

ПРИНЦИПИ ТА РІШЕННЯ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ЖИВЛЕННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМОВИХ АКТУАТОРІВ

Анотація. Для забезпечення контрольованого та стабільного діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора потрібен як відповідний пристрій генерації високої різниці потенціалів з можливістю керування значенням потенціалу та частоти, так і спеціальна вимірвальна техніка, здатна працювати в цих умовах.

В статті розглянуто конструкцію регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу.

Проведено серію лабораторних досліджень на працездатність всіх її елементів та модулів. Конструкція показала свою працездатність і може бути використана в серії лабораторних досліджень з керування плазмових актуаторів.

Ключові слова: high voltage power supply, plasma actuator, Dielectric Barrier Discharge (DBD).

Постановка проблеми. Перспективні напрями розвитку авіаційної техніки вимагають використання нетрадиційних методів впливу на аеродинамічний потік. Одним з таких методів є використання плазмових актуаторів [1–3]. Як теоретичні дослідження, так і експериментальна випробування демонструють можливість поширення діапазону ламінарної течії, збільшення кута атаки без зриву потоку та множини інших явищ [4,5]. Теоретичні методи моделювання цієї складної системи отримали суттєвий розвиток [1,3,6]. При цьому слід відмітити як різноманітність факторів у процесі моделювання, так і велику кількість ресурсів, які потрібні для процесу моделювання. Не менш суттєва кількість ресурсів потрібна і для експериментальних досліджень в цьому напрямку [5,6], враховуючи як різноманітність явищ, що проявляють себе в цих процесах, так і суттєву різницю у характерних часових інтервалах, притаманних процесам, що потребують дослідження.

Для забезпечення контрольованого та стабільного діелектричного бар'єрного розряду потрібен відповідний пристрій генерації високої різниці потенціалів з можливістю керування значенням потенціалу та частоти, а також спеціальна вимірвальна техніка, яка здатна працювати в цих умовах. Тому задача створення керованої високовольтної системи живлення для дослідження діелектричного бар'єрного розряду є актуальною.

Методи та матеріали.

Модуль для вимірювання високої напруги високої частоти. Для того щоб вимірювати безпечно високу напругу високої частоти було розроблено модуль, який представлено на рис. 1. Цей модуль з зовнішнім резистором номіналом в $1\text{ G}\Omega$ дозволяє вимірювати напругу в діапазоні $0 - 15\text{ kV}$. При цьому розроблений модуль може вимірювати як змінну, так і постійну високу напругу. Максимальна частота на якій він може працювати 100 kHz . На максимальну частоту впливає його 2 параметри, а саме – смуга пропускання та вхідна ємність.

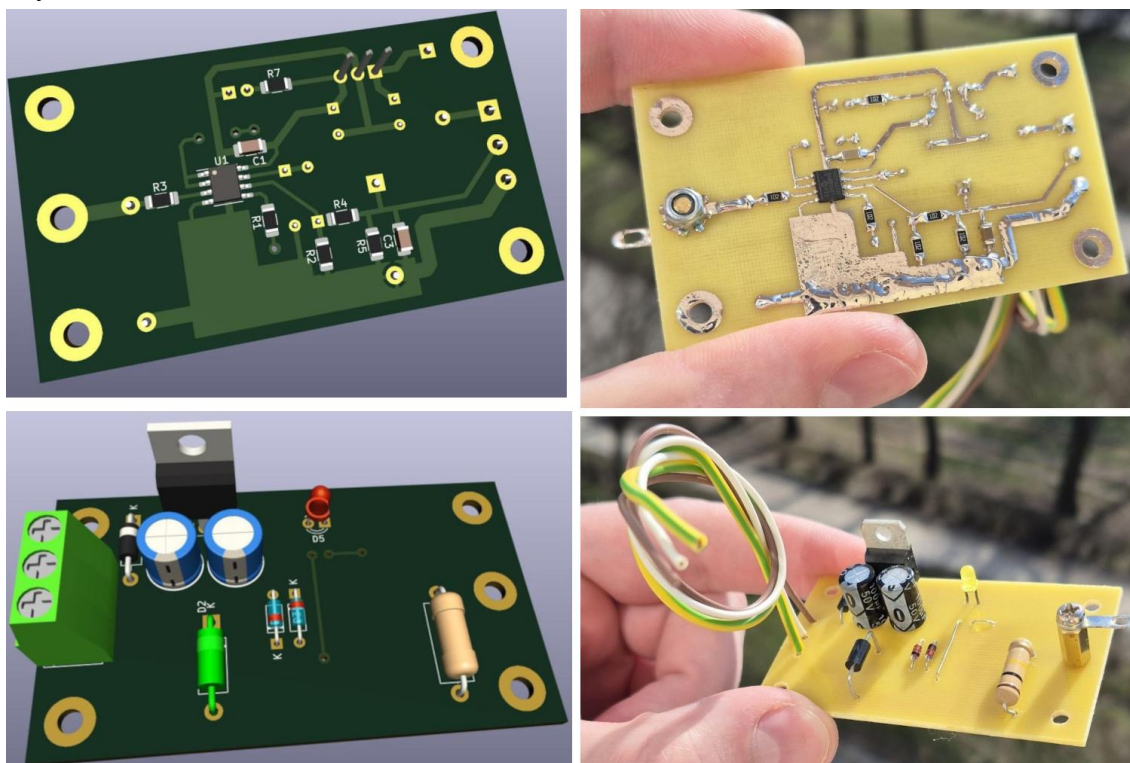


Рисунок 1 – Модуль для вимірювання високої напруги високої частоти

На виході модуля вже безпечна напруга, яку можна вимірити за допомогою мультиметру або ЦАП. Залежність перетворення вхідної напруги до вихідної 10 kV на 1 V , тобто на кожний 1 kV напруги на виході буде 0.1 V .

Схема модулю представлено на рис. 2. Основою схеми цього модулю є операційний підсилювач – МСР6002. Його вибір обумовлений малою вхідною ємністю за рахунок вхідного каскаду на польових транзисторах, а також смугою пропускання до 1 MHz . Оскільки для дослідів цей модуль буде використовуватись на частотах до 100 kHz , параметри цього операційного підсилювача є достатніми. Цей операційний підсилювач потребує живлення 5 V . Для їх забезпечення використано стабілізатор LM7805 та конденсатори C2, C4, C1, а також діод D4 для захисту від неправильної полярності живлення.

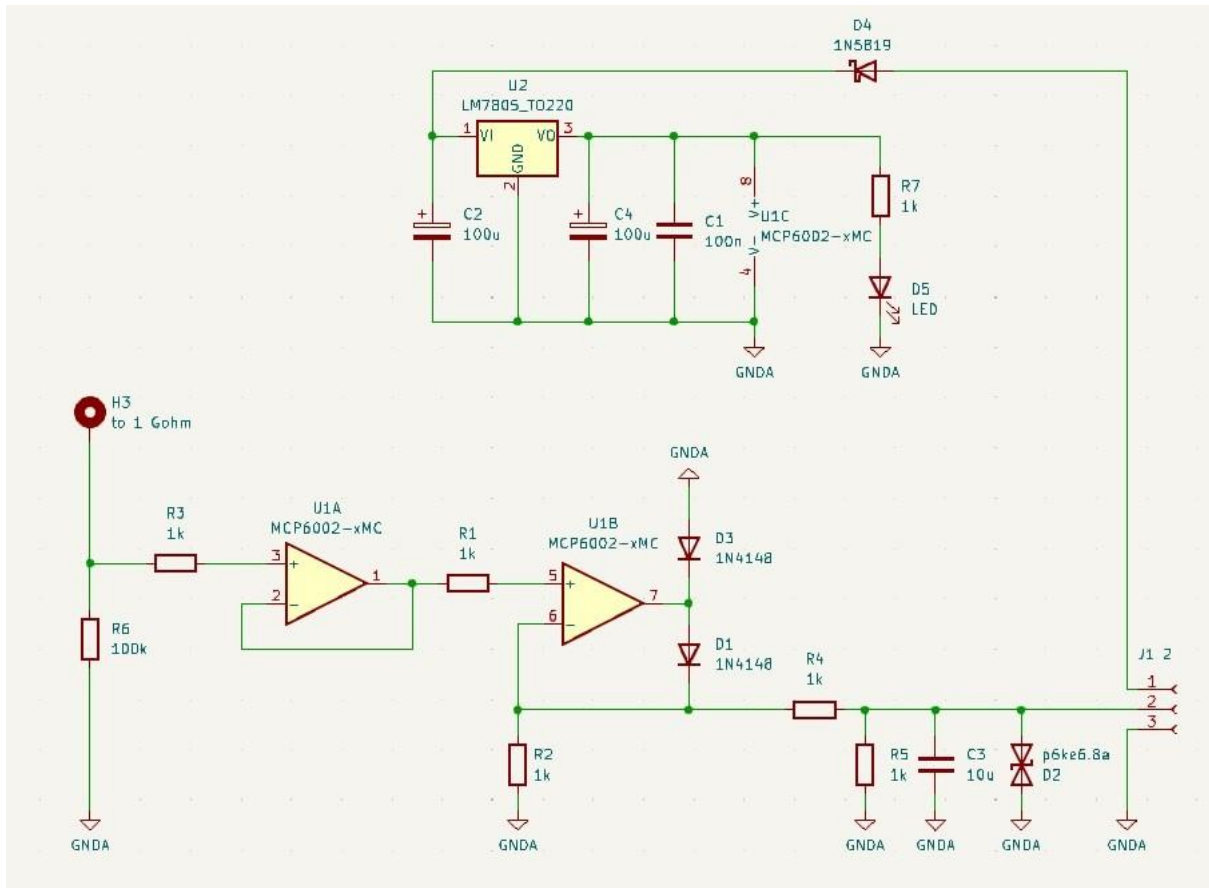


Рисунок 2 – Схема модуля для вимірювання високої напруги високої частоти

Висока напруга, як постійна, так і змінна поступає через зовнішній резистор номіналом в $1\text{ G}\Omega$, який знаходиться на ізольованих стійках та після припаювання покривається уретановим лаком. Резистор в $1\text{ G}\Omega$ разом з резистором R_6 номіналом в $100\text{ k}\Omega$ утворює резистивний дільник напруги. Для зменшення впливу вхідного опору системи вимірювання, враховуючи великий вихідний опір цього дільника використано буфер на операційному підсилювачі. Цей буфер компенсує вихідний опір дільника напруги і дозволяє з меншою похибкою вимірювати цей сигнал. Резистори R_3 та R_1 використовуються для придушення самозбудження і генерацій, вони працюють як фільтр низької частоти з вхідною ємністю операційного підсилювача. На другому операційному підсилювачі побудовано схему «ідеального» напівперіодного випрямлення.

У багатьох пристроях обробки аналогових сигналів, наприклад у вимірювальних схемах, необхідно виділення або складових тільки однієї полярності (однопівперіодне випрямлення), або визначення абсолютного значення сигналу (двонапівперіодне випрямлення). Ці операції можуть бути реалізовані на пасивних діодно-резистивних ланцюгах, але відносно велике пряме падіння напруги на діодах ($0.3 - 1\text{ V}$) і нелінійність їх вольт-амперних характеристик вносять в цьому випадку значні похибки, особливо при обробці слабких сигналів. Тому також застосування операційних підсилювачів дозволяє значною мірою послабити вплив реальних характеристик діодів.

Схема напівперіодного випрямлення на операційному підсилювачі включає в себе сам операційний підсилювач, 2 швидкодіючі діоди D_1 та D_3 типу 1N4148 та резистор

R2. Для калібрування по зразковому вимірювачу напруги є вихідний дільник на резисторах R4 та R5. Конденсатор 3 разом з резистором R4 утворює фільтр низької частоти на якому формується постійна напруга для подальшого вимірювання зовнішнім ЦАП або мультиметром. Для захисту пристроїв вимірювання, що буде поєднано до виходу модулю використано двонапрявлений супресор P6KE6.8A.

Оскільки вимірювання відбувається відносно великої напруги і використовується досить великий опір верхнього плеча дільника напруги по входу буферу не ставиться захист у вигляді діодної виделки або стабілітронів або супресорів. Справа в тому, що їх струм витoku призводить до суттєвих похибок у вимірах. Також їх ємність додається до вхідної операційного підсилювача, що зменшує максимальну можливу частоту виміру. Також плата цього модуля обов'язкова має бути ретельно вимита від флюсу і покрита ізоляційним лаком з 2 сторін.

Розглянутий модуль було перевірено на напрузі до 12 kV, на частотах від 10 до 60 kHz. Вимірювання показали працездатність схеми.

Модуль для вимірювання змінного високочастотного струму під високою напругою. Для вимірювання змінного високочастотного струму під високою напругою було прийнято рішення використовувати трансформатор струму. Його використання має для задачі вимірювання струму високої напруги велику перевагу – гальванічну розв'язку.

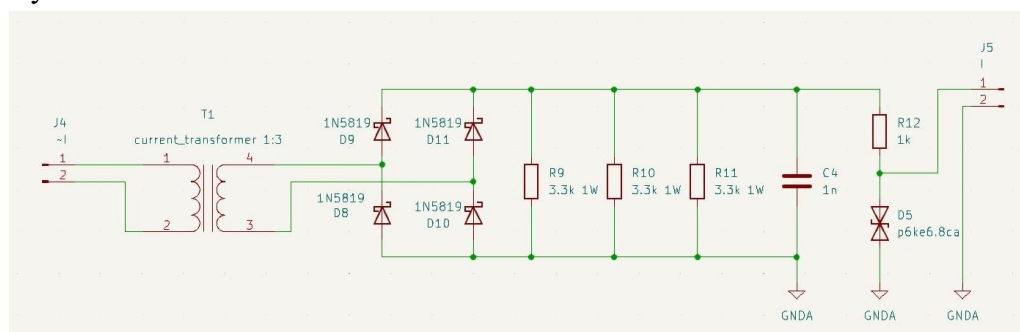


Рисунок 3 – Схема модулю для вимірювання змінного струму під потенціалом високої напруги

Схема модулю представлено на рис. 3. Її основою є трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації 1 до 3. Далі для випрямлення використано діодний місток на діодах Шотткі 1N5819 та шунт навантаження трансформатору струму. Шунт складається з 3 резисторів R9, R10 та R11, які стоять паралельно для збільшення сумарної потужності. Також паралельно їм стоїть конденсатор C4 для придушення шумів. Для захисту від перенапруги вимірюючих приладів, що під'єднуються до модулю, використано резистор R12 та супресор P6KE6.8A.

Модуль побудовано на платі з склотекстоліту товщиною 5 мм, при тому усі деталі закріплені на монтажних стійках. Сам трансформатор струму виконано із феритового кільця марки N78 (рис. 4). Достатньо великий розмір (зовнішній діаметр 30 мм) було обрано як для того, щоб встановити достатню електричну ізоляцію фазного дроту висковольтної обмотки, а також для зменшення можливості насичення.

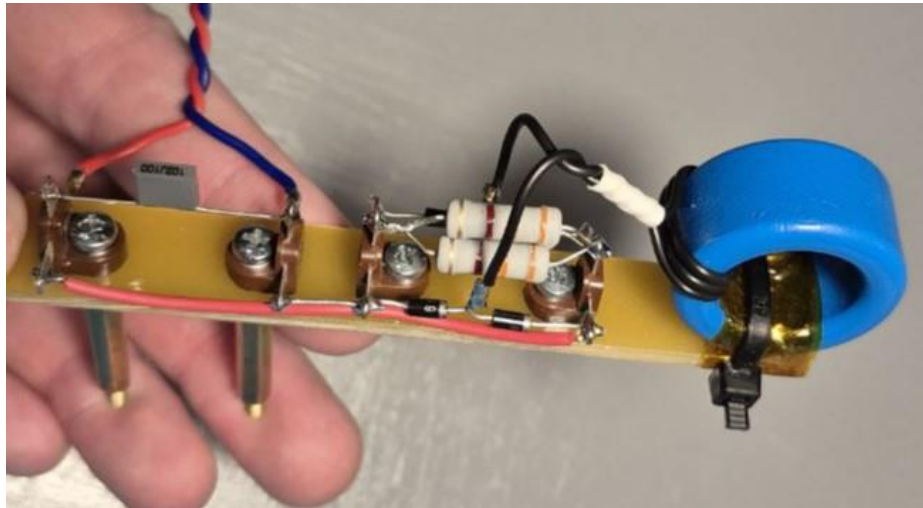


Рисунок 4 – Модуль вимірювання змінного струму під потенціалом високої напруги

Модуль було перевірено на напрузі до 12 kV, на частотах від 10 до 60 kHz. При цьому вимірювався струм на резисторах 1, 5, та 10 M Ω , які забезпечували навантаження, притаманне обраному розміру плазменного актуатора. Схема показала працездатність, при цьому максимальний струм сягав був 3 mA.

Регульоване джерело високої напруги з можливістю регулювання частоти. Для дослідів було необхідно джерело змінної високої напруги, що при цьому може змінювати і частоту. Також було важливо, щоб вихідний сигнал був близький до синусу, тому було обрано топологію push-pull, з фіксованим коефіцієнтом заповнення 50%. Меандр після великої індуктивності вторинної високовольтної обмотки виглядає досить близько до гармонічного сигналу.

Схема, яку представлено на рис. 5, побудовано на сучасному PWM контролеру SG3524, який в схемі окрім керування ключами бере на себе ще й функції захисту.

В якості високовольтного трансформатора використано трансформатор рядкової розгортки електро-променевого монітору. Параметри його обмоток дають можливість отримати змінну напругу до 10 kV. Первинна обмотка (2 напів обмотки по 6 витків) мотається на феритовому сердечнику дротом 1 mm.

Для комутації первинної обмотки з середньою точкою використано два польових MOSFET транзистора IRF3205. Для зменшення паразитних коливань при перемиканні ключів паралельно стоку та істоку транзисторів стоять снаберні ланцюги із резисторів і конденсаторів C9, C10 та резисторів R18 та R19 відповідно. Затвори транзисторів підтягнуті до потенціалу землі резисторами 1.2 k Ω . Послідовно з затворами стоять резистори R13, R14 10 Ω . Значення їх опору підібрано під найкращу форму сигналу на затворах. Також вони виконують функцію захисту драйверу.

В якості драйверу польових транзисторів було обрано IR4427, так як цей драйвер за рахунок досить значного максимально вихідного струму в 6 A може легко відкривати та закривати затвори IRF3205 з ємністю 3.2 nF. Також в драйвері є UVLO захист, тому транзистори відкриваються напругою, що забезпечує їх ключовий режим.

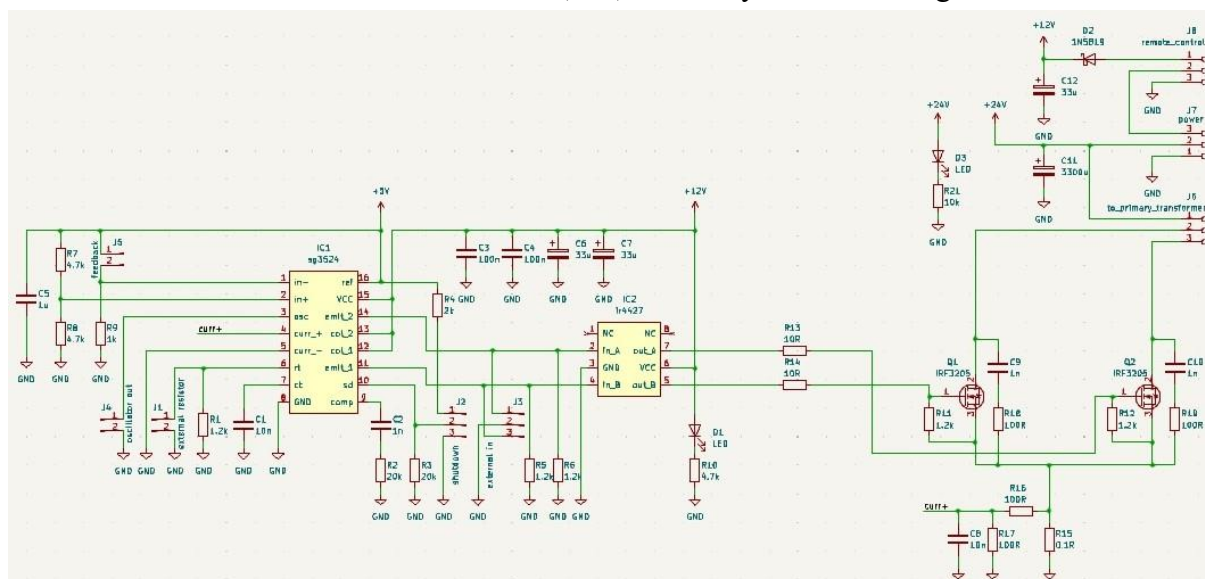


Рисунок 5 – Схема регульованого джерела змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти

Захист від занадто високого рівня струму через ключі побудовано на PWM контролеру SG3524 та його штатному компараторі перевищення струму. Сигнал на його компаратор береться з шунта R15 0.1 Ω , через який під'єднано транзистори до потенціалу землі. Для встановлення потрібного струму спрацювання захисту стоїть також дільник на резисторах R16 та R17. Ними можна виставити бажаний струм спрацювання. Конденсатор C8 та резистор R16 виконують функцію фільтра низької частоти для придушення шуму у сигналі, що йде на «компаратор струму» SG3524.

За рахунок резисторів R7 та R8 виставлено фіксований коефіцієнт заповнення 50%, проте в схемі залишена можливість зробити регулювання цього параметра по виводу «feedback».

Для захисту схеми від перегріву транзисторів, а також для того щоб можна було зробити зовнішні схеми захисту використано спеціальний вивід SG3524 – «shutdown». При подачі логічного сигналу 5 V на вивід, контролер вимикає подачу сигналів керування ключів.

Регулювання частоти зроблено за рахунок змінного багато обертового резистору номіналом 10 k Ω в ланцюзі RC генератору, та резисторів, що обмежують повний діапазон змін. Для цієї задачі налаштування частоти реалізовано в діапазоні 10 – 60 kHz.

Регулювання вихідної високої напруги робиться за рахунок змінення напруги шини живлення силової топології push-pull. Для цього використано стандартний асинхронний буск конвертор на мікросхемі XL4016E.

Плату регульованого джерела змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти представлено на рис. 6. При зміні напруги шини живлення силової топології push-pull від 1.25 – 30 V на виході трансформатора напруга змінювалась у діапазоні 0 – 8 kV під навантаженням резисторів 5 M Ω та 10 M Ω , якими схема показала свою працездатність.

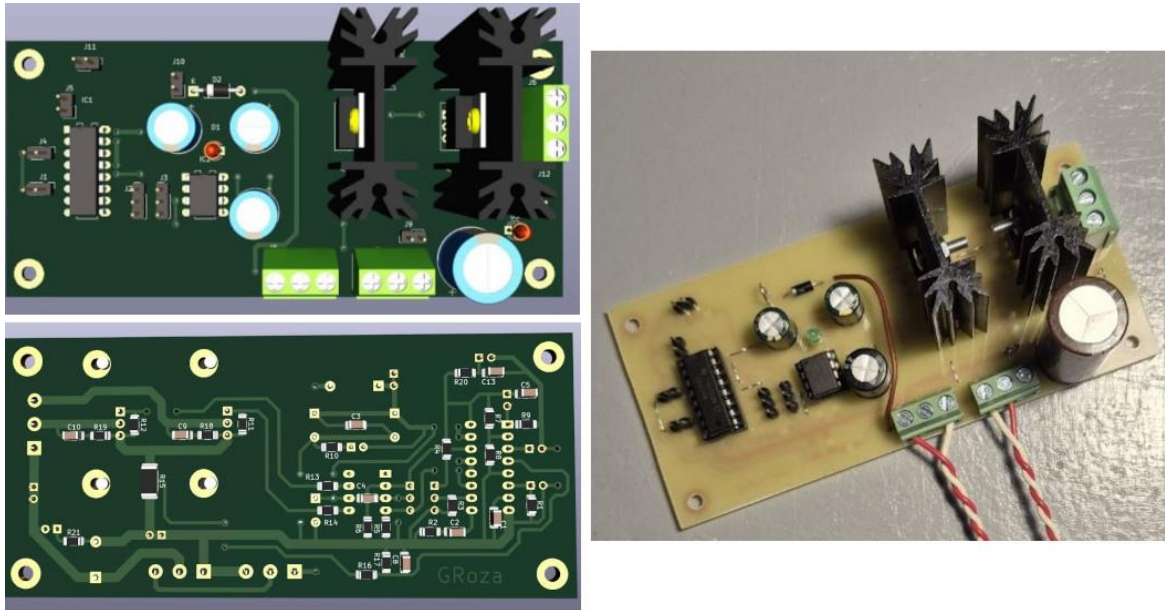


Рисунок 6 – Регульоване джерело змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти

Особливості під'єднання землі. Оскільки конструкція видає напругу 0 – 8 kV, треба було для збільшення безпеки під час дослідів зменшити кількість небезпечних виводів, тому початок намотки вихідної обмотки трансформатора було поєднано з загальним мінусом всієї схеми і виводом заземлення всієї конструкції. Таким чином в конструкції залишився небезпечним тільки один фазний вивід. Це дозволяє зменшити як вірогідність виходу з ладу систем керування та вимірювання, а також підвищує рівень безпеки.

Тестові запуски макету. Перші запуски макету регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу представлено на рис. 7.

На рис. 7 можна побачити 2 джерела живлення. Одне джерело на 12 V – використовується у схемі керування push-pull, кулерах охолодження (на фотографії не встановлені). Інше джерело – 30 V, забезпечує живлення асинхронного buck конвертора на мікросхемі XL4016E, що дозволяє керувати напругою силової push-pull. Зверху зліва можна побачити високовольтний трансформатор та модулі вимірювання напруги і струму, що встановлені разом з ним.

Оскільки макет було створено для дослідів з керування плазмовими актуаторами було під'єднано один з плазмових актуаторів в якості навантаження (рис. 8). При регулюванні живлення шини push-pull, а також частоти імпульсів PWM контролеру SG3524 було відмічено зміну вигляду бар'єрного розряду.

До регульованого джерела високої змінної напруги, з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу буде також під'єднано програмно апаратну систему для керування та збору даних, але це тема для окремої розробки.

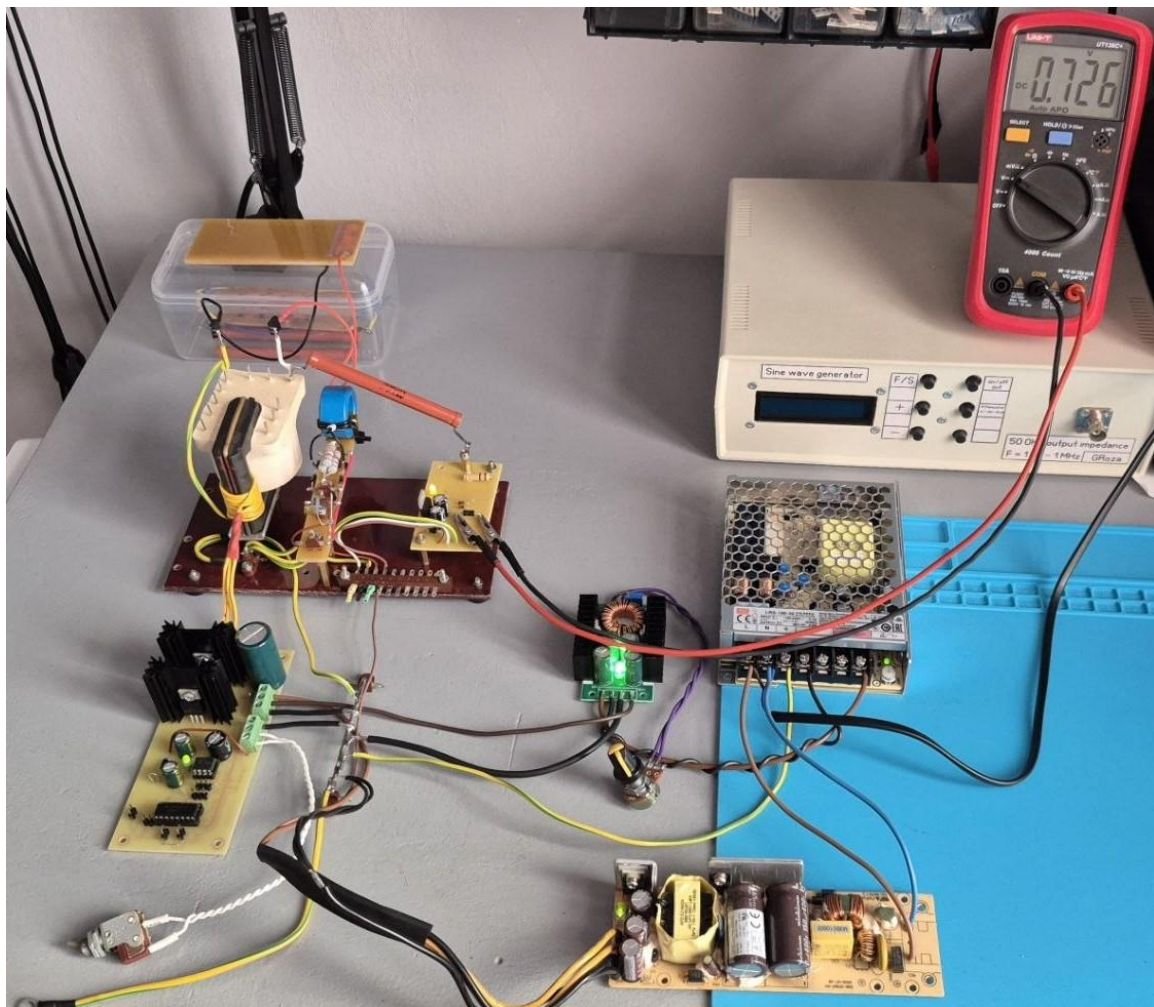


Рисунок 7 – Макет регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу

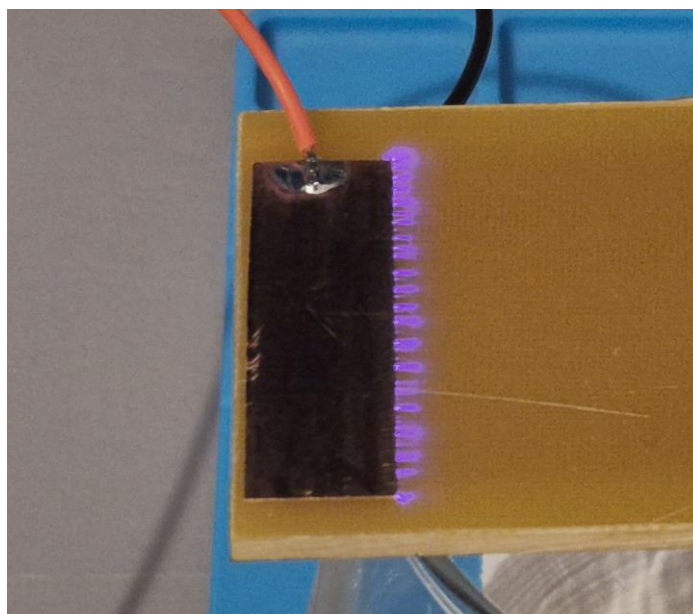


Рисунок 8 – Навантаження макету регульованого джерела високої змінної напруги плазмовим актуатором

Висновки. Розглянута та описана у статті конструкція регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти може забезпечити контрольований та стабільний бар'єрний плазменний розряд, що потрібен для подальших досліджень плазмових актуаторів.

Проведено серії лабораторних досліджень на працездатність всіх її елементів та модулів. Конструкція показала свою працездатність і може бути використана в серії лабораторних досліджень.

Спроектовано та створено. регульоване джерело змінної високої напруги, яке може видавати напругу від 0-8 kV при частотах у діапазоні 10-60 kHz. Модуль виміру змінної високої напруги може вимірювати напругу до 15 kV, на частотах до 100 kHz. Модуль виміру струму може вимірювати струм до 5 mA.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction Flint / O. Thomas, A. Kozlov, and Thomas C. Corke // AIAA Journal 2008 46:8, 1921-1931.
2. Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device / J. Reece Roth and Xin Dai. // AIAA 2006-1203. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2006.
3. Momentum Transfer for an Aerodynamic Plasma Actuator with an Imposed Boundary Layer / James Baughn, Christopher Porter, Brent Peterson, Thomas McLaughlin, C. Enloe, Gabriel Font and Corrie Baird., // AIAA 2006-168. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2006.
4. Optical Observation of Discharge Plasma Structure in DBD Plasma Actuator / Yuji Takizawa, Atsushi Matsuda, Kousuke Kikuchi, Akihiro Sasoh and Takashi Abe. // AIAA 2007-4376. 38th Plasmadynamics and Lasers Conference . June 2007
5. Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator / C. Enloe, T. McLaughlin, J. Gregory, R Medina and W Miller. // AIAA 2008-1103. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2008.
6. Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator / G. Font, C. Enloe, J. Newcomb, A. Teague, A. Vasso and Thomas McLaughlin. // AIAA 2010-545. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. January 2010.

Received 20.04.2026.
Accepted 24.04.2026.
Published 30.04.2026

Principles and solutions for creating power and measurement equipment for plasma actuator research

Promising directions of development of aviation technology require use of non-traditional methods of influence on aerodynamic flow. One of such methods is use of plasma actuators. Both theoretical researches and experimental tests demonstrate possibility of expansion of range of laminar flow, increase of angle of attack without flow breakdown and set of other phenomena. Theoretical methods of modeling of this complex system have received significant development. At the same time it is necessary to note both variety of factors in modeling process, and large amount of resources which are required for modeling process.

No less significant amount of resources is required for experimental researches in this direction, taking into account both variety of phenomena which will manifest themselves in these processes, and significant difference in characteristic time intervals, inherent in processes which require research. To ensure a controlled and stable barrier plasma discharge, both an appropriate high-potential difference generation device with the ability to control the potential and frequency are required, as well as special measuring equipment capable of operating under these conditions. It is also necessary to take into account the limited technical and financial capabilities in the modern environment. Therefore, the task of creating a controlled high-voltage power supply system for barrier discharge research is relevant.

The article describes the design of a regulated high-voltage alternating voltage source, with frequency control and the ability to measure the output current and voltage. The schemes and their description, design features are given. A series of experiments were conducted to determine the operability of all its elements and modules. The design has shown its operability and can be used in a series of laboratory studies on the control of plasma actuators.

Key words: high voltage power supply, plasma actuator.

Зимогляд Андрій Юрійович - доцент кафедри ІТС ННІ Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій, к.т.н., старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

Гуда Антон Ігорович - професор кафедри ІТС ННІ Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій, д.т.н., доц., провідний науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

Редчиць Дмитро Олександрович – д.ф.-м.н., професор, директор Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8538-6026>

Zymoglyad Andrew Yuriyovych - Associate Professor of the Department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Ph.D., senior research fellow of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

Guda Anton Igorovich - Professor of the Department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Ph.D., Assoc. Prof., leading researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

Redchyts Dmytro Oleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8538-6026>