

УДК 533.9-115+613.163+621.311.6

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_31

EDN: KBEWMH

ПРИМЕНЕНИЕ СИГНАЛОВ С ШИМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач, Т. Ма

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

APPLICATION OF PWM SIGNALS TO GENERATE LOW-TEMPERATURE ATMOSPHERIC PLASMA

A.N. Osipov, Y.N. Kalenkovich, V.A. Rokach, T. Ma

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Аннотация. Рассматривается применение сигналов с широтно-импульсной модуляцией для генерации низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении в среде инертного газа. Представлены результаты исследований энергопотребления системы генерации низкотемпературной плазмы в зависимости от коэффициента заполнения, а также частоты следования импульсов. Установлены режимы функционирования системы, при которых достигается минимум потребления энергии, а также определены возможные способы управления генератором низкотемпературной плазмы.

Ключевые слова: *низкотемпературная плазма атмосферного давления, параметры управляющих сигналов для генерации плазмы, энергопотребление устройств формирования низкотемпературной плазмы атмосферного давления.*

Для цитирования: *Применение сигналов с ШИМ для генерации низкотемпературной атмосферной плазмы / А.Н. Осипов, Е.Н. Каленкович, В.А. Рокач, Т. Ма // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 31–38. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_31. – EDN: KBEWMH*

Abstract. The use of pulse-width modulated signals for generating low-temperature atmospheric plasma in an inert gas environment is studied. The results of studies of the energy consumption of a low-temperature plasma generation system depending on the fill factor, as well as the pulse repetition rate, are presented. The system operating modes are identified, in which the minimum energy consumption is achieved, and possible ways to control the low-temperature plasma generation system to obtain the necessary plasma properties are determined.

Keywords: *low-temperature atmospheric pressure plasma, parameters of control signals for plasma generation, energy consumption of devices for generating low-temperature atmospheric pressure plasma.*

For citation: *Application of PWM signals to generate low-temperature atmospheric plasma / A.N. Osipov, Y.N. Kalenkovich, V.A. Rokach, T. Ma // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 2 (55). – P. 31–38. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_31 (in Russian). – EDN: KBEWMH*

Введение

Современный этап развития общества характеризуется быстрым внедрением новых перспективных технологий, которые позволяют решать широкий круг задач в различных областях науки и техники. Одной из таких технологий является технология, основанная на использовании низкотемпературной атмосферной плазмы [1]–[3]. Сфера применения данной технологии достаточно обширна, основными наиболее важными областями являются микроэлектроника (производство изделий), оптика (обработка и нанесение покрытий), химическая промышленность и получение новых материалов (изменение свойств поверхности различных материалов неразрушающим способом), охрана окружающей среды (технологии очистки воды, воздуха и др.), биология и здравоохранение (аппаратура и технологии стерилизации и терапии) и другие. Преимуществами обработки в низкотемпературной плазме при атмосферном давлении являются

отсутствие необходимости в громоздких системах создания и поддержания вакуума, возможность работы с различного рода материалами, в том числе низкотемпературными полимерами и биологическими объектами, низкая стоимость оборудования в сравнении с вакуумно-плазменным оборудованием, мобильность и универсальность применения.

Одним из направлений совершенствования генераторов низкотемпературной атмосферной плазмы является применение специальных конструктивно-технологических и схемотехнических решений, позволяющих уменьшить габаритные размеры, потребляемую мощность, обеспечить стабильность режимов работы генераторов и др. В выпускаемых в настоящее время устройствах для генерации плазмы на разрядную систему подается высоковольтное синусоидальное напряжение. Вопросы применения для этих целей сигналов другой формы являются малоизученными. В современной электронной

аппаратуре для управления мощностью, поступающей в нагрузку, находят широкое применение сигналы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [4]. В связи с этим в данной статье исследуются вопросы применения сигналов, формируемых на основе ШИМ для генерации низкотемпературной атмосферной плазмы.

1 Материалы и методика проведения исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовался лабораторный макет, структурная схема которого показана на рисунке 1.1.

В состав макета входят следующие блоки: источник питания постоянного напряжения, высоковольтный преобразователь, генератор сигналов, разрядная система, регулятор расхода газа, баллон с инертным газом, регистратор параметров напряжения и тока с соответствующих измерителей для определения потребляемой мощности и осциллограф. Система формирования высоковольтного переменного напряжения (до 4 кВ) включает в себя источник питания постоянного тока с возможностью регулировки напряжения и тока соответственно в пределах от 0 до 30 В и от 0 до 10 А соответственно, высоковольтный преобразователь и генератор сигналов, способный

формировать сигнал с широтно-импульсной модуляцией с заданными параметрами.

Высоковольтный преобразователь построен на основе обратногоходового импульсного преобразователя [5] и состоит из высоковольтного импульсного трансформатора, транзисторного ключа, элементов защиты. Принципиальная схема преобразователя показана на рисунке 1.2.

Для контроля и регистрации режимов работы используются регистратор параметров тока и напряжения питания схемы, а также цифровой осциллограф. Так как один канал осциллографа подключается к высоковольтной части схемы, то для регистрации высоковольтного сигнала используется высоковольтный щуп-делитель напряжения 1 : 1000.

Непосредственное формирование плазмы осуществляется в разрядной системе коаксиального типа, через которую пропускается газ и на выходе формируется плазменный факел [6]. В качестве плазмообразующего газа используется аргон (^{18}Ar). Регулировка количества поступающего газа в разрядную систему осуществляется при помощи регулятора расхода газа. Для всех проводимых экспериментов выполнялось условие постоянства объема расхода инертного газа 25–26 л/ч.

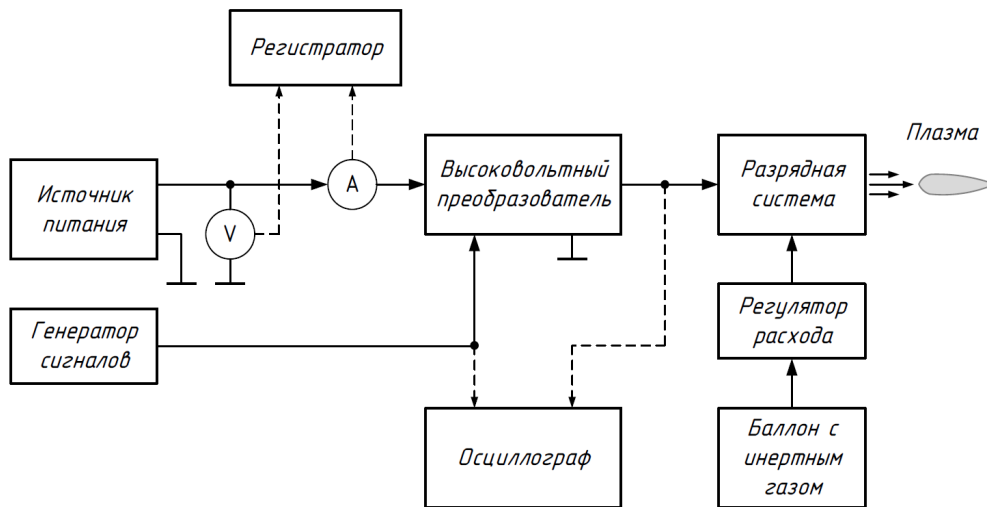


Рисунок 1.1 – Структурная схема лабораторного макета

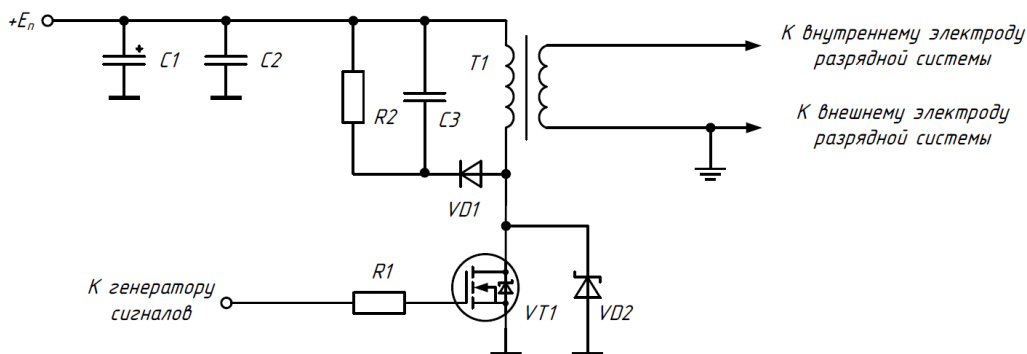


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема высоковольтного преобразователя

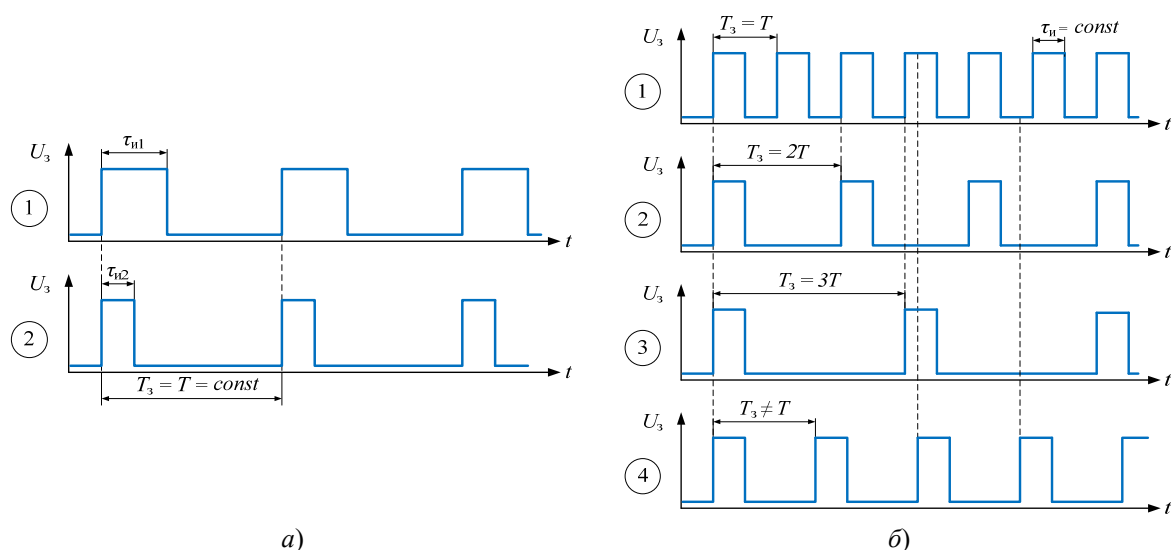
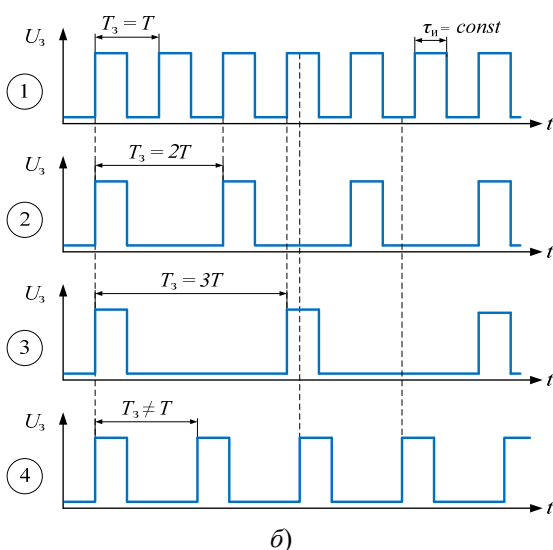


Рисунок 1.3 – Последовательность задающих импульсов, подаваемых на высоковольтный преобразователь

Известно [7], что повышающий трансформатор, электроды и другие элементы разрядной системы совместно с генерируемой плазмой образуют колебательный контур, который обладает резонансными свойствами. В связи с этим, в данной работе проведены исследования генерации плазмы в зависимости от частотно-временных параметров сигнала с ШИМ, подаваемого на разрядную систему. При этом эксперименты выполнялись в условиях обязательного горения плазмы без учёта её количественных и качественных характеристик и свойств (яркости свечения, габаритов и температуры факела и т. д.).

Так, на первом этапе экспериментов проводилось исследование влияния скважности задающих импульсов с ШИМ на энергопотребление устройства формирования плазмы на резонансной частоте $f_p = 1/T$. На высоковольтный преобразователь с генератора сигналов подавались задающие импульсы прямоугольной формы фиксированной амплитуды напряжения (рисунок 1.3, а). Коэффициент заполнения D сигнала с ШИМ (отношение длительности импульса к периоду следования импульсов, $D = (\tau_n / T_3) \cdot 100\%$) уменьшался от 50% (половина периода колебаний на частоте резонанса) до значения, при котором прекращалось видимое горение плазмы.

На втором этапе проводилось исследование работы устройства формирования плазмы, когда частота следования задающих импульсов не совпадала с частотой собственного резонанса образованного контура (рисунок 1.3, б). При этом длительность задающего импульса оставалась неизменной и равной $\tau_n = 1/(2f_p)$, т. е. половине периода колебаний на резонансной частоте. Частота следования задающих импульсов ШИМ сигнала изменялась от значения резонансной частоты ($\approx 48,8$ кГц) в сторону уменьшения.



При помощи регистратора фиксировались параметры напряжения и потребляемого тока, а также осуществлялось наблюдение формируемых сигналов на электродах разрядной системы при помощи цифрового осциллографа.

2 Исследование зависимости энергопотребления устройства формирования плазмы от коэффициента заполнения ШИМ сигнала на частоте резонанса

При подаче на затвор полевого транзистора VT1 задающих импульсов с генератора сигналов с коэффициентом заполнения 50% (меандра) на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора (на электродах разрядной системы) будут наблюдаться незатухающие колебания синусоидальной формы (рисунок 2.1, а). Уменьшение коэффициента заполнения ШИМ сигнала приводит к уменьшению напряжения наблюдаемого сигнала U_c на электродах, как показано на рисунке 2.1, б. Для приведенных на рисунке осциллограмм при снижении коэффициента заполнения до 25% амплитуда сигнала уменьшилась на 40%.

На рисунке 2.2 показаны графики зависимости потребляемой генератором мощности от коэффициента заполнения задающего ШИМ сигнала на частоте резонанса при различных напряжениях питания.

Как видно из представленных графиков, уменьшение коэффициента заполнения приводит к уменьшению потребляемой мощности. При достижении определенного коэффициента заполнения ШИМ сигнала происходило погасание факела плазмы, и свечение разряда в разрядной системе не наблюдалось. Для напряжений питания 18, 15 и 12 В минимальный коэффициент заполнения, при котором ещё наблюдалось свечение плазмы, составил соответственно 7, 9 и 14%.

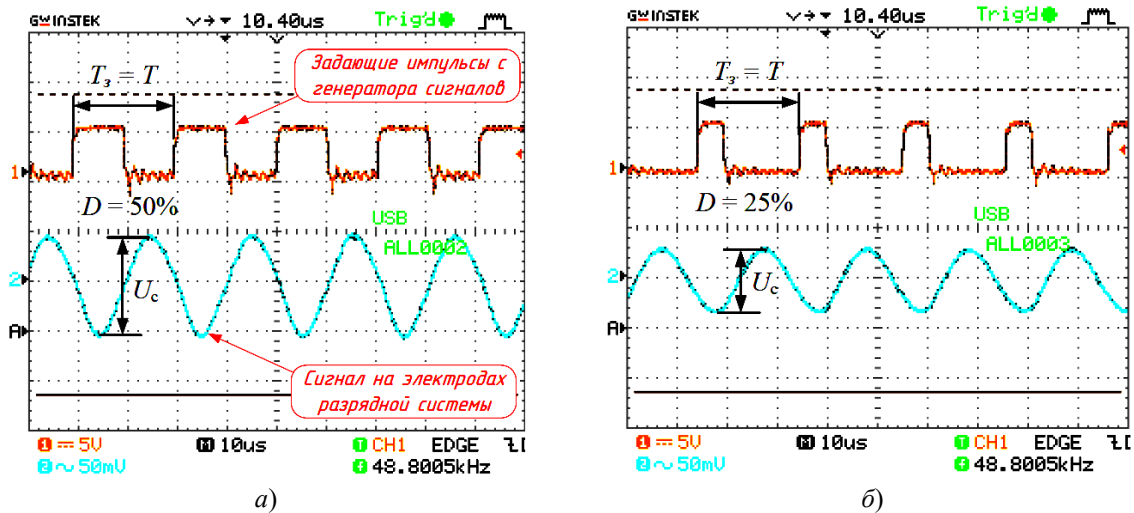


Рисунок 2.1 – Осциллограммы напряжений на выходе генератора сигналов и на электродах разрядной системы при различных значениях коэффициента заполнения задающего ШИМ сигнала

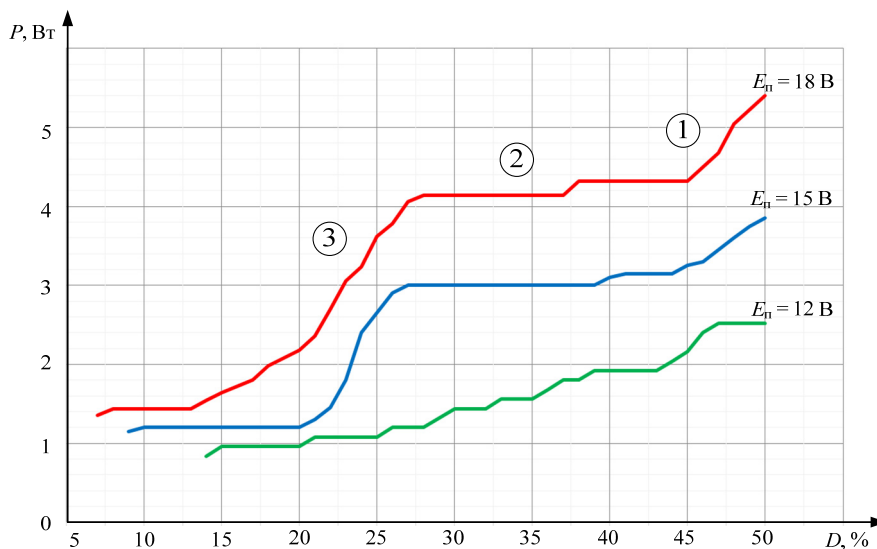


Рисунок 2.2 – Зависимость потребляемой мощности генератором от коэффициента заполнения задающего ШИМ сигнала

На графиках следует выделить три участка, характеризующих различные, с точки зрения энергопотребления, режимы работы устройства. На участке 1 мощность, потребляемая генератором, уменьшается с уменьшением коэффициента заполнения D . На втором участке мощность практически не изменяется. На третьем участке также происходит снижение потребляемой мощности при уменьшении коэффициента заполнения D .

Таким образом, изменение длительности импульса на резонансной частоте, подаваемого на высоковольтный преобразователь, позволяет обеспечить возможность работы генератора в различных режимах энергопотребления.

Длительность импульса ШИМ сигнала определяет энергию, передаваемую атомам инертного газа для перехода в ионизированное состояние,

и определяется параметрами выходного колебательного контура (коэффициента трансформации высоковольтного трансформатора, параметров магнитной проницаемости сердечника, добротности колебательного контура и др.).

3 Исследование периодически затухающих сигналов для генерации атмосферной холодной плазмы

Известно, что при подаче на вход колебательного контура одиночного прямоугольного импульса в резонансной системе возникают затухающие колебания с частотой, равной резонансной частоте f_p [8]. При подаче периодической последовательности задающих импульсов (рисунок 1.3, б) с коэффициентом заполнения меньше 50% на электродах разрядной системы возникают периодически затухающие колебания

(рисунок 3.1). Длительность периодически затухающего колебания зависит от добротности резонансной системы Q и может быть определена через логарифмический декремент затухания λ [8].

Для исследуемой системы измеренный логарифмический декремент затухания составил $\lambda \approx 0,65$.

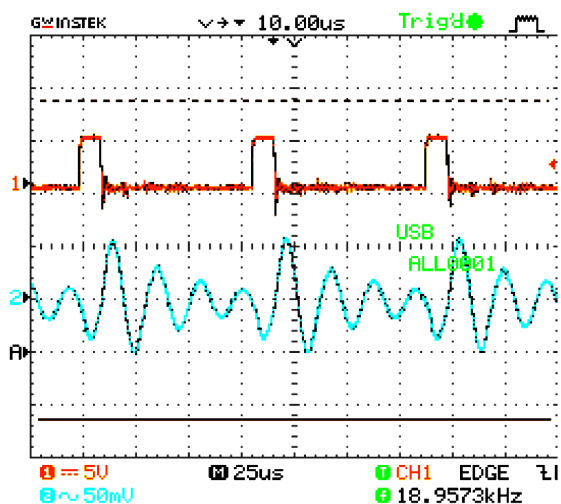


Рисунок 3.1 – Затухающие колебания на электродах разрядной системы

Соотношение длительности задающего импульса τ_n и его периода следования T_3 , определяющее момент поступления энергии импульса в контур при наличии свободно затухающих колебаний, в значительной степени влияет на эффективность использования сигналов с ШИМ для генерации плазмы. Так, на рисунке 3.2 представлены осциллограммы задающих импульсов с различными значениями периода следования и соответствующие им осциллограммы напряжений на электродах разрядной системы. Длительность задающего импульса оставалась постоянной и равной $\tau_n = 1/(2f_p) = const$. На рисунках 3.2, а, б и в периоды следования задающих импульсов соответственно равны $T_{31} = \frac{1}{f_p}$, $T_{32} = \frac{2}{f_p}$

и $T_{33} = \frac{4}{f_p}$. Количество периодов свободно затухающих колебаний для этих случаев равно 0, 1 и 3 соответственно. При этом амплитуда напряжения затухающего колебания в момент прихода нового импульса равна нулю. То есть, конечная фаза затухающих колебаний и начальная фаза задающих импульсов совпадает. Это обеспечивает максимальную начальную амплитуду напряжения возбужденных затухающих колебаний.

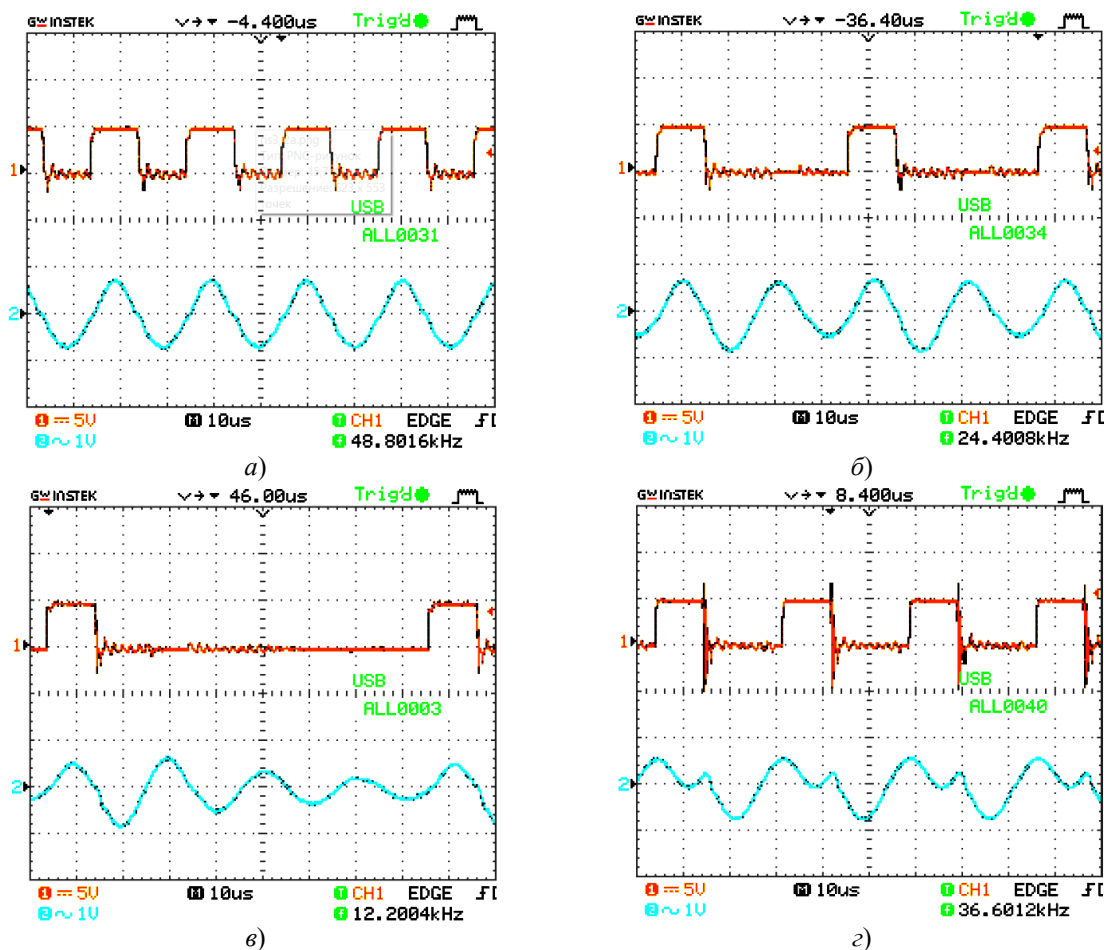


Рисунок 3.2 – Осциллограммы сигналов

Из приведенной на рисунке 3.2, z временной диаграммы следует, что в зависимости от частоты задающих импульсов начальная фаза нового колебания может не совпадать с конечной фазой свободно затухающего колебания. Это приводит к тому, что часть энергии поступающих импульсов тратится на перезаряд реактивных элементов выходного колебательного контура и ведет к дополнительным затратам энергии.

Следовательно, применение сигналов ШИМ с параметрами $\tau_n = 1/(2f_p)$ также может обеспечить уменьшение затрат энергии на генерацию плазмы при работе с периодом следования задающих импульсов большим, чем при работе на частоте резонанса выходного контура разрядной системы. Кроме того, следует отметить, что устойчивое горение плазмы обеспечивается при увеличении периода следования импульсов до некоторого значения $T_3 = T_{3max}$ (рисунок 3.3). Этот критический (максимальный) период задающих импульсов определяется максимальной амплитудой (уровнем) U_{cmin} последнего периода

затухающих колебаний, при котором энергии достаточно для возбуждения плазмы, и зависит от декремента затухания. Чем больше декремент затухания λ , тем быстрее расходуется энергия, запасенная в контуре и, следовательно, меньше T_{3max} .

На рисунке 3.4 представлена зависимость потребляемой мощности от частоты следования задающих импульсов ШИМ сигнала при $E_{II} = 18В$ и $\tau_n = 1/(2f_p) = const$. Частота сигнала с ШИМ изменялась от 1 (коэффициент заполнения равен 1,02%) до 60 кГц (коэффициент заполнения – 61,5%).

Как видно из графика, представленная зависимость имеет несколько локальных минимумов потребляемой мощности. Они наблюдаются на резонансной частоте $f_p = 48,8$ кГц и на частотах, равных $f_{1min} = f_p / 2 = 24,4$ кГц, $f_{2min} = f_p / 3 = 16,3$ кГц, $f_{3min} = f_p / 4 = 12,2$ кГц и $f_{4min} = f_p / 5 = 9,76$ кГц. На данных частотах локальных минимумов потребляемой мощности f_{imin} начальная фаза

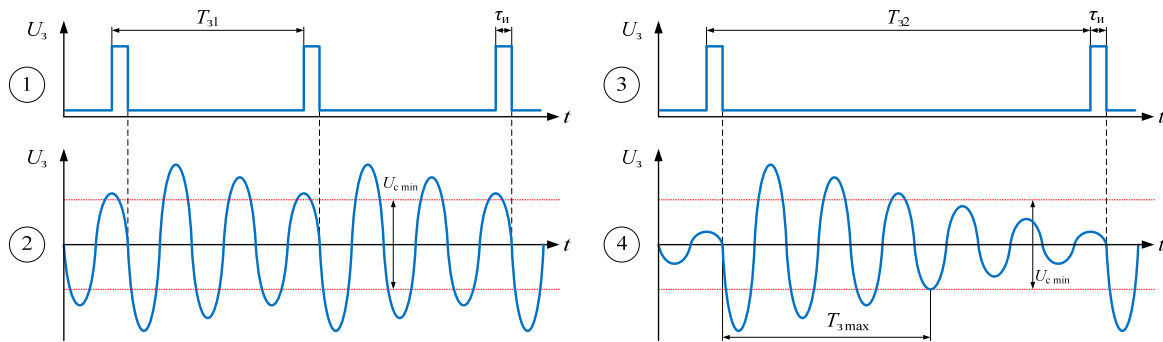


Рисунок 3.3 – Временные диаграммы для периодических затухающих сигналов

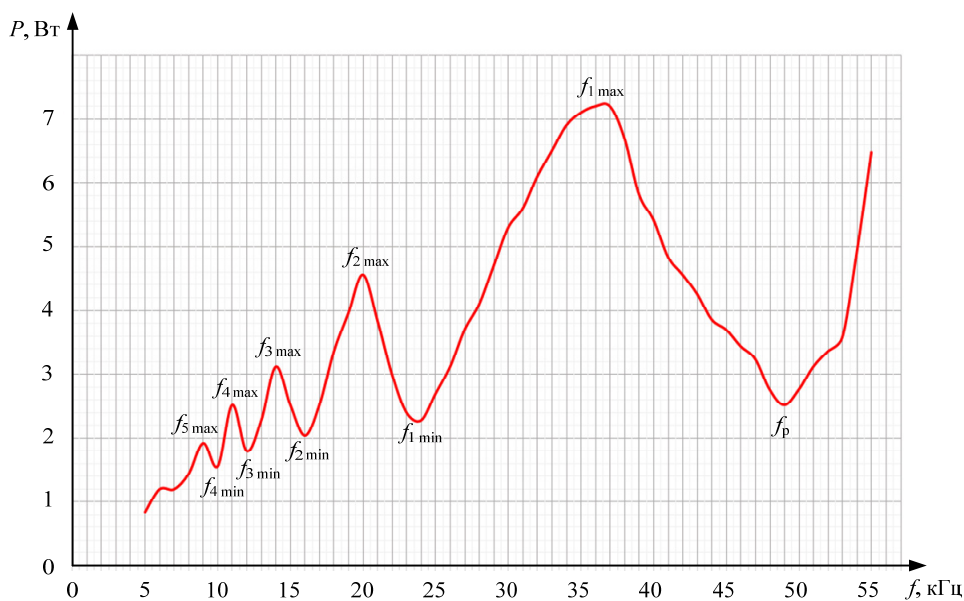


Рисунок 3.4 – Зависимость потребляемой мощности от частоты сигнала с ШИМ

задающих импульсов совпадает с конечной фазой периодически затухающих колебаний. Количество периодов свободно затухающих колебаний (без учёта первого периода вынужденного колебания) соответствует $f_p / f_i - 1 = n - 1$.

Частоты f_i могут использоваться в качестве рабочих частот генератора плазмы. Максимальное число n определяется из условия наличия горения плазмы. Как следует из графика, генерация плазмы на частотах f_i приводит к уменьшению потребляемой мощности, при этом с уменьшением значений частот f_i наблюдается уменьшение значений потребляемой мощности. Так, использование для генерации плазмы частоты $f_{3\min} = 12,2$ кГц вместо частоты резонанса $f_p = 48,8$ кГц привело к снижению потребляемой мощности на 29%.

Помимо локальных минимумов потребляемой мощности имеются и локальные максимумы потребляемой энергии на частотах $f_{1\max} = 36,6$ кГц, $f_{2\max} = 20,3$ кГц, $f_{3\max} = 14,2$ кГц, $f_{4\max} = 10,98$ кГц и $f_{5\max} = 9$ кГц. Это объясняется тем, что на данных частотах разность фаз между свободно затухающим колебанием и началом вынужденного составляет π . Несовпадение фаз колебаний приводит к дополнительным потерям в выходном контуре и возрастанию энергопотребления генератором. Генерация плазмы на частотах выше частоты резонанса f_p характеризуется увеличением коэффициента заполнения D более 50% и, соответственно, приводит к увеличению потребляемой мощности.

Для определения эффективной полосы частот следования задающих импульсов с ШИМ, обеспечивающих энергоэффективные режимы работы вблизи основной частоты резонанса f_p , и для частот локальных минимумов потребляемой мощности $f_{i\min}$ воспользуемся известным определением полосы пропускания колебательного контура [8] (3.1):

$$\Delta f_{i\min} = \frac{f_p \cdot \lambda}{2\pi n}. \quad (3.1)$$

Тогда условия выбора частоты сигнала с ШИМ определяются из (3.2):

$$f_i = \frac{f_p}{n}, n = 1, 2, \dots; \\ f_i - \frac{f_p \cdot \lambda}{4\pi n} \leq f \leq f_i + \frac{f_p \cdot \lambda}{4\pi n}. \quad (3.2)$$

При выборе частоты $f_{i\min}$ локального минимума потребляемой мощности с увеличением числа периодов свободно затухающих колебаний (с ростом n) наблюдается уменьшение соответствующей эффективной полосы частот.

Таким образом, применение затухающего напряжения на электродах разрядной системы, сформированных на основе сигналов с ШИМ, позволяет производить управление режимами работы генератора плазмы.

Заключение и выводы

Таким образом, в данной работе исследовано применение сигналов с ШИМ для возбуждения низкотемпературной атмосферной плазмы.

Потребляемая генератором плазмы мощность на резонансной частоте в значительной степени зависит от выбора значения коэффициента заполнения. Имеется диапазон значений коэффициента заполнения D , для которого характерно постоянство потребляемой мощности. Остальные диапазоны характеризуются уменьшением потребляемой мощности с уменьшением D .

При использовании сигналов с ШИМ при коэффициенте заполнения меньше 50% и частотой меньше резонансной на электродах разрядной системы возникают периодические затухающие колебания. Зависимость потребляемой мощности от частоты сигнала с ШИМ характеризуется наличием локальных минимумов и максимумов.

Предложены и обоснованы соотношения для выбора частоты следования сигналов с ШИМ, которые обеспечивают энергоэффективные режимы работы генератора плазмы.

Полученные результаты могут быть использованы для управления режимами работы генератора низкотемпературной атмосферной плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Review of the cold atmospheric plasma technology application in food, disinfection, and textiles: A way forward for achieving circular economy* / Reema, R.R. Khanikar, H.K. Bailung, K. Sankaranarayanan // *Front. Phys.* 10:942952. – 2022. – Vol. 10. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. *Th. Von Woedtke. Clinical plasma medicine: State and perspectives of in vivo application of cold atmospheric plasma* / H.-R. Metelmann // *Contrib. Plasma Phys.* / K.D. Weltmann. – UK: *British Medical Journal*, 2014. – P. 104–117.
3. *Cold atmospheric plasma technology for removal of organic micropollutants from wastewater – a review* / A. Kumar [et al.] // *The European Physical Journal. D.* – 2021. – Vol. 75. – Article number: 283. – DOI: <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00283-5>.
4. *Иццоки, Я.С. Импульсные и цифровые устройства* / Я.С. Иццоки, Н.И. Овчиников. – Москва: «Советское радио», 1972. – 592 с.
5. *Мэк, Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению* / Р. Мэк; пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.

6. *Effects of Dielectric Tube Shape and Pin-Electrode Diameter on the Plasma Plume in Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet* / H.R. Kang [et al.] // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2017. – № 45. – P. 691–697.

7. *Development of a High-Power-Factor Power Supply for an Atmospheric-Pressure Plasma Jet* / C.-F. Su [et al.] // *Electronics.* – 2021. – № 10. – P. 2119. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10172119>.

8. *Гоноровский, И.С. Радиосигналы и переходные явления в радиоцепях* / И.С. Гоноровский. – Москва: Связьиздат, 1954. – 326 с.

Поступила в редакцию 03.05.2023.

Информация об авторах

Осипов Анатолий Николаевич – к.т.н, доцент
Каленкович Евгений Николаевич – ст. преподаватель
Рокач Валерий Александрович – магистрант
Ма Тяньбао – аспирант