

Высоковольтный генератор синусоидального сигнала с регулируемой частотой для питания плазменных актуаторов

С. И. Мошкунов, С. В. Небогаткин, Н. А. Подгуйко, В. Ю. Хомич, Е. А. Шершунова

Разработан, изготовлен и протестирован высоковольтный генератор синусоидального сигнала с изменяемой частотой для питания плазменных актуаторов. Использована схема усилителя класса D. Частота и амплитуда задается внешним низковольтным генератором синуса. Основные параметры: выходная мощность до 1 кВт, амплитуда выходного сигнала до 10 кВ, диапазон изменения частоты 4–10 кГц. Получены осциллограммы выходного напряжения генератора на емкостной нагрузке при частотах 4–10 кГц.

Ключевые слова: высоковольтный генератор синусоидальных колебаний, усилитель класса D, плазменный актуатор, электрогидродинамический поток.

Ссылка: Мошкунов С. И., Небогаткин С. В., Подгуйко Н. А., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 94.

Reference: V. Yu. Khomich, S. I. Moshkunov, S. V. Nebogatkin, N. A. Podguyko, and E. A. Shershunova, Prikl. Fiz., No. 5, 94 (2018).

Введение

Уже более десяти лет для активного управления газовыми течения вблизи пограничного слоя аэродинамических поверхностей используются так называемые плазменные актуаторы, т. е. устройства, действие которых основано на использовании плазмы газового разряда на поверхности диэлектрика [1–5]. Плазменные устройства позволяют управлять ламинарно-турбулентным переходом и, как следствие, улучшать общую аэродинамику летательных аппаратов. Основное преимущество плазменных актуаторов состоит в отсутствии механических движущих частей, возможности электронного управления, быстром отклике и небольшом весе.

Потенциальные возможности актуаторов ограничены воздушными потоками с числом Рейнольдса 106 [1]. Однако, как показали исследования последних лет, работа плазменных актуаторов

может быть улучшена посредством изменения их конструкции и масштабированием устройств [6, 7]. Способствовать улучшению эффективности работы актуаторов можно также оптимальной подборкой источника высоковольтного питания газового разряда как по амплитуде, так и по частоте повторения и форме сигнала [8–10]. Как показано в работе [8], при подаче на электроды плазменного актуатора прямоугольных и синусоидальных импульсов наблюдается максимальная эффективность. При этом в случае прямоугольных импульсов потребляется в два раза большая мощность. Тем не менее, в исследованиях не прояснена до конца зависимость скоростных характеристик актуаторов от частоты повторения и амплитуды синусоидального сигнала, что, по-видимому, обусловлено отсутствием на рынке перестраиваемых по частоте высоковольтных генераторов синусоидальной формы.

Известные высоковольтные усилители мощности фирмы «Трек» с подобными характеристиками (напряжением до ± 10 кВ, током 100–300 мА) используют высоковольтные выходные каскады класса АВ, сконструированные на мощных МОП-транзисторах, соединённых по каскадной схеме. Такая схема, как правило, дает КПД не более 78 % [11]. При этом размеры этих приборов довольно громоздкие, а стоимость велика.

В данной статье описывается разработанный в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН генератор высоковольтного синусоидального

Мошкунов Сергей Игоревич, зам. директора, д.т.н.

Небогаткин Сергей Вячеславович, с.н.с., к.т.н.

Подгуйко Николай Андреевич, стаж.-иссл.

Хомич Владислав Юрьевич, директор, д.ф.-м.н., академик РАН.

Шершунова Екатерина Александровна, зав. лаб., к.т.н.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.
Тел. 8(499) 135-11-95. E-mail: snebogatkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 июня 2018 г.

© Мошкунов С. И., Небогаткин С. В., Подгуйко Н. А., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А., 2018

сигнала с перестраиваемой частотой, построенный по принципу усилителя класса D, заключающегося в импульсном управлении усилителем. При этом КПД усилителей класса D равен 90–95 % и мало зависит от выходной мощности [12].

Конструкция прибора

На рис. 1 представлена блок-схема высоковольтного генератора синусоидального напряжения. Питание осуществляется от бытовой сети 220 В с частотой 50 Гц. Принцип работы прибора основан, как уже сказано, на схеме усилителя мощности класса D. Основными элементами усилителя являются широтно-импульсный модулятор (ШИМ-модулятор) и инвертор. Регулировка частоты и амплитуды выходного сигнала осуществляется посредством изменения параметров сигнала внешнего низковольтного генератора синуса.

К выходу усилителя подключен высоковольтный повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 70 и расчетным КПД 98 %. Реализована полная гальваническая развязка схемы управления от силовой схемы прибора, а также обеспечена защита по среднему и пиковому току первичной обмотки трансформатора.

Инвертор собран по полумостовой схеме на биполярных транзисторах с изолированным затвором (рис. 2) [13]. Емкостной делитель напряжения создает искусственную нулевую точку источника питающего напряжения. В качестве источника питания инвертора был использован мостовой выпрямитель сетевого напряжения 220 В. Управление транзисторами осуществляется с помощью микросхемы изолирующего полумостового драйвера ADuM3223. Реализована обратная связь по напряжению.

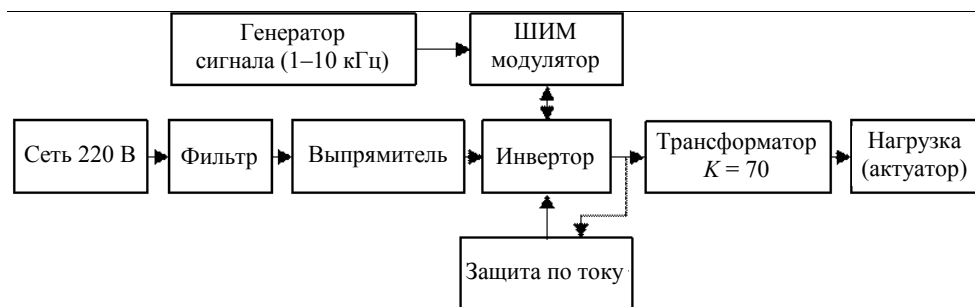


Рис. 1. Блок-схема высоковольтного генератора синусоидального напряжения.

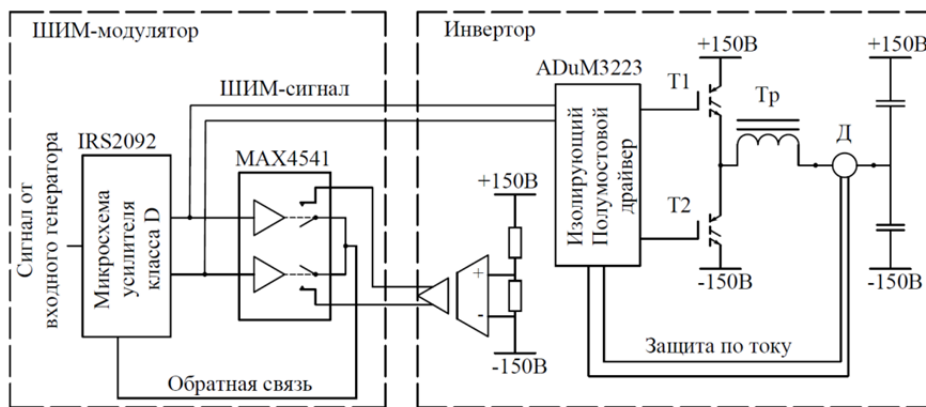


Рис. 2. Принципиальная схема работы усилителя.

Инвертор управляется с платы управления, которая представляет собой ШИМ-модулятор, разработанный на базе стандартной микросхемы усилителя мощности звуковой частоты класса D IRS2092. Имеется аналоговый вход, на который подаётся синусоидальный сигнал от низковольтного генератора (рис. 2). Микросхема генерирует

ШИМ-сигналы частотой 100 кГц, модулированные его входным сигналом. Далее модулированные сигналы поступают на драйвер транзисторов.

Для работы микросхемы необходима обратная связь по напряжению средней точки транзисторов, так как она предполагает автоколебательный режим работы. Чтобы реализовать гальва-

ническую развязку управления от силовой части, дополнительно был использован сдвоенный аналоговый ключ (MAX4541 на рис. 2), имитирующий работу силовых транзисторов для микросхемы. Ключ коммутирует напряжение, полученное путем кратного деления напряжения, питающего инвертор, что обеспечивает стабилизацию выходного сигнала по напряжению.

Чтобы получить высоковольтный синусоидальный сигнал, был рассчитан и намотан повышающий трансформатор. В конструкции использован броневой тип сердечника из феррита марки N87. Первичная и вторичная обмотки, а также все

слои вторичной обмотки изолированы друг от друга стеклотканью для предотвращения межмоточных пробоев. Экспериментально установлено, что трансформатор имеет коэффициент трансформации 70 и коэффициент связи обмоток 0,996.

Тестовые испытания

Разработанный высоковольтный генератор синуса был протестирован на емкостную нагрузку, в качестве которой выступал плазменный актуатор. Фотография и конструкция актуатора приведены на рис. 3.



Рис. 3. Фотография разряда горящего на актуаторе (слева) и поперечный разрез актуатора (справа).

Актуатор был выполнен в виде двусторонней печатной платы. Electroдами актуатора служили медные полоски шириной 3,5 и 5 мм толщиной 18 мкм. Барьером служил стеклотекстолит FR4 толщиной 1 мм. При подаче на электроды высокого напряжения возникал поверхностный барьерный разряд (см. рис. 3). Рассчитанная емкость актуатора примерно 20 пФ.

Были получены осциллограммы выходного напряжения в диапазоне частот 4–10 кГц и напряжений 5–10 кВ. На рис. 4 приведена типичная осциллограмма выходного напряжения, а также осциллограмма тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора при частоте колебаний 8 кГц (горизонтальная развертка 50 мкс/деление, вертикальная шкала 2 кВ/деление для напряжения и 4 А/деление для тока).

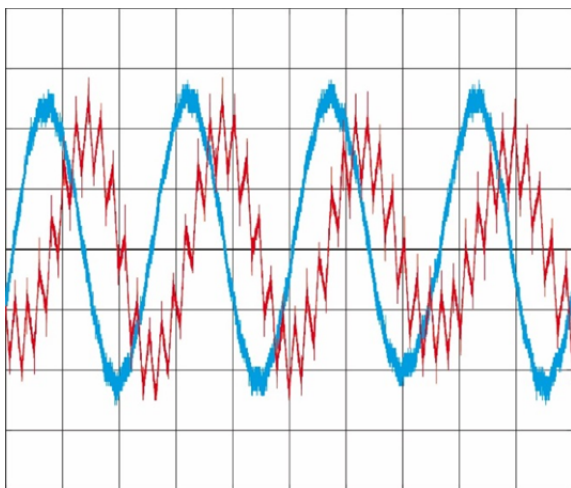


Рис. 4. Осциллограммы тока (красная линия) и напряжения (синяя линия).

Заключение

В статье описан разработанный генератор высоковольтных синусоидальных колебаний с регулируемой частотой в диапазоне частот 4–10 кГц и напряжений 5–10 кВ. Показано, что генератор может успешно работать на емкостную плазменную нагрузку. Заложенная максимальная выходная мощность генератора в 1 кВт позволяет масштабировать плазменные актуаторы и производить их исследование в широком диапазоне частот и напряжений.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-38-60194.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moreau E. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. Vol. 40. No. 3. P. 605.
2. Corke T. C., Enloe C. L., Wilkinson S. P. // Annual Review of Fluid Mechanics. 2010. Vol. 42. P. 505.
3. Мошкун С. И., Небогаткин С. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32.
4. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 6. С. 653.
5. Chernyshev S. L., Gamirullin M. D., Kuryachii A. P., Litvinov V. M., Manuilovich S. V., Rusyanov D. A., Khomich V. Y., Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Yamshchikov V. A. // Aerospace Science and Technology. 2016. Vol. 59. P. 155.
6. Benard N., Mizuno A., Moreau E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 235204.
7. Гамируллин М. Д., Курячий А. П., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Чернышев С. Л., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 95.
8. Kotsonis M., Ghaemi S. // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 110. No. 11. P. 113301.

9. Boucinha V., Jousset R., Magnier P., Weber R., Leroy-Chesneau A. / 14-th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. (Lisbon, Portugal, 07–10 July, 2008). 2008. P. 1352.

10. Massines F., Sarra-Bournet C., Fanelli F., Naude' N., Gherardi N. // Plasma Process. Polym. 2012. Vol. 9. No. 11-12. P. 1041.

11. Albullet M. RF power amplifiers – SciTech Publishing, 2001.

12. Olstein K. // IEEE Solid-State Circuits Magazine. 2011. Vol. 3. No. 2. P. 95.

13. Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 1. С. 104.

PACS: 84.30.Jc, 52.80.-s, 47.65.-d

High-voltage sine-wave generator with an adjustable frequency for plasma actuators supply

S. I. Moshkunov, S. V. Nebogatkin, N. A. Podguyko, V. Yu. Khomich, and E. A. Shershunova

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: snebogatkina@mail.ru

Received June 26, 2018

A high-voltage sine-wave generator with a variable frequency for plasma actuators supply was designed, manufactured and tested. The circuit of the D class amplifier was used. The frequency and amplitude was set by an external low-voltage sine generator. The main parameters are the followings: output power is up to 1 kW, amplitude of the output signal is up to 10 kV, frequency range is 4–10 kHz. The waveforms of the generator output voltage were obtained at a capacitive load at frequencies of 4–10 kHz.

Keywords: high voltage pulse generator, class-D amplifier, plasma actuator, electrohydrodynamic flow.

REFERENCES

1. E. Moreau, Journal of Physics D: Applied Physics **40** (3), 605 (2007).
2. T. C. Corke and C. L. Enloe, S. P. Wilkinson, Annual Review of Fluid Mechanics **42**, 505 (2010).
3. S. I. Moshkunov, S. V. Nebogatkin, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and V. A. Yamshchikov, Plasma Physics Reports **38** (13), 1040 (2012).
4. V. Y. Khomich and V. A. Yamshchikov, Physics-Uspexhi **187** (6), 653 (2017) [in Russian].
5. S. L. Chernyshev, M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, V. M. Litvinov, S. V. Manuilovich, D. A. Rusyanov, V. Y. Khomich, S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. A. Yamshchikov, Aerospace Science and Technology **59**, 155 (2016).
6. N. Benard, A. Mizuno, and E. Moreau, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 2352207 (2009).
7. M. D. Gamirullin, A. P. Kuryachii, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, S. L. Chernyshev, and V. A. Yamshchikov, Plasma Physics Reports, No. 5, 95 (2015).
8. M. Kotsonis and S. Ghaemi, Journal of Applied Physics **110** (11), 113301 (2011).
9. V. Boucinha, R. Jousset, P. Magnier, R. Weber, and A. Leroy-Chesneau, in Proc. 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon, Portugal, 07–10 July, 2008), p. 1352.
10. F. Massines, C. Sarra-Bournet, F. Fanelli, N. Naude, and N. Gherardi, Plasma Process. Polym. **9** (11-12), 1041 (2012).
11. M. Albullet, RF Power Amplifiers (SciTech Publishing, 2001).
12. K. Olstein, IEEE Solid-State Circuits Magazine **3** (2), 95 (2011).
13. S. I. Moshkunov, V. Y. Khomich, and E. A. Shershunova, Technical Physics Letters **44** (1), 84 (2018).