

## ФОРМИРОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО НАГРУЗОЧНОГО ТОКОВОГО СПЕКТРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. Г. Юдинцев

Томский политехнический университет, НИИ автоматики и электромеханики  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

В современных космических аппаратах (КА), системы электропитания (СЭП) являются наиболее ответственными узлами с позиции обеспечения заданного ресурса и качества электроэнергии. Это определяет необходимость качественных испытаний изготовленной СЭП КА, в том числе подключение различных видов нагрузок: активной, емкостной, импульсной, гармонической [1,2]. Последняя создается путем формирования синусоидального тока на выходных шинах СЭП. При этом синусоидальный ток, согласно требованиям производителей СЭП, должен изменяться в диапазоне частот  $10 \text{ Гц} \div 150 \text{ кГц}$ , с регулируемой амплитудой ( $0 \div 20 \text{ А}$ ), что позволит проверить нагрузочную способность энергопреобразующего оборудования, его динамические свойства, а также измерить выходной импеданс бортовой СЭП.

Функцию необходимого нагрузочного тока, в общем случае, можно представить в виде спектра, выраженного рядом Фурье:

$$i(t) = I_1 + \sum_{n=1}^m (a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)) \quad (1)$$

где  $I_1$  – постоянная составляющая,  $a_n$ ,  $b_n$  – амплитудные значения токов,  $\omega$  – круговая частота.

Для проведения качественных испытаний, особый интерес представляет функция вида:

$$i(t) = I_1 + I_m \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $I_m$  – амплитуда первой гармоники тока.

Функция (2) является идеальным представлением нагрузочного тока, на практике приходится сталкиваться с различными видами нелинейности, работой в условиях сильных электромагнитных и кондуктивных помех, поэтому функция (1) наиболее полно отражает вид гармонической нагрузки. Основной задачей является приблизить функцию  $i(t)$  к виду (2).

На фоне растущей популярности цифровых систем управления, одним из надежных вариантов устройства гармонической нагрузки является, по-прежнему, аналоговая система с отрицательной обратной связью (ООС) по току, функциональная схема которой представлена на Рис. 1. ЗГ (ЭВМ) – задающий генератор, реализованный на базе микропроцессора STM32F439 с архитектурой CORTEX M4, что позволяет автоматизировать процессы испытаний; ПУ – предварительный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления; УМ – усилитель мощности; АД – амплитудный детектор, выполненный в виде прецизионного однополупериодного выпрямителя; УОС – усилитель обратной свя-

зи; ДТ – датчик тока с использованием эффекта Холла;  $U_{уст}$  – сигнал уставки, определяющий амплитуду тока; МСН – модуль синусоидальной нагрузки, который состоит из параллельно подключаемых транзисторных MOSFET «ячеек», в зависимости от максимального значения амплитуды нагрузочного тока.

Данная система обеспечивает плавный разворот синусоидального тока, путём использования ПУ с регулируемым коэффициентом усиления и процессора задающего генератора. Частота управляющего сигнала изменяется задающим генератором, при этом особенностью является формирование АЧХ отдельных звеньев и системы в целом, для обеспечения работы в нескольких декадах. Стабилизация АЧХ системы во всем частотном диапазоне обеспечивается ООС, при этом наиболее чувствительным звеном является УОС, ошибка которого должна стремиться к нулю, для этого желательно использовать высококачественные операционные усилители. В качестве датчика тока возможно использование продуктов фирм LEM, VAC. Возможно применение трансформаторов тока, но для этого требуется дополнительная компенсационная схема, ввиду того, что ток нагрузки имеет постоянную составляющую, к тому же современные индуктивные датчики тока, позволяющие измерять постоянный сигнал, имеют недопустимую ошибку в различных частотных диапазонах.

Особый интерес в данной системе представляют блоки ПУ и АД. Принципиальная схема предварительного усилителя представлена на Рис. 2.

Коэффициент усиления в данной схеме изменяется элементом, имеющим нелинейную зависимость полного сопротивления от приложенного управляющего напряжения. В качестве управляющего нелинейного элемента используется пара согласованных транзисторов VT2 и VT3 в дифференциальном включении. Регулирование коэффициента усиления осуществляется напряжением  $U_{уст}$ , подаваемым на базу эмиттерного повторителя, реализованного на транзисторе VT1. Изменение тока в эмиттере VT1 вызывает изменение тока через резистор R8 и соответственно через резистор R10 в цепи ОС. В результате изменяется коэффициент усиления схемы [3].

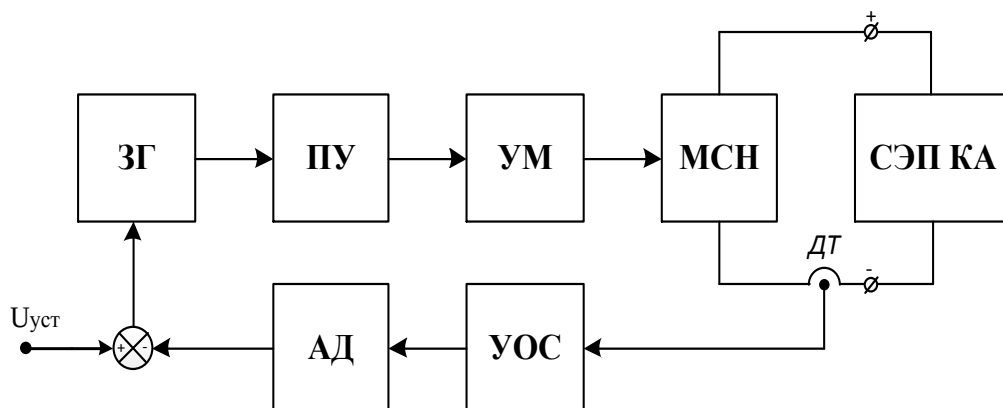


Рис. 1. Функциональная схема генератора синусоидальной нагрузки.

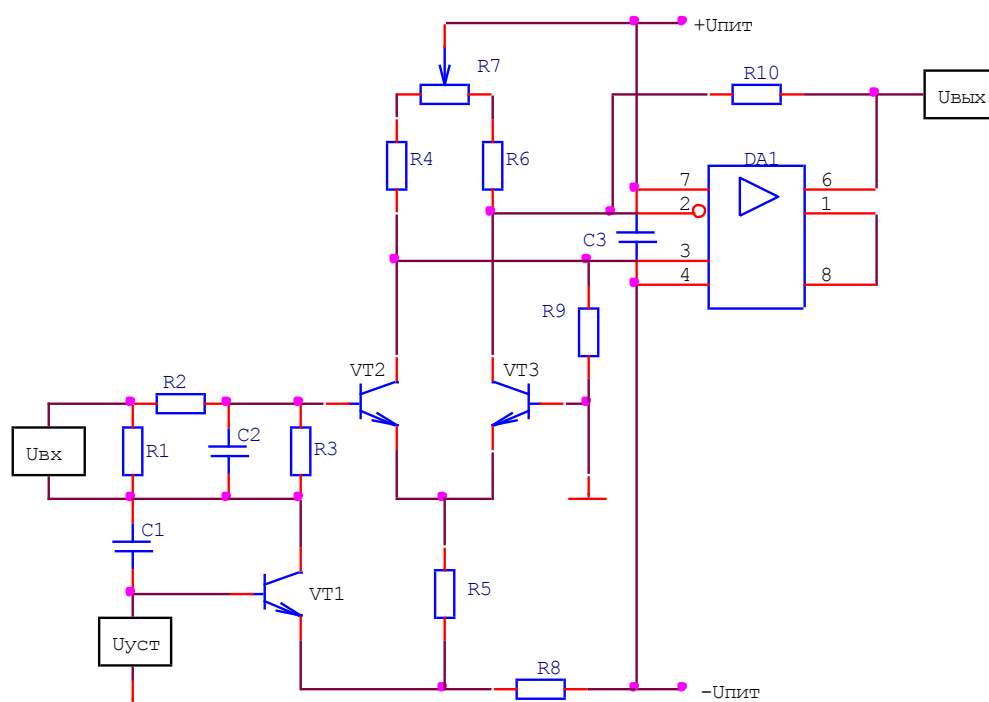


Рис. 2. Принципиальная схема предварительного усилителя.

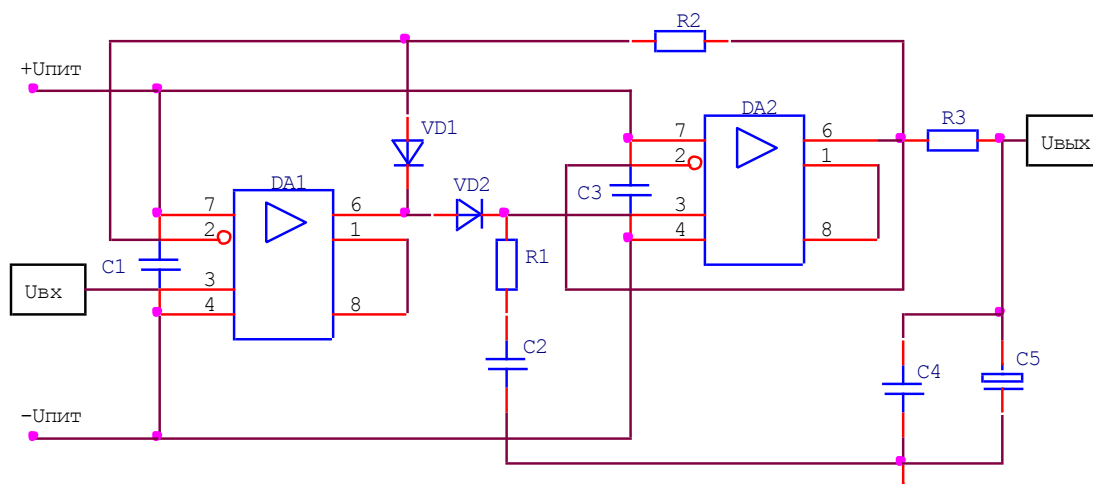


Рис. 3. Принципиальная схема амплитудного детектора.

Данная схема имеет высокую линейность, а использование в цепи базы транзистора VT2 терморезистора R3 позволяет скомпенсировать температурный дрейф в широком диапазоне температур. Частотная коррекция операционного усилителя (ОУ) осуществляется подбором корректирующего конденсатора, подключаемого к 1 и 8 контактам ОУ, в некоторых случаях эти контакты необходимо объединить. Важно отметить, что данный блок оказывает влияние на содержание высших гармоник в управляющем сигнале, коррекцию возможно произвести цепью R1, R2, C2. Принципиальная схема амплитудного детектора представлена на рис. 3.

В целом представленная схема работает как классический амплитудный детектор: при возрастании входного напряжения  $U_{вх}$  оно отслеживается выходным напряжением схемы, а при уменьшении  $U_{вх}$  АД переходит в режим хранения и запоминает предыдущее максимальное значение входного напряжения; это напряжение удерживается на выходе детектора в течение некоторого времени либо до появления большего сигнала на входе [4]. Для развязки C2 от нагрузки на выходе детектора включен повторитель DA2 в цепь общей ОС со входным ОУ DA1, что уменьшает дополнительную погрешность детектирования, обусловленную напряжением смещения нуля, входными токами и конечным усилением DA2. Погрешность данного АД характеризуется изменением напряжения на запоминающем конденсаторе C2 в режиме хранения. Напряжение на C2 изменяется в режиме хранения из-за протекания входных токов ОУ, токов утечки диодов и самого запоминающего конденсатора. Токи утечки конденсатора минимальны при использовании современных плёночных конденсаторов. Для уменьшения токов утечки последовательно с конденсатором C2 включен резистор R1.

Электронная осциллограмма формы тока в выходной шине СЭП КА представлена на рис. 4. В данном случае частота тока  $f = 1$  кГц, амплитуда  $I_m = 10$  А. Испытания, проведенные с помощью анализатора спектра, показали, что функция имеет некоторый ряд гармонических составляющих, возникающих вследствие вышеуказанных причин. Наименьшим числом высших гармоник обладает ток нагрузки в диапазоне 50 Гц – 80 кГц.

В целях увеличения точности в цепи обратной связи в качестве амплитудного детектора следует применять прецизионный двухполупериодный выпрямитель. УОС должен обладать лучшей

частотной характеристикой, для этого следует использовать современные нескорректированные операционные усилители.

Полученная система не является единственным решением такого рода задачи, но обладает рядом преимуществ, такие как, высокая стабильность в широком частотном и температурном диапазонах, низкий коэффициент гармоник, автоматическое задание режимов. К одним из недостатков следует отнести низкий КПД модулей синусоидальной нагрузки, т.к. активные потери в силовых транзисторах рассеиваются на радиаторах.

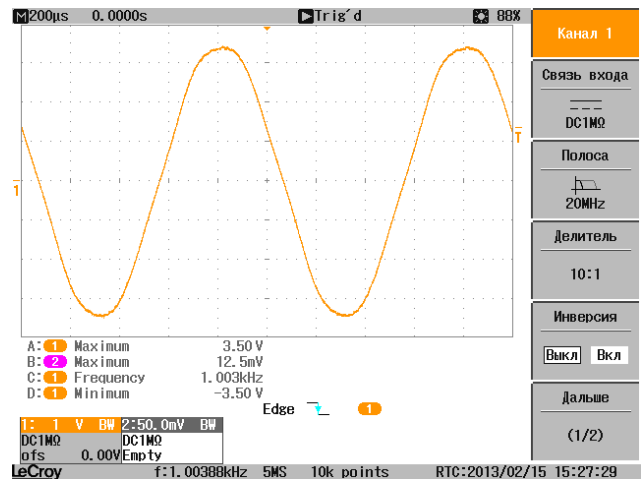


Рис. 4. Осциллограмма тока нагрузки на выходных шинах СЭП КА

#### Литература

1. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб. Пособие. — М.: Логос, 2003. — 736 с.
2. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении: учеб. пособие / В.И. Круглов, В.И. Ершов, А.С. Чумадин, В.В. Курицына. — М.: Логос, 2011. — 432 с.: ил.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. — Изд. 6-е. — М.: Мир, 2003. — 704 с., ил.
4. Фомичев Ю. М. Электроника. Элементная база, аналоговые и цифровые функциональные устройства: учеб. пособие / Ю.М. Фомичев, В.М. Сергеев; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 275 с.