

УДК 681.5

В. И. Дягилев, А. А. Евсиков, В. А. Коковин

Мощный транзисторный генератор с выходным напряжением инфранизкой частоты

Приведена структура и методы создания мощного транзисторного генератора с регулируемыми выходными параметрами. Применение в составе генератора двухзвенного колебательного контура с последовательным и параллельным конденсаторами позволяет получать на выходе неискаженное синусоидальное напряжение с регулированием амплитуды и частоты. Цифровое управление ключевыми элементами преобразователя позволяет формализовать задачу контроля и диагностики для генератора.

Ключевые слова: амплитудно-модулированный сигнал, схема для моделирования, транзисторный генератор.

Об авторах

Дягилев Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры АТПиП филиала «Протвино» государственного университета «Дубна». *E-mail:* dvi-39@mail.ru. Московская обл., г. Протвино, Северный пр. 9.

Евсиков Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры АТПиП филиала «Протвино» государственного университета «Дубна». *E-mail:* eaa@uni-protvino.ru.

Коковин Валерий Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры АТПиП филиала «Протвино» государственного университета «Дубна». *E-mail:* kokovin@uni-protvino.ru.

Бурное развитие микроэлектроники, вычислительной техники и программного обеспечения позволило создать компактные автономные устройства с возможностью сбора данных и удаленного управления. За последнее десятилетие появилось новое направление, названное интернетом вещей (*Internet of Things – IoT*), которое представляет собой распределенную систему компактных встроенных приложений, объединенных беспроводными или проводными сетями [9]. Сегодня на основе *IoT* успешно развивается новое направление, которое с помощью сетевых технологий объединяет роботов или роботизированные устройства. Это направление, названное интернетом роботизированных вещей (*Internet of Robotic Things – IoRT*), нацелено на реализацию робототехнических технологий путем расширения функциональности устройств *IoT*. В работе [8] дано понятие *IoRT*, в котором интеллектуальные устройства могут отслеживать события, собирать данные с разнообразных датчиков из различных источников, использовать интеллектуальные возможности своих вычислителей для определения оптимальных

действий. Выполнив оптимизацию по заданным критериям, такие устройства могут манипулировать объектами физического мира и их контролировать, а также при необходимости перемещаться в реальном мире. Важное место среди устройств направления *IoRT* занимают силовые преобразователи для проводных и беспроводных распределенных приложений.

При автоматизации технологических процессов в различных отраслях часто необходимо формировать инфранизкие сигналы большой мощности (например, питание оборудования для ультразвуковой обработки деталей, решение геофизических задач и т.д.). Для этих целей используются мощные транзисторные генераторы с возможностью изменять выходные параметры. Одним из методов регулировки является метод амплитудной модуляции (АМ). Эту методику, хорошо отработанную и описанную в технической литературе [1], можно использовать для создания устройств с выходными регулируемыми параметрами – амплитуды напряжения и его частоты. При формировании мощного АМ-сигнала с регулируемой частотой используется современная элементная база – мощные *MOSFET* и *IGBT* транзисторы. Это позволяет упростить схему транзисторного генератора и уменьшить массогабаритные параметры оборудования.

Метод амплитудной модуляции

Для математического описания формируемых сигналов методом АМ (с помощью несущей) применяются специальные приемы [1]. Рассмотрим функцию:

$$s[\lambda(t),t] = S[\lambda(t),t] \times \sin\{\omega_0 t + \Phi(\lambda(t),t) + \varphi_0\}, \quad (1)$$

где входной сигнал $\lambda(t)$, подаваемый на вход модулятора, примем как медленно изменяющийся; $\Phi(\lambda(t),t)$ – фаза входного сигнала (переменная во времени на рассматриваемом промежутке действия амплитудной модуляции); ω_0 – частота несущей; φ_0 – начальная фаза входного сигнала (полагаем $\varphi_0 = 0$). Если положить при дифференцировании $\lambda(t) = \lambda$, то сигнал огибающей будет представлен как $S(\lambda,t)$, и можно записать

$$s(\lambda,t) = S(\lambda,t) \sin\{\Psi(\lambda,t)\}, \quad (2)$$

где $\Psi(\lambda,t) = \omega_0 t + \Phi(\lambda(t),t) + \varphi_0$ – полная фаза, а $S(\lambda,t) = S_0[1 + m_{AM} \lambda(t)]$. В выражении $S(\lambda,t)$: S_0 – постоянный коэффициент, равный амплитуде несущего колебания, а m_{AM} – коэффициент амплитудной модуляции (характеризует глубину амплитудной модуляции). Дифференцируя эту функцию (2) дважды по t , получим дифференциальное уравнение второго порядка. Его решением и будет амплитудно-модулированный сигнал (3):

$$s(\lambda,t) = S_0[1 + m_{AM} \lambda(t)] \sin\{\omega_0 t + \varphi_0\}. \quad (3)$$

Величина модулированного сигнала зависит не только от перечисленных параметров, но и от величины коэффициента модуляции m_{AM} [6], который может принимать значения в интервале $[0..1]$. В результате этих преобразований выделяются три гармоники: f_n , $f_n + F$ и $f_n - F$, где F – частота модулированного сигнала, f_n – несущая частота. Последние две гармоники называют боковыми – верхняя и нижняя. При формировании АМ-сигнала используется разность частот $f_n - F$ [2; 4]. Следует заметить, что f_n существенно выше (3–4 порядка) частоты сигнала F .

Транзисторный генератор с резонансным колебательным контуром

Для формирования мощных АМ-сигналов используются генераторы, выполненные на ключевых элементах [4]. На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема генератора для получения мощных АМ-сигналов. В его состав входят силовой источник питания 1, ключевые силовые транзисторы 2–5, первый блок управления 6 транзисторами 2, 4 и второй блок управления 7 транзисторами 3, 5; источник модулирующего напряжения (сигнала низкой частоты) 8, колебательная система (резонансный LC-контур) и нагрузка 9.

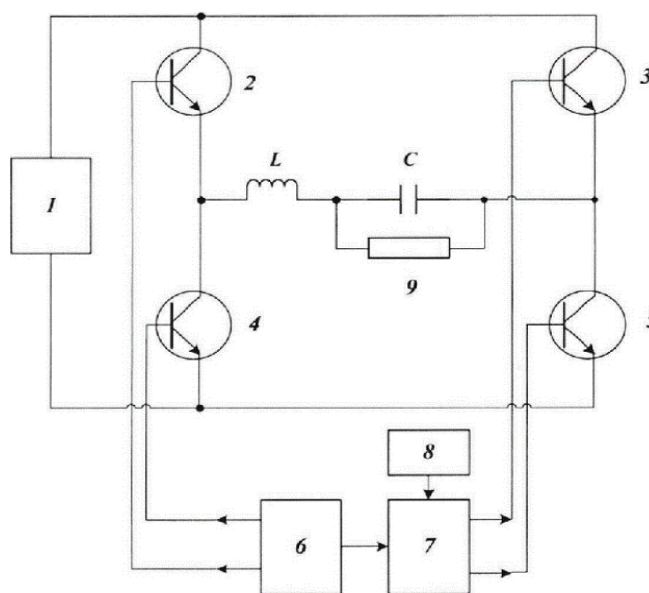


Рис. 1. Структурно-функциональная схема генератора

Транзисторы 2, 5 соединены по схеме транзисторного моста, причем транзисторы 2, 4

и 3, 5 составляют соответственно левое и правое плечи. К диагонали постоянного напряже-

ния этого моста подключен силовой источник питания I , а в диагональ переменного напряжения включен резонансный контур LC с нагрузкой 9 .

Транзисторы в плечах включены последовательно и однонаправленно. Блоки управления этими транзисторами генерируют прямоугольные импульсы управления с фиксированной шириной, причем длительность их всегда и гарантированно меньше, чем половина периода колебаний во избежание появления сквозных токов в транзисторных плечах моста.

Блок управления левого плеча транзисторов 2 и 4 (блок 6) является ведущим по отношению к блоку 7 , который синхронизируется от него. Таким образом, включение и запираание транзисторов $2, 5$ происходит одновременно. В другую половину периода колебаний тока в диагонали переменного напряжения также одновременно происходит коммутация транзисторов $3, 4$. Таким образом, в результате попарно-перекрестной коммутации транзисторов в плечах моста на входе резонансной колебательной системы с нагрузкой 9 возникает двухполярное, прямоугольное по форме напряжение. С помощью резонансного LC -контура в нагрузке 9 выделяется 1-я гармоника этого прямоугольного по форме напряжения.

Для получения модулированной синусоиды в нагрузке 9 необходимо в схему ввести

блок 8 , который вместе с блоком управления 7 обеспечивает отпирание транзисторов 3 и 5 . Несущая частота во много раз больше частоты источника модулирующего напряжения 8 . Таким образом, на импульсы сигналов управления несущей частоты наложен сигнал медленно меняющегося модулирующего напряжения. При повышении этого напряжения уменьшается длительность протекания тока в транзисторах 3 и 5 , что приводит к уменьшению синусоидального напряжения в нагрузке. Этим обеспечивается неодновременное отпирание транзисторов 3 и 5 по отношению к транзисторам 2 и 4 .

Для исследования работы силового преобразователя было проведено моделирование схемы замещения генератора. На рис. 2 представлены временные диаграммы синусоидального напряжения на нагрузке и огибающей низкочастотный сигнал, выделенный с помощью демодулятора (на схеме рис. 1 не показан). В моменты времени, когда импульсы токов левых и правых плеч моста начинают постепенно вычитаться и, находясь в противофазе, компенсируют друг друга, этот процесс приводит к такому состоянию контура LC , что напряжение на его входе равно нулю. В дальнейшем, под действием модулирующего сигнала, напряжение на входе контура вновь нарастает.

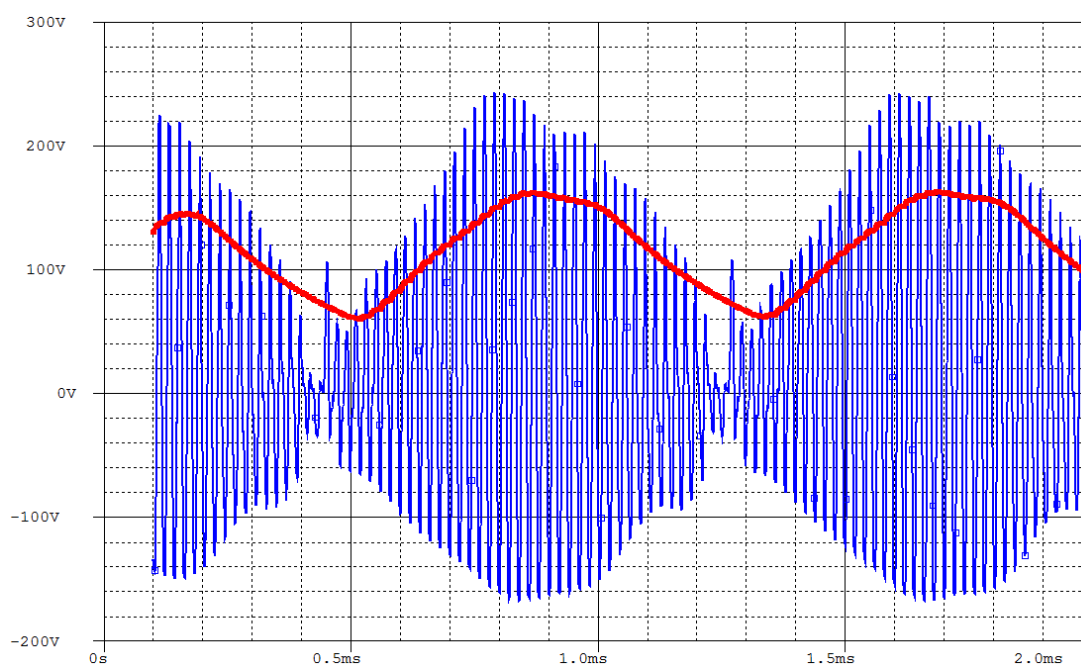


Рис. 2. Модулирующий сигнал на выходе генератора и его огибающая

Как было отмечено выше, если прямоугольное напряжение подать на вход резонансного LC -контура, то на нагрузке 9 будет выделяться его первая гармоника, причем, чем больше длительность прямоугольного импульса, тем будет больше амплитуда выделенной гармоники напряжения на нагрузке. Таким образом, в нагрузке 9 напряжение будет иметь форму синусоиды частотой F , но «составленную» из гармоник несущей частоты f_n .

Регулирование выходных параметров генератора

Регулирование частоты приведенной реализации генератора может осуществляться дискретным (цифровым) способом. Дискретный метод регулировки заключается в установке в блоке 8 (рис. 1) заданного значения частоты выходного напряжения. Для регулирования гармонического выходного сигнала предлагается использовать управление ключевыми устройствами модулятора (например, мощными транзисторами) с помощью прямоугольных импульсов, подаваемых на разные ветвильные плечи моста с различной частотой [5; 10]. Например, если на транзисторы 2–4 подать от БУ 6 импульсы с частотой 50 Гц, а на транзисторы 3–5 подать от БУ 7 импульсы

с частотой 51 Гц, то колебательный контур выделит на нагрузке гармонику частотой 1 Гц, заполненную напряжением с несущей частотой (рис. 2).

Для регулирования выходного напряжения генератора на заданном уровне необходимо добавить в схему (рис. 1) дополнительный конденсатор, включенный последовательно с дросселем. В этом случае для регулировки напряжения необходимо изменять емкость дополнительного конденсатора [3; 7]. Рассмотрим более подробно эту реализацию.

На рис. 3 представлена упрощенная схема генератора. Схема включает следующие позиции:

- стабилизированный источник питания $V1$;
- транзисторный мост $VT1$ – $VT4$;
- блок управления БУ этими транзисторами;
- последовательно-параллельный колебательный контур $L1$, $C1$, $C2$, где $C2$ представляет собой блок конденсаторов $C2-1$, $C2-2$, ..., $C2-n$;
- коммутирующие ключи $K1$, $K2$, ..., Kn для подключения требуемого конденсатора;
- нагрузка R_n .

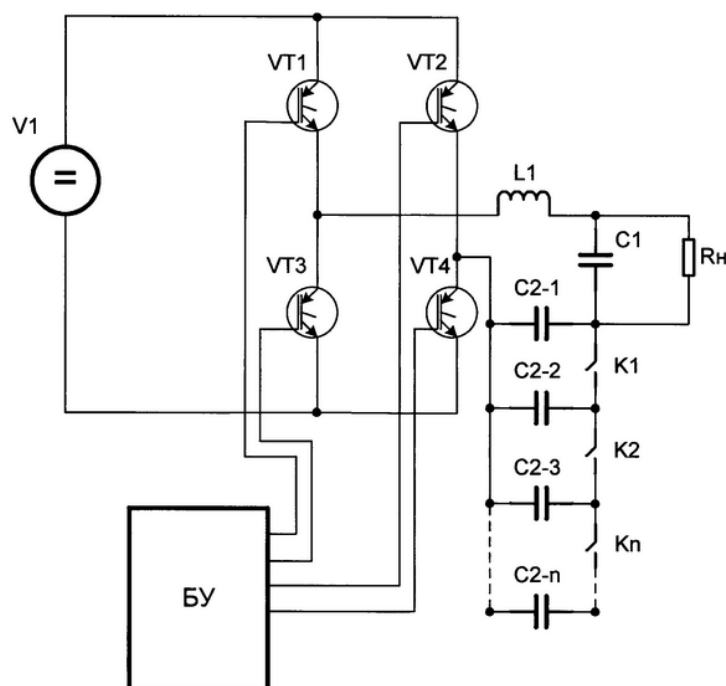


Рис. 3. Упрощенная схема генератора с дополнительным конденсатором

Генератор (рис. 3) работает следующим образом. Постоянное стабильное по величине напряжение подается на одну диагональ моста из четырех транзисторов $VT1 - VT4$. На затворы этих транзисторов подаются управляющие сигналы из блока управления БУ. При попарно-перекрестной коммутации транзисторов $VT1, VT4$ и $VT2, VT3$ в другой диагонали моста протекает переменный ток прямоугольной формы с амплитудой, равной напряжению источника питания $V1$ (за вычетом двух падений напряжения на транзисторах $VT1, VT4$ и $VT2, VT3$). Конденсатор $C2$, включенный последовательно относительно нагрузки R_n , выполнен в виде блока параллельно соединенных конденсаторов $C2-1, C2-2, \dots, C2-n$, коммутируемых ключами $K1, K2, \dots, Kn$. Здесь n – число конденсаторов и ключей для их коммутации,

причем число ключей меньше на единицу, чем число конденсаторов, т.е. один конденсатор ($C2-1$) включен постоянно (без ключа). В противном случае схема будет неработоспособна из-за разрыва цепи протекания тока.

Одним из вариантов подключения дополнительных конденсаторов является использование симисторов в бестоковую паузу выходного сигнала генератора. Другим – применять для этих целей мощные реле при блокировке подачи управляющих сигналов на входы управления ключевых транзисторов.

Для подтверждения возможности выполнения регулирования амплитуды выходного сигнала проведено моделирование этого процесса. На рис. 4 приведены параметрические зависимости при изменении емкости дополнительного конденсатора $C2$.

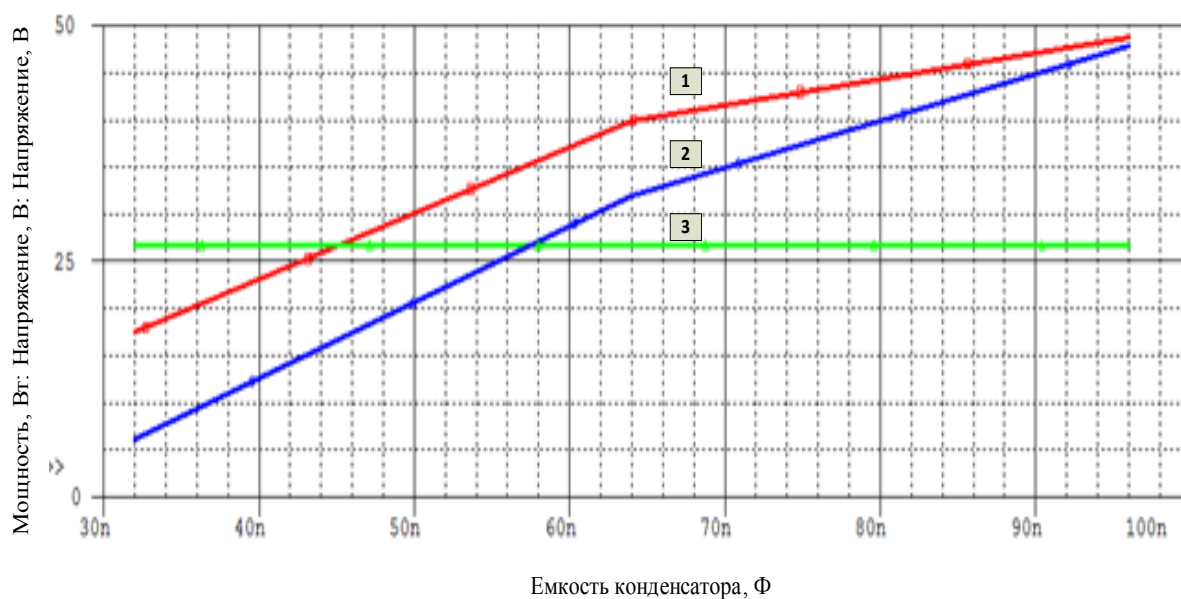


Рис. 4. Диаграммы процессов в генераторе: 1 – среднее значение мощности; 2 – максимальное напряжение на нагрузке; 3 – напряжение питания генератора

Анализ параметрических зависимостей (рис. 3) показывает, что по мере увеличения емкости конденсатора $C2$ возрастает максимальное напряжение и среднее значение мощности на нагрузке, при этом напряжение электропитания генератора остается неизменным. Из диаграммы видно, что, когда емкость конденсатора увеличивается в 3 раза, напряжение на нагрузке (кривая 2) увеличивается почти в 10 раз (от 5 до 50 В). Следует заметить, что нагрузка может быть подключена к инвертору

через согласующий трансформатор. Это позволяет выполнить гальваническую развязку входного и выходного напряжений генератора и согласовать, при необходимости, сопротивление нагрузки и выходное сопротивление генератора.

Заключение

Предложенный мощный генератор с выходным напряжением инфранизких частот может быть основой для создания устройств с удаленным управлением. В предложенной

реализации схемы генератора применяется двухзвенный фильтр: $L1$ и $C2$ – параллельное звено фильтра, а $L1$ и $C1$ – последовательное звено. Эта конфигурация контура позволяет получить чистую синусоиду, т.к. напряжение нагрузки определяется параллельным колебательным контуром $L1$ и $C2$ [6].

Предложен метод изменения частоты выходного сигнала генератора с помощью управления ключевыми устройствами модулятора (например, мощными транзисторами) с помощью прямоугольных импульсов, подаваемых на разные вентиляльные плечи моста с различной частотой. При этом на колебательном контуре выделяется инфранизкая разностная частота сигнала, заполненная напряжением с несущей частотой. Далее выходной сигнал пропускается через фильтр демодулятора (не показан на рисунках), настроенный на частоту несущего сигнала.

Для регулировки амплитуды выходного напряжения фильтра используется дополнительный конденсатор с переменной емкостью, который можно подключить, используя симисторы либо мощные реле в качестве ключей.

Библиографический список

1. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский, М.П. Демин. – М. : Радио и связь, 1994. – 480 с.
2. Дягилев, В. И. Транзисторные генераторы тока высокой частоты для электротехнологий / В. И. Дягилев // Монография. – Дубна : Лика, 2011. – 67 с.
3. Патент 153261 Российская Федерация. Силовой преобразователь / Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Оpubл. 10.07.2015, Бюл. № 19.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Ч. 1 / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
5. Патент 2663228 Российская Федерация. Генератор амплитудно-модулированных сигналов / Коковин В.А., Евсиков А.А., Дягилев В.И. Оpubл. 02.08.2018, Бюл. № 22.
6. Севернс, Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Р. Севернс, Г. Блум. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
7. Bierbaum, F. Robust controls for modular load converter motor drive technology / F. Bierbaum, R.D. Lorenz, T.M. Jahns // Proc. of 2005 CPES Power Electronics Seminar. – Blacksburg, VA. – 2005. – Apr. – P. 153–157.
8. Ray, P.P. Internet of robotic things: Concept, technologies, and challenges / P.P. Ray // IEEEAccess. – 2016. – Vol. 4. – P. 9489–9500.
9. Smith, G. The Internet of Things 2012: New Horizons / G. Smith. – Halifax, U.K.: IERC-Internet of Things European Research Cluster, 2012.
10. Uvaysov, S. U. Power converter with signal frequency and amplitude regulation / S.U. Uvaysov, V.A. Kokovin, V.I. Diagilev // IEEE 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, 2018. – P. 1–5.

Поступила в редакцию
14.12.2018