theta) - v I_{21} \sin v(\tau - 2\theta) + \frac{1}{v^2 - 1} \xi \sin(\tau + \varphi), \quad (6)$$

где $i = i_L \frac{\omega L}{E}$, $i_1 = i_{L1} \frac{\omega L}{E}$, $u = \frac{L}{E} \frac{di_L}{d\tau}$, $u_1 = \frac{L}{E} \frac{di_{L1}}{d\tau}$;

$p_1 = -\frac{1}{\omega r C}$, $p_2 = -\frac{1}{\sigma}$ – корни характеристического уравнения (1); $v^2 = \frac{1}{\omega^2 LC}$, $\sigma = \frac{\omega L}{r}$, $\xi = \frac{U_k}{E}$,

$\varepsilon_1 = \frac{p_1^2 - (v^2 - 1)}{p_1 + (v^2 - 1)^2}$, $\varepsilon_2 = \frac{\sigma v^4}{p_1^2 + (v^2 - 1)^2}$; I_{11} ; I_{12} ; I_{21} ; I_{22} – постоянные интегрирования.

Полагая режим генератора установившимся, определим постоянные интегрирования, используя принцип непрерывности тока в индуктивности и напряжении на емкости контура LC:

$$i(0) = i_1(2\pi); \quad i(2\theta) = i_1(2\theta), \quad (7)$$

$$u_c = u_{c1}(2\pi); \quad u_c(2\theta) = u_{c1}(2\theta), \quad (8)$$

где

$$u_c = E - u_k - u_L. \quad (9)$$

На основании формул (3)–(6) при условиях (7)–(9) получим

$$\begin{aligned} I_{11} &= A_1 + \xi(B_{11} \sin \varphi + B_{12} \cos \varphi); \\ I_{12} &= A_2 + \xi(B_{21} \sin \varphi + B_{22} \cos \varphi); \\ I_{21} &= A_3 + \xi(B_{31} \sin \varphi + B_{32} \cos \varphi); \\ I_{22} &= A_4 + \xi(B_{41} \sin \varphi + B_{42} \cos \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{11} = \frac{a_2 b_{41} - a_{41} b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{22} = \frac{a_{42} b_1 - a_1 b_{42}}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$A_2 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{12} = \frac{a_2 b_{42} - a_{42} b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad B_{21} = \frac{a_{41} b_1 - a_1 b_{41}}{a_1 b_2 - a_2 b_1};$$

$$a_1 = 1 - e^{2p_1 \theta} \cdot \cos 2v(\pi - \theta) - \frac{p_1}{v} e^{2p_1 \theta} \sin 2v(\pi - \theta);$$

$$a_2 = 1 - e^{2p_2 \theta} \cdot \cos 2v(\pi - \theta) - \frac{p_2}{v} e^{2p_2 \theta} \sin 2v(\pi - \theta);$$

$$a_3 = \sigma[1 - \cos 2v(\pi - \theta)];$$

$$a_{41} = -\varepsilon_2 + q_1 \cdot \cos 2v(\pi - \theta) + \frac{1}{v} q_2 \cdot \sin 2v(\pi - \theta);$$

$$a_{42} = \varepsilon_2 - q_2 \cdot \cos 2v(\pi - \theta) + \frac{1}{v} q_1 \cdot \sin 2v(\pi - \theta);$$

$$b_1 = -p_1[1 - e^{2p_1 \theta} \cdot \cos 2v(\pi - \theta) + \frac{p_2}{v} e^{2p_1 \theta} \cdot \sin 2v(\pi - \theta)];$$

$$b_2 = -p_2[1 - e^{2p_2 \theta} \cdot \cos 2v(\pi - \theta) + \frac{p_1}{v} e^{2p_2 \theta} \cdot \sin 2v(\pi - \theta)];$$

$$b_3 = -\frac{p_1}{v} \sin 2v(\pi - \theta); \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_1 + \frac{1}{v^2 - 1};$$

$$b_{41} = \varepsilon_2 - q_1 \cdot \cos 2v(\pi - \theta) + v q_2 \cdot \sin 2v(\pi - \theta);$$

$$A_3 = \sigma + A_1 e^{2p_1 \theta} + A_2 e^{2p_2 \theta}; \quad A_4 = \frac{p_1}{v} A_1 e^{2p_1 \theta} + \frac{p_2}{v} A_2 e^{2p_2 \theta};$$

$$B_{31} = B_{11} e^{2p_1 \theta} + B_{21} e^{2p_2 \theta} - q_1; \quad q_1 = (\varepsilon_3 \sin 2\theta + \varepsilon_2 \cos 2\theta);$$

$$B_{32} = B_{12} e^{2p_1 \theta} + B_{22} e^{2p_2 \theta} - q_2; \quad q_2 = (\varepsilon_3 \cos 2\theta - \varepsilon_2 \sin 2\theta);$$

$$B_{41} = \frac{1}{v} (p_1 B_{11} e^{2p_1 \theta} + p_2 B_{21} e^{2p_2 \theta} - q_2);$$

$$B_{42} = \frac{1}{v} (p_1 B_{12} e^{2p_1 \theta} + p_2 B_{22} e^{2p_2 \theta} - q_1).$$

Подставляя значения постоянных интегрирования формулы (10) в уравнения (3)–(6), получим описание тока и напряжения на индуктивности в установившемся режиме генератора.

Энергетические показатели генератора. Для определения энергетических показателей генератора необходимо определить ток первой гармоники в нагрузке и ток, потребляемый от источника питания:

$$I_1 = \sqrt{I_{1s}^2 + I_{1c}^2} = \frac{I_{1s}}{\cos \varphi} = \frac{I_{1c}}{\sin \varphi}, \quad (11)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{1c}}{I_{1s}}$,

$$\begin{aligned} I_{1s} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\theta} i_L \sin \tau \, d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{2\theta}^{2\pi} i_{L1} \sin \tau \, d\tau = \\ &= \frac{E}{\pi \omega L} \left(\int_0^{2\theta} i \sin \tau \, d\tau + \int_{2\theta}^{2\pi} i_1 \sin \tau \, d\tau \right) = \\ &= \frac{E}{\pi \omega L} [A_5 + \xi(B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$I_{1c} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\theta} i_L \cos \tau \, d\tau + \frac{1}{\pi} \int_{2\theta}^{2\pi} i_{L1} \cos \tau \, d\tau = \quad (13)$$

$$= \frac{E}{\pi \omega L} [A_6 + \xi(B_{61} \sin \varphi + B_{62} \cos \varphi)].$$

При этом параметры $A_5, A_6, B_{51}, B_{52}, B_{61}, B_{62}$ определяются следующими выражениями:

$$A_5 = \frac{1}{\pi} [\sigma(1 - \cos 2\theta) + \frac{A_4}{1 + p_1^2} d_{12} + \frac{1}{v^2 - 1} (A_3 d_{13} + A_4 d_{14})],$$

$$B_{51} = \frac{1}{v^2 - 1} + \frac{1}{\pi} [\varepsilon_3 (\frac{\sin 4\theta}{4} - \theta) + \varepsilon_2 (\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4}) + \frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{11} + \frac{B_{21}}{1 + p_2^2} d_{12} + \frac{1}{v^2 - 1} (B_{31} d_{13} + B_{41} d_{14})],$$

$$B_{52} = \frac{1}{\pi} [\varepsilon_2 (\frac{\sin 4\theta}{4} - \theta) - \varepsilon_3 (\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4}) + \frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{11} + \frac{B_{22}}{1 + p_2^2} d_{12} + \frac{1}{v^2 - 1} (B_{32} d_{13} + B_{42} d_{14})],$$

где $d_{11} = 1 - e^{-2p_1\theta} (\cos 2\theta - p_1 \sin 2\theta)$; $d_{12} = 1 - e^{-2p_2\theta} (\cos 2\theta - p_2 \sin 2\theta)$;
 $d_{13} = \cos 2\nu(\pi - \theta) - \cos 2\theta$; $d_{14} = \sin 2\nu(\pi - \theta) + \nu \sin 2\theta$;

$$A_6 = \frac{1}{\pi} [\sigma \sin 2\theta + \frac{A_4}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{A_2}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{v^2 - 1} (A_3 d_{23} + A_4 d_{24})],$$

$$B_{61} = \frac{1}{\pi} [\varepsilon_3 (\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4}) - \varepsilon_2 (\frac{\sin 4\theta}{4} + \theta) + \frac{B_{11}}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{B_{21}}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{v^2 - 1} (B_{31} d_{23} + B_{41} d_{24})],$$

$$B_{62} = -\frac{1}{v^2 - 1} + \frac{1}{\pi} [\varepsilon_2 (\frac{\sin 4\theta}{4} + \theta) + \varepsilon_3 (\frac{\cos 4\theta}{4} - \frac{1}{4}) + \frac{B_{12}}{1 + p_1^2} d_{21} + \frac{B_{22}}{1 + p_2^2} d_{22} + \frac{1}{v^2 - 1} (B_{32} d_{23} + B_{42} d_{24})],$$

где $d_{21} = -p_1 + e^{2p_1\theta} (p_1 \cos 2\theta + \sin 2\theta)$;
 $d_{22} = -p_2 + e^{2p_2\theta} (p_2 \cos 2\theta + \sin 2\theta)$; $d_{23} = \nu \sin 2\nu(\pi - \theta) + \sin 2\theta$;
 $d_{24} = \cos 2\theta - \cos 2\nu(\pi - \theta)$.

Ток, потребляемый от источника, определяется как

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\theta} \frac{U_c}{r} d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\theta} \frac{E - U_k - U_L}{r} d\tau = \quad (14)$$

$$= \frac{E_a}{2\pi \omega L} \int_0^{2\theta} \sigma [1 - \xi \sin(\tau + \varphi) - u] d\tau,$$

где u определено выражением (5).

Результат интегрирования в выражение (14) следующий:

$$I_0 = \frac{E_a \sigma}{2\pi \omega L} \{2\theta + \xi [\cos(2\theta + \varphi) - \cos \varphi] (1 - \varepsilon_1) + \xi \varepsilon_2 [\sin(2\theta + \varphi) - \sin \varphi] + I_{11} (1 - e^{-2p_1\theta}) + I_{12} (1 - e^{-2p_2\theta})\}. \quad (15)$$

Коэффициент полезного действия на первой гармонике определяется известным соотношением [3]:

$$\eta = \frac{1}{2} \xi \frac{I_1}{I_0}. \quad (16)$$

Поскольку $\xi = \frac{U_k}{E} = \frac{I_1 R_n}{E} = \frac{I_{1s} R_n}{\cos \varphi}$, то согласно выражению (12)

$$\xi = \frac{R_n [A_5 + \xi (B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)]}{\omega L \cos \varphi}. \quad (17)$$

С другой стороны,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{1c}}{I_{1s}} = \frac{A_6 + \xi (B_{61} \sin \varphi + B_{62} \cos \varphi)}{A_5 + \xi (B_{51} \sin \varphi + B_{52} \cos \varphi)}. \quad (18)$$

Система трансцендентных уравнений (17), (18) позволяет определить искомое значение ξ .

В качестве примера, с помощью ПЭВМ был выполнен расчет КПД генератора для частного случая $\theta = 90^\circ$ и $R_n = 5r$.

Зависимость КПД генератора от частоты и параметров LC контура на плоскости переменных p_1, p_2 приведена на рис. 2.

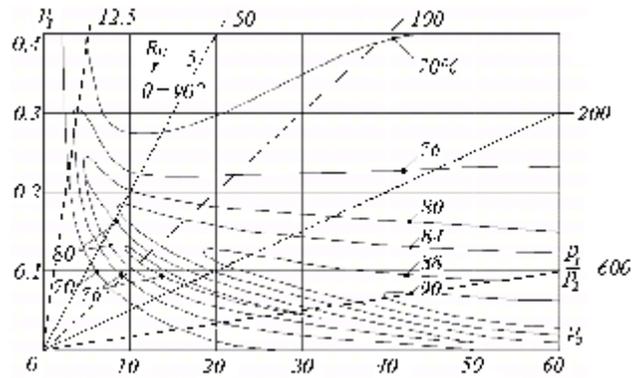


Рис. 2. КПД генератора

В первом приближении $|p_1| \approx \frac{1}{\omega r C}$; $|p_2| = \frac{r}{\omega L}$;
 $p_1 p_2 = \frac{\omega_0}{\omega}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Частотные характеристики КПД генератора можно получить построением поверхности (рис. 2) плоскостями, соответствующими конкретным значениям отношения

$\frac{p_2}{p_1}$; графики КПД в функции от $\frac{1}{p_2} = \frac{\omega L}{r}$ представлены на рис. 3, где также рассмотрен частный случай $\theta = 90^\circ$ и $R_n = 5r$.

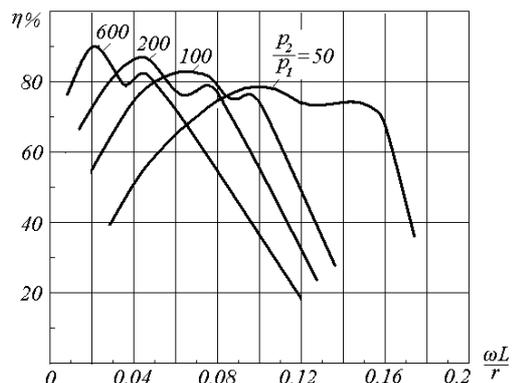


Рис. 3. Частотные характеристики генератора

Из проведенного анализа следует, что непосредственные расчеты энергетических показателей генератора весьма трудоемки из-за громоздких выкладок и невозможности аналитического решения системы уравнений (17), (18).

Поэтому в каждом конкретном случае целесообразно прибегнуть к численным методам с использованием вычислительной техники.

На основании приведенного примера можно сделать вывод о возможности значительного повышения электронного КПД генератора по сравнению с обычными усилителями мощности, КПД которых на высоких частотах не превышает 40–60 %.

Библиографический список

1. Дмитриков, В. Ф. Высокоэффективные формирователи гармонических колебаний / В. Ф. Дмитриков, Н. Б. Петяшин, М. А. Сиверс. М. : Радио и связь, 1988.
2. Хмельницкий, Е. П. Работа лампового генератора на расстроенный контур / Хмельницкий. М. : Связьиздат. 1962.
3. Артым, А. Д. Усилители классов D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании / А. Д. Артым. М. : Связь, 1980.

A. M. Miheenko, S. S. Abramov, I. I. Rezvan

TO THE POSSIBILITY ANALYSIS OF POWER EFFICIENCY OF GENERATING DEVICES INCREASE FOR ON-BOARD RADIO-ELECTRONIC TOOLS

In an offered material the generalized analysis of the key generator of high frequency which allows to estimate power indicators of the generator in a wide range of frequencies and scheme parameters is done.

Keywords: on-board radio tools, D-class generator, power efficiency of the generator.

© Михеенко А. М., Абрамов С. С., Резван И. И., 2009

УДК 681.3

И. В. Ковалев, Ю. А. Нургалева, С. Н. Грищенко, А. В. Усачев

К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Рассмотрена постановка задачи, а также этапы и процедуры формирования структуры автоматизированной системы управления летательными аппаратами. Рациональный вариант структуры системы выбран с использованием оптимизационных и имитационных моделей.

Ключевые слова: система управления, летательный аппарат, структура, выбор варианта.

Важной проблемой при создании систем управления, и в частности, автоматизированных систем управления летательными аппаратами (АСУ ЛА) является выбор их структуры, которая определяет состав элементов системы с соответствующими взаимосвязями и с учетом динамики их функционирования [1].

Анализ различных подходов к формированию структуры подобных систем [2–4] показал, что задачи формирования могут быть разбиты на две группы. К первой относятся задачи, связанные с формированием топологической структуры системы, состоящей в определении состава, территориального расположения и типа управляющих узлов на всех уровнях иерархии системы и каналов связи между ними. Ко второй группе относятся проблемы формирования функциональной структуры системы, т. е. распределение функций управления между узлами системы, включая объект управления и распределение технических средств по узлам системы.

Таким образом, проблема формирования структуры АСУ ЛА включает формирование структуры управляемой системы, т. е. определение оптимального состава и взаимосвязей ее элементов, оптимального разбиения множества управляемых объектов на отдельные подмножества, обладающие заданными характеристиками; формирование структуры управляющей системы, т. е. выбор числа уровней и подсистем (иерархии управления), способов согласования целей подсистем различных уровней; оптимальное распределение выполняемых функций между уровнями и узлами системы; выбор структуры системы передачи, обработки и обмена информации.

Решение задач, связанных с рациональным построением структур АСУ ЛА, требует создания методологических основ формализации элементов и системы в целом, методов декомпозиции системы на подсистемы, построения формализованных моделей и методов формирования структуры АСУ ЛА, многомашинных комп-