

РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2016

- Д. А. Ворох** аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, fallout2s@yandex.ru
- А. И. Махов** кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Makhov37@mail.ru

Предложен резонансный преобразователь напряжения и способы широтно-импульсного (ШИМ) регулирования его выходного напряжения. Преобразователь имеет глубокий (до 90%) диапазон регулировки при высокой линейности, высокий коэффициент полезного действия (КПД) во всём диапазоне регулировки, малую (в 1,5...2 раза) перегрузку реактивных элементов, слабую зависимость выходного напряжения от нагрузки, малый (до 3%) уровень гармоник и переключение ключей при нулевом токе. Преобразователь может быть использован в качестве регулируемого в широких пределах эффективного источника питания или генератора гармонических колебаний с амплитудной модуляцией по входу при КПД более 70%. Рассматриваются теоретические аспекты работы резонансного преобразователя, отражены функции каждого элемента схемы. Для подтверждения теоретических основ работы схемы доказана возможность ШИМ регулирования выходного напряжения схемы. Проведено математическое моделирование на примере высокоэффективного источника вторичного электропитания и источника гармонических колебаний с низким уровнем гармоник и большой выходной мощности. Исследована практическая реализация схемы преобразователя, работающего по методу с центрированием импульсов и без центрирования. Даны рекомендации о применении рассмотренной схемы и методов в качестве законченного устройства.

Резонансные преобразователи напряжения, широтно-импульсная регулировка, источник питания, генератор гармонических колебаний, коэффициент гармоник.

Цитирование: Ворох Д.А., Махов А.И. Резонансный преобразователь с широтно-импульсной регулировкой выходного напряжения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 143-152. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-143-152

Введение

Резонансные преобразователи напряжения – это генераторы с внешним возбуждением (ГВВ), работающие в ключевом режиме на гармониках напряжения, в отличие от классических генераторов, работающих на гармониках тока (получаемых путем отсечки тока генератора), и генераторов с синтезированием синусоиды.

Структурная схема резонансного ГВВ представлена на рис. 1. Она содержит блок активных элементов (БАЭ), возбудитель (В) и колебательную цепь (КЦ) с нагрузкой R . Питание БАЭ осуществляется от источника питания (ИП). Нагрузка может быть подключена через выпрямитель, что на свойства ГВВ практически не влияет.

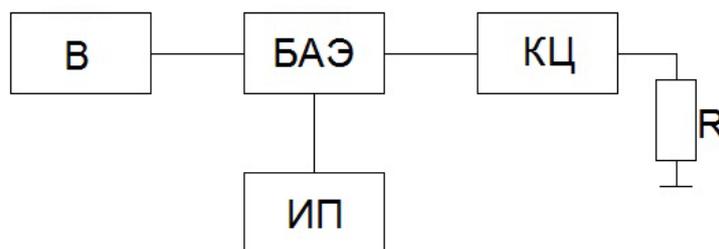


Рис. 1. Структурная схема ГВВ

Блок активных элементов выполняет функцию генератора гармоник напряжения, возбудитель – импульсный генератор, управляющий работой ключей БАЭ, колебательная цепь выделяет первую гармонику напряжения и подавляет высшие. Генератором гармоник напряжения является мостовая схема, часто используемая в преобразователях, генерирующая на выходе напряжение типа меандра с высоким коэффициентом полезного действия. Это напряжение – чередование разнополярных прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды U и длительности τ с небольшим пробелом между импульсами («мёртвое время» порядка 3-4% от длительности импульсов). Отличительной чертой этого колебания является отсутствие постоянной составляющей и чётных гармоник. Амплитуды нечётных гармоник следующие:

$$U_1 = \frac{4}{\pi} U; \quad U_3 = \frac{1}{3} U_1; \quad U_5 = \frac{1}{5} U_1; \dots$$

Резонансный преобразователь нормально работает и имеет хорошие свойства, если длительность возбуждающих импульсов с точностью до «мёртвого времени» равна полупериоду колебаний моста. При изменении длительности этих импульсов (например, с целью регулировки выходного напряжения) «мёртвое время» увеличивается и режим колебаний нарушается.

Фирмой Texas Instruments предложен фазовый способ регулировки напряжения резонансного преобразователя [1]. При этом длительность возбуждающих импульсов не изменяется, а изменяется фаза между импульсами левой пары относительно импульсов правой пары ключей моста. Длительность импульсов на выходе моста пропорциональна сдвигу фаз. При этом свободные колебания не нарушаются. Недостатком является то, что при сдвиге фаз «мёртвое время» прерывает ток ключей, что может нарушить процесс регулировки.

В работе [2] предложена схема резонансного ключевого преобразователя напряжения с частотной регулировкой напряжения. Эта схема может быть использована только при преобразовании постоянного напряжения в постоянное и, кроме того, имеет сложную колебательную цепь.

Считается, что ШИМ регулировка резонансного преобразователя, то есть регулировка путём изменения «мёртвого времени», невозможна, так как нарушает колебательный процесс в системе. Но оказалось, что ШИМ регулировка возможна, если принять соответствующие меры для обеспечения свободных колебаний.

Целью статьи является исследование резонансного преобразователя с ШИМ регулировкой выходного напряжения.

Основная часть

На рис. 2 представлена силовая часть резонансного преобразователя [3]. Она содержит мост на четырёх ключах VT1– VT4 с обратными диодами VD1– VD4; колебательную цепь, состоящую из последовательного L1,C1,R и параллельного L2,C2,R контуров, и трансформатор Tr с нагрузкой R. Обратные диоды, вместе с другими мерами, служат не только для защиты активных элементов, но и обеспечивают свободные колебания при выключении ключей. Колебательная цепь – полосовой фильтр четвёртого порядка с хорошей избирательностью и малой перегрузкой реактивных элементов (добротность звеньев $Q = 1,5 \dots 2$). Фильтр обеспечивает также слабую зависимость напряжения от величины нагрузки. Параллельный контур образован из индуктивности трансформатора L2 и всего одной добавочной ёмкости C2, то есть с малыми затратами по сравнению с известными схемами. Кроме того, для обеспечения свободных колебаний одна пара ключей (верхняя или нижняя) – регулируемая, а вторая пара (нижняя или верхняя) – нерегулируемая.

Длительность нерегулируемых импульсов равна полупериоду резонансных колебаний $T_0/2$ и на величину «мёртвого» времени меньше полупериода колебаний моста $T/2$ (как для нерегулируемого преобразователя).

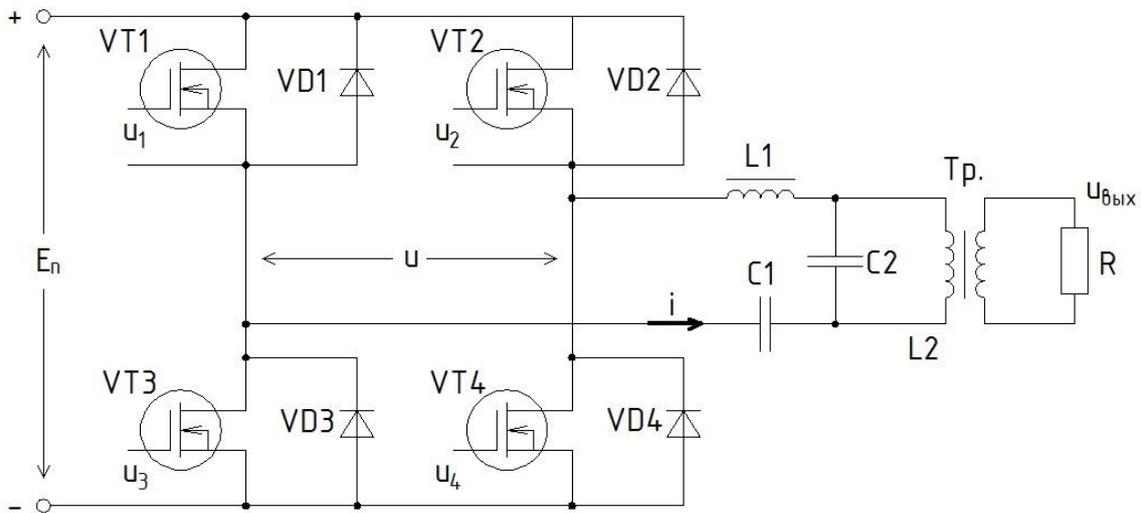


Рис. 2. Схема силовой части резонансного преобразователя напряжения

В зависимости от местоположения импульсов на временной оси имеем два способа управления:

1. У всех импульсов совпадают передние фронты.
2. Все импульсы центрированы.

Работа преобразователя по первому способу управления поясняется диаграммами (рис. 3). Ключи VT1, VT2 – регулируемые и длительность импульсов u_1, u_2 – переменная (τ); ключи VT3, VT4 – нерегулируемые и длительность импульсов u_3, u_4 – максимальная (T_0). u – напряжение и i – ток на выходе моста (на входе колебательной цепи), $u_{\text{вых}}$ – выходное напряжение преобразователя на нагрузке R . t_M – «мёртвое время», т.е. время, в течение которого все транзисторы в схеме закрыты.

Работа преобразователя происходит следующим образом. В первом полупериоде и других нечётных полупериодах включены ключи VT1 и VT4. В результате на колебательную цепь КЦ поступает регулируемый импульс напряжения u . Этот импульс можно представить как сумму двух скачков напряжения бесконечной длительности. При подаче положительного скачка напряжения на вход КЦ в ней возникают вынужденные колебания и ток i нарастает по гармоническому закону. При появлении отрицательного скачка напряжения в цепи КЦ – VT4 – VD3 – КЦ возникают свободные колебания и ток уменьшается также по гармоническому закону до нуля. Это происходит при любой длительности регулирующих импульсов. Во втором полупериоде и других чётных полупериодах то же самое происходит при включении ключей VT2 и VT3.

Свободные колебания в схеме не прерываются, а переключения производятся при нулевом токе. Представленные импульсы тока эффективно фильтруются колебательной цепью и на выходе КЦ имеем гармоническое напряжение с амплитудой, пропорциональной длительности регулирующих импульсов.

Работа преобразователя по второму способу управления поясняется временными диаграммами (рис. 4). Ключи VT1, VT2 – регулируемые и длительность импульсов u_1, u_2 – переменная (τ); ключи VT3, VT4 – нерегулируемые и длительность импульсов u_3, u_4 – максимальная (T_0). Все импульсы центрированы.

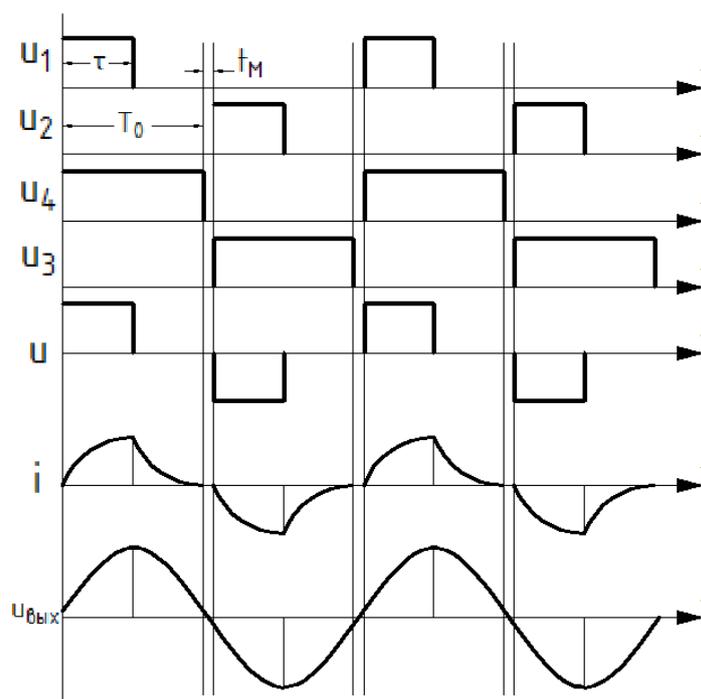


Рис. 3. Временные диаграммы преобразователя напряжения с управлением по первому способу

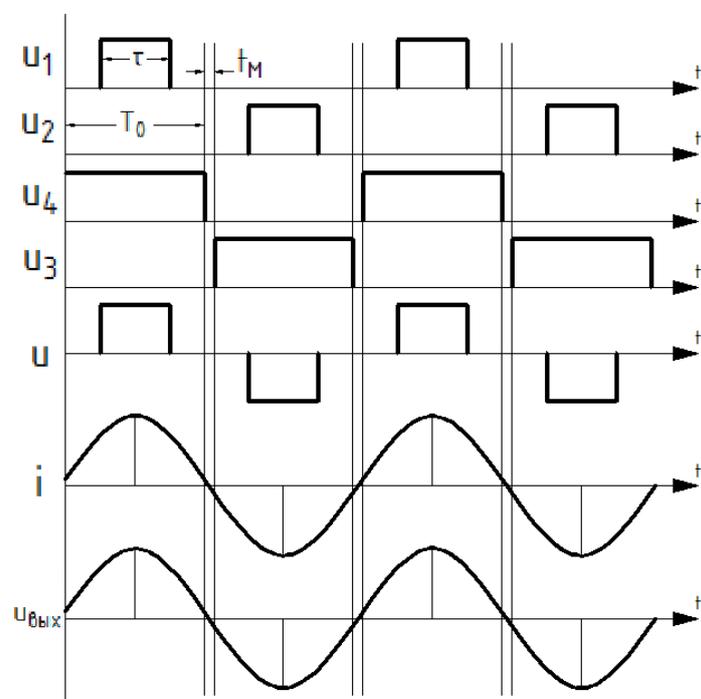


Рис. 4. Временные диаграммы преобразователя напряжения с управлением по второму способу

Работа преобразователя происходит следующим образом. При включении регулирующих и других ключей в порядке, показанном на диаграммах (рис. 4), на входе колебательной цепи получаем импульсное напряжение u с центрированными относительно полупериодов импульсами. Это напряжение можно представить в виде суммы нечётных гармоник – 1,3,5... Колебательная цепь пропускает в нагрузку только первую гармонику напряжения, в результате имеем только ток первой гармоники i . При отключении управляющих ключей в первом и других нечётных полупериодах ток КЦ не прерывается и проходит по пути КЦ – VT4 – VD3 – КЦ, а при отключении регулирующих ключей во втором и других чётных полупериодах ток проходит по пути КЦ – VT3 – VD4 – КЦ. Таким образом, в преобразователе напряжения с управлением по второму способу имеем соответствующие настройке колебательной цепи гармонические ток и напряжение на её выходе. Можно ожидать следующие свойства резонансных преобразователей, предложенных в [3]:

- глубокое ШИМ регулирование выходного напряжения;
- высокий КПД благодаря ключевому режиму;
- малый уровень гармоник в выходном напряжении благодаря фильтру четвёртого порядка;
- независимость амплитуды выходного напряжения от величины нагрузки;
- малая перегрузка реактивных элементов КЦ;
- небольшое усложнение в схеме по сравнению с известными (одна дополнительная ёмкость);
- переключение ключей моста происходит при нулевом токе.

С целью исследования предложенного резонансного преобразователя напряжения проведено цифровое моделирование схемы его силовой части. В качестве управляемых ключей VT1-VT4 использовались транзисторы марки IRF630. Индуктивности колебательной цепи L1 и L2 равны 95,5 и 42,5 мкГн соответственно. Ёмкости колебательной цепи C1 и C2 равны 106 и 237 нФ соответственно. Нагрузка подключалась к колебательной цепи через трансформатор, первичной обмоткой которого была катушка L2. Коэффициент трансформации равен единице.

На входы ключей подаются управляющие импульсы в соответствии с временными диаграммами (рис. 3, 4).

Параметры моделирования:

- напряжение питания $E_{п} = 26,4$ В;
- номинальное сопротивление нагрузки $R_{ном} = 20$ Ом;
- резонансная частота КЦ $f_o = 50$ кГц;
- добротности контуров $Q1 = Q2 = 1,5$.

Длительность регулируемых импульсов изменялась от 1 до 100% полупериода резонансной частоты $T_o/2$, сопротивление нагрузки изменялось от $0,1R_{ном}$ до почти холостого хода ($500 R_{ном}$).

На рис. 5, 6 представлены полученные при моделировании осциллограммы сигналов для первого и второго способов управления соответственно для случая длительности импульсов, равной четверти периода резонансной частоты $\tau = 0,5T_o$, $R = R_{ном}$, что соответствует половине номинальной мощности. Из рис. 5, 6 видно, что свободные колебания в схеме преобразователя не нарушаются, а переключение ключей происходит при нулевом токе моста. Видно полное совпадение осциллограмм, полученных при моделировании, с диаграммами, полученными на основе анализа переходных процессов в реактивных компонентах схемы (рис. 3, 4). Тем самым показана возможность ШИМ регулировки выходного напряжения резонансного ключевого преобразователя.

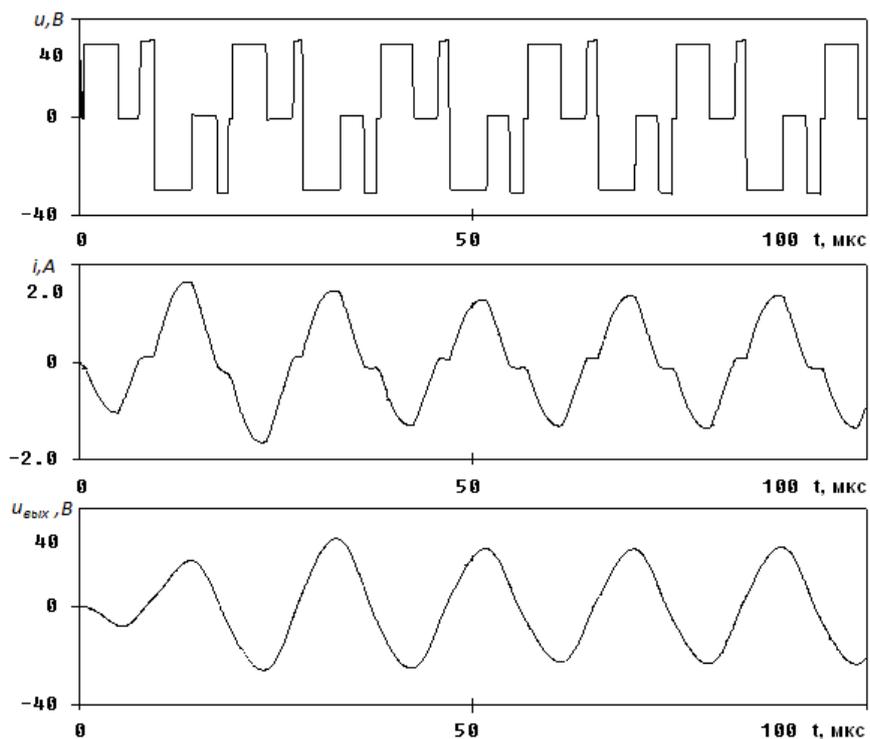


Рис. 5. Осциллограммы сигналов преобразователя напряжения с управлением по первому способу

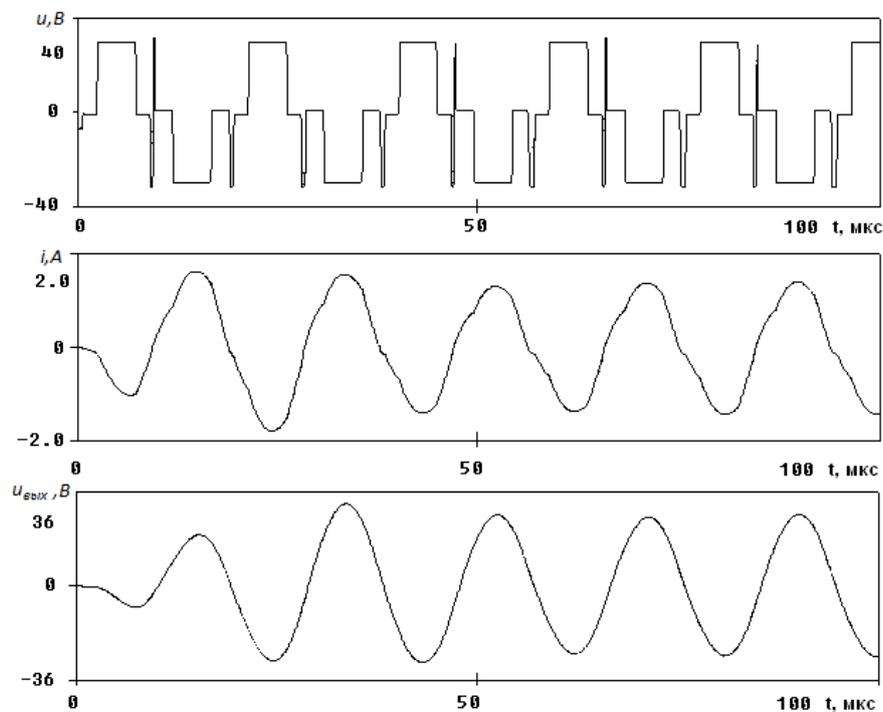


Рис. 6. Осциллограммы сигналов преобразователя напряжения с управлением по второму способу

На рис. 7 представлены зависимости выходного напряжения и КПД преобразователя от величины сопротивления нагрузки для первого способа управления. Здесь значения $U_{\text{вых.э}}$ и КПД_э, показанные точками, соответствуют экспериментальным данным, а кривые $U_{\text{вых.м}}$ и КПД_м получены при моделировании.

Из рис. 7 видна весьма слабая зависимость амплитуды выходного напряжения от сопротивления нагрузки, а КПД снижается при весьма больших сопротивлениях, где это не имеет значения.

На рис. 8 представлены нагрузочные характеристики для второго способа управления. Видно, что ни выходное напряжение, ни КПД практически не зависят от сопротивления нагрузки.

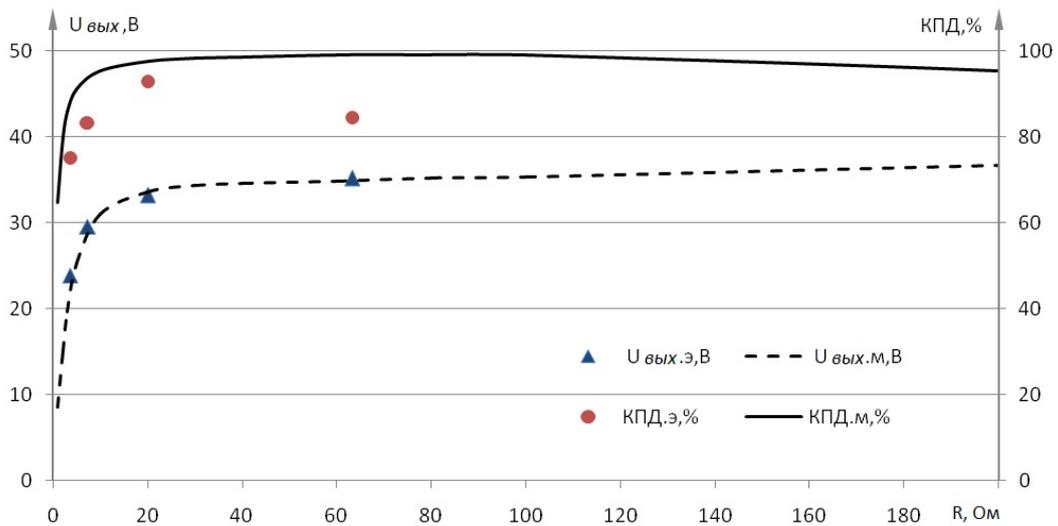


Рис. 7. Нагрузочные характеристики резонансного преобразователя напряжения с управлением по первому способу

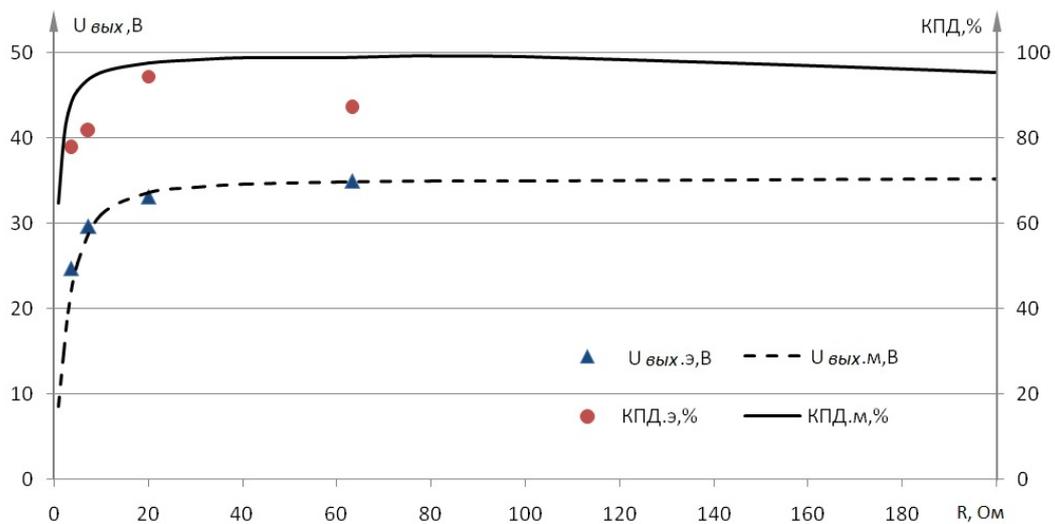


Рис. 8. Нагрузочные характеристики резонансного преобразователя напряжения с управлением по второму способу

На рис. 9 представлены регулировочные характеристики для первого способа управления. Видно, что глубина регулировки более 90% – при высокой линейности и КПД более 70% – при глубине регулировки до 80%.

На рис. 10 представлены регулировочные характеристики для второго способа управления. Видно, что глубина регулировки также более 90% при высокой линейности и КПД более 75%.

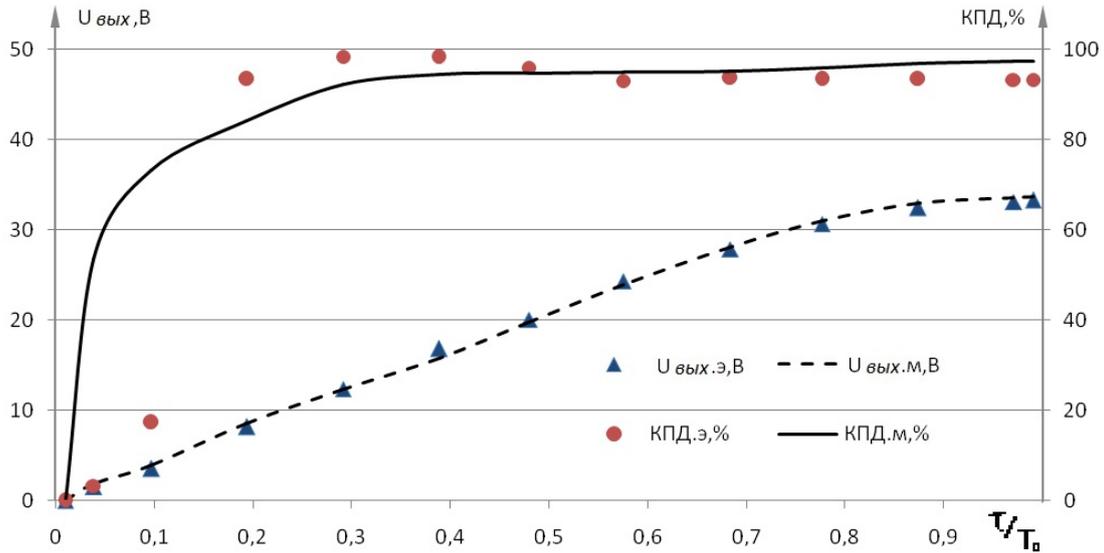


Рис. 9. Регулировочные характеристики резонансного преобразователя напряжения с управлением по первому способу

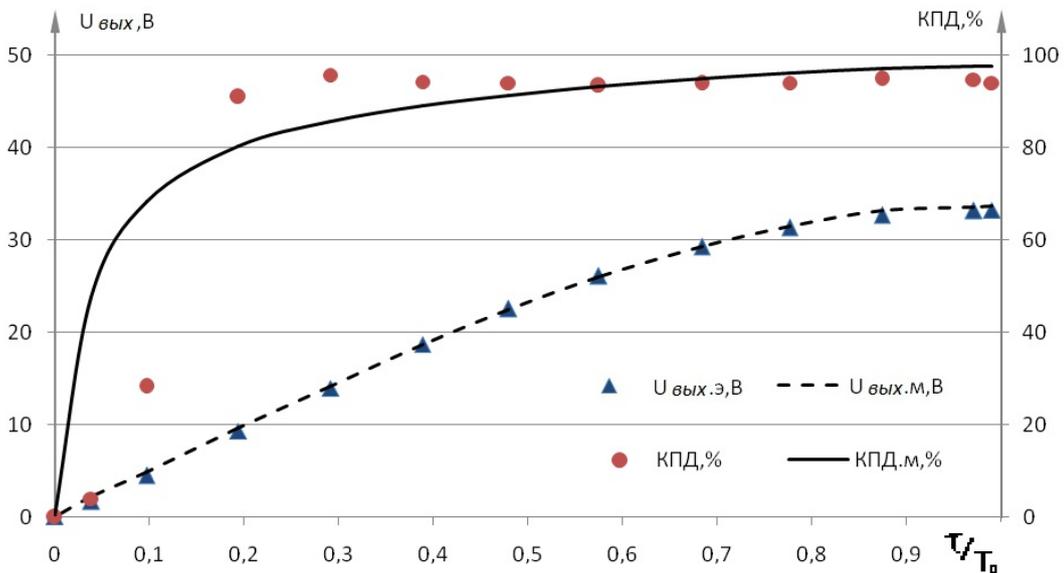


Рис. 10. Регулировочные характеристики резонансного преобразователя напряжения с управлением по второму способу

Следует отдельно отметить, что при всех экспериментах, результаты которых изображены на рис. 7-10, значения $U_{\text{вых}}$ и КПД не принимали нулевых значений.

На рис. 11 показано изменение относительного уровня третьей гармоники в зависимости от уровня регулировки выходного напряжения. Для первого способа управления получен уровень гармоник от 1,5 до 9% при изменении выходного напряжения от $U_{\text{ном}}$ до $0,1U_{\text{ном}}$, а для второго способа – от 1,5 до 3%.

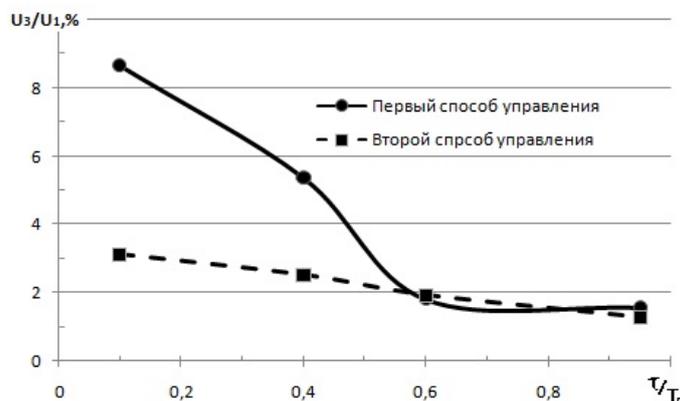


Рис. 11. Коэффициент гармоник резонансного преобразователя напряжения с управлением по первому и второму способам

Заключение

По результатам проведённых исследований подтверждены следующие свойства преобразователей:

- диапазон регулировки выходного напряжения достигает 90% при высокой линейности;
- высокий КПД – больше 95% при $U_{\text{ном}}$, $R_{\text{ном}}$ и не менее 75% – во всём диапазоне регулировки напряжения;
- слабое влияние величины нагрузки на выходное напряжение и КПД;
- малая перегрузка реактивных элементов (в 1,5... 2,0 раза);
- малый уровень гармоник в выходном напряжении, что позволяет рекомендовать первый способ управления для преобразователей постоянного напряжения в постоянное, а второй способ – для построения эффективных генераторов гармонических колебаний.

Библиографический список

1. UC1875-SP Rad-Tolerant Class-V, Phase Shift Resonant Controller. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc1875.pdf>
2. Мустафа Г.М., Ильинский А.Д., Крашенинин П.Ю., Чистилин С.В. Высоковольтный преобразователь постоянного напряжения с фильтрокомпенсирующей цепью и способ управления его выходной мощностью: патент РФ № 2335841; опублик. 10.10.2008; бюл. № 28.
3. Махов А.И. Резонансный преобразователь постоянного напряжения в постоянное и переменное и способ управления его выходным напряжением: патент РФ № 2459342; опублик. 20.08.2012; бюл. № 23.

RESONANT CONVERTER WITH PWM OUTPUT VOLTAGE ADJUSTMENT

© 2016

D. A. Vorokh postgraduate student, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, fallout2s@yandex.ru

A. I. Makhov Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, Makhov37@mail.ru

A resonant voltage converter and ways of pulse width (PWM) adjustment of its output voltage are proposed in the paper. The converter has a deep (up to 90%) control range with high linearity, a high efficiency factor in the entire range of adjustment, small (1.5 ... 2 times) overload of reactive elements, weak dependence of the output voltage on the load, a low (up to 3%) level of harmonics and switching keys at zero current. The converter can be used as an efficient power supply adjustable over a wide range or a generator of harmonic oscillations with amplitude modulation on the input with an efficiency factor of over 70%. Theoretical aspects of the operation of the resonant converter are discussed and the functions of each element of the converter circuit are described in detail. The possibility of PWM control of the circuit output voltage is confirmed. Mathematical modeling is carried out using the example of highly efficient power supply and a secondary source of harmonic oscillations with low harmonics and high output power. Practical implementation of the converter circuit, operating according to the method of pulses with and without centering is analyzed. Recommendations on the optimum use of the scheme and methods considered as a complete unit are given.

Resonant voltage converters voltage pulse width control, PWM, power supply, generator of harmonic oscillations, harmonic factor.

Citation: Vorokh D.A., Makhov A.I. Resonant converter with PWM output voltage adjustment. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 143-152.
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-143-152

References

1. UC1875-SP Rad-Tolerant Class-V, Phase Shift Resonant Controller. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc1875.pdf>
2. Mustafa G.M., Ilinskij A.D., Krashenin P.Ju., Chistilin S.V. *Vysokovol'tnyy preobrazovatel' postoyannogo napryazheniya s fil'trokompensiruyushchey tsep'yu i sposob upravleniya ego vykhodnoy moshchnost'yu* [High-voltage DC voltage converter with filter-compensating circuit and method of controlling its output power]. Patent RF, no. 2335841, 2008. (Publ. 10.10.2008, bull. no. 28).
3. Makhov A.I. *Rezonansnyy preobrazovatel' postoyannogo napryazheniya v postoyannoe i peremnoe i sposob upravleniya ego vykhodnym napryazheniem* [Resonant converter of DC voltage into DC and AC and method to control its output voltage]. Patent RF, no. 2459342, 2012. (Publ. 20.08.2012, bull. no. 23).