

Миронов А.А., Хохлов К.О.

БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА

Аннотация. Разработан высоковольтный источник питания для электроспиннинга. Устройство допускает постоянное напряжение до 30 кВ с коэффициентом пульсации менее 0,1%. Предполагаемое использование – электроспиннинг сенсорных материалов, содержащих флуоресцентные красители и наночастицы.

Ключевые слова: электроспиннинг, электропрядение, электроформование, нановолокна, высокое напряжение.

Abstract. The high voltage power supply for application in the electrospeinning was developed. The device allows constant voltage up to 30 kV with pulsation coefficient below 0,1 %. The intended use is electrospinning of sensory materials containing fluorescent dyes and nanoparticles.

Keywords: electrospinning, electrospun, nanofibers, high voltage.

Введение

Электроспиннинг – метод получения полимерных нитей, волокон диаметром десятки нанометров из раствора в высоковольтном электрическом поле. Капля раствора под действием электростатических сил деформируется в конус, из кончика которого вытягивается нить и направляется на коллектор. Электроспиннинг долгое время привлекает внимание ученых в пору особого интереса к нанотехнологиям и обладает большими перспективами развития, универсальностью и возможностью применения в различных отраслях.

Полученные волокна различного состава применяются для фильтрации газов и жидкостей, в фотонных и электрических преобразователях энергии, как полимерные каркасы для размещения сенсорных и терапевтических веществ.

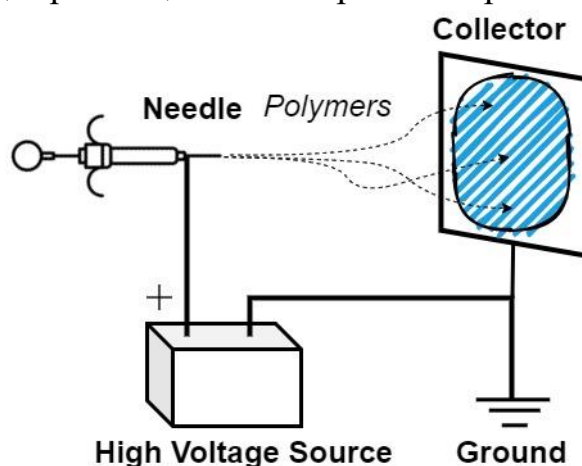


Рисунок 1 – Структурная схема установки электроспиннинга

Развитие данного метода привело к созданию различных установок, классическая структура которых приведена на рисунке 1. Также существуют электроспиннинги с несколькими иглами, промышленные образцы способные вырабатывать нановолокна в больших объемах, электроспиннинги с подводом на иглу нескольких действующих веществ, которые объединяются в волокно под действием электростатических сил, и электроспиннинги с линейными электродами.

Статическое постоянное высокое напряжение обычно подается на электроды для создания электрического поля. Полярность напряжения может быть как положительной, так и отрицательной, что влияет на распределение заряженных молекул в жидкости и, следовательно, на тип зарядов, накопленных на поверхности струи. Для некоторых материалов, особенно электролитов, их способность к электроспиннингу зависит от полярности приложенного напряжения.

Приложенное напряжение напрямую определяет количество зарядов, переносимых струей, и величину электростатического отталкивания между зарядами, а также силу взаимодействия между струей и внешним электрическим полем. Более высокое напряжение обычно способствует образованию более тонких волокон, тогда как это также может вызвать выброс большего количества жидкости, что приведет к образованию волокон с более толстым диаметром. Переменное напряжение также используется для электропрядения волокон, но поведение струи существенно отличается от поведения при постоянном напряжении.

Наиболее часто используемые материалы – это органические полимеры в форме раствора или расплава. Изменять свойства будущих нановолокон можно путем введения наноразмерных компонентов в раствор или расплав полимера (например наночастиц, нанопорошков, нанотрубок).

Таким образом, для реализации данного метода требуется учесть большое количество параметров: концентрация полимера и соли-прекурсора, вязкость раствора, конфигурация иглы и коллектора, расстояние между ними, стабильное напряжение. Варьирование этих параметров позволяет получать материалы с требуемыми структурой, составом и свойствами. После анализа информации о методе электроспиннинга, принято решение разработать блок питания на максимальное выходное напряжение 30 кВ с возможностью регулировки, что приведет к реализации метода электроспиннинга на обширной линейке растворов. Одно из основных требований – минимальный коэффициент пульсаций напряжения между электродами.

Образцы и методика эксперимента

В ходе изучения различных источников поставлено конкретное техническое задание: разработать блок питания на максимальное выходное напряжение до 30 кВ для установки электроспиннинга, предусмотреть:

- плавное изменение выходного напряжения путем подачи на инвертор регулируемого напряжения с лабораторного источника питания от 0 до 300 В
- коэффициент пульсаций выходного напряжения менее 0,1 %.

Рассмотрим способы получения высокого стабильного постоянного напряжения.

Существуют линейные и импульсные источники питания. Линейный стабилизатор способен выдавать в нагрузку напряжение только ниже входного напряжения питания и не подходит для выполнения поставленной задачи.

Импульсные блоки питания являются инверторной системой. В импульсных блоках питания переменное входное напряжение сначала выпрямляется. Полученное постоянное напряжение преобразуется в прямоугольные импульсы повышенной частоты и определённой скважности, либо подаваемые на трансформатор (импульсные блоки питания с гальванической развязкой от питающей сети) или напрямую на выходной фильтр нижних частот (импульсные блоки питания без гальванической развязки). В импульсных источниках питания могут применяться малогабаритные трансформаторы – это объясняется тем, что с ростом частоты повышается эффективность работы трансформатора и уменьшаются требования к габаритам (сечению) сердечника, требуемым для передачи эквивалентной мощности. В большинстве случаев такой сердечник может быть выполнен из ферромагнитных материалов, в отличие от сердечников низкочастотных трансформаторов, для которых используется электротехническая сталь.

В импульсных блоках питания стабилизация напряжения обеспечивается посредством отрицательной обратной связи. Обратная связь позволяет поддерживать выходное напряжение на относительно постоянном уровне вне зависимости от колебаний входного напряжения и величины нагрузки.

Важной характеристикой источников питания является гальваническая развязка. При проектировании импульсных источников на напряжения более 300 В гальваническая развязка рекомендуется, а в целях безопасности установки – обязательна. Таким образом, требуется использовать схему источника высокого напряжения с гальванической развязкой.

Основные типы импульсных источников питания с использованием гальванической развязки приведены в таблице 1 с примерным диапазоном мощностей и сложностью для каждого из типов преобразователей.

Таблица 1 – Импульсные преобразователи с гальванической развязкой

| Схема | Диапазон мощностей | Относительная сложность |
|----------------|--------------------|-------------------------|
| Обратноходовая | 1...100 Вт | Низкая |
| Прямоходовая | 1...200 Вт | Средняя |
| Двухтактная | 200...500 Вт | Средняя |
| Полумостовая | 200...500 Вт | Высокая |
| Мостовая | 500...2000 Вт | Очень высокая |

Во всех типах данных преобразователей используются импульсные трансформаторы кроме обратноходовой, где применяется дроссель с двумя обмотками противоположной фазировки.

При выборе полумостового импульсного преобразователя можно получить двухполярное выходное напряжение, что расширит спектр применения данного блока питания для получения нановолокон из различных растворов полимеров. Двухполярное выходное напряжение образуется за счет поочередного замыкания ключей, что приводит к формированию на первичной обмотке трансформатора двухполярного переменного напряжения. Подключив схему двухканального умножителя напряжения к вторичной обмотке импульсного трансформатора, можно окончательно увеличить величину выходного напряжения.

Выбор структурных элементов блока питания:

- инвертор – преобразует постоянное напряжение с лабораторного источника питания в переменное напряжение прямоугольной формы с требуемой частотой для дальнейшего преобразования;
- разделительный трансформатор – позволяет развязать потенциал инвертора и повышающую часть блока питания;
- повышающий трансформатор;
- умножитель напряжения – выпрямитель с повышением выходного напряжения;
- фильтрующий элемент для снижения коэффициента пульсаций.

Следующий этап проектирования – разработка электрической принципиальной схемы (рисунок 2) и выбор компонентов, согласно структурной схеме.

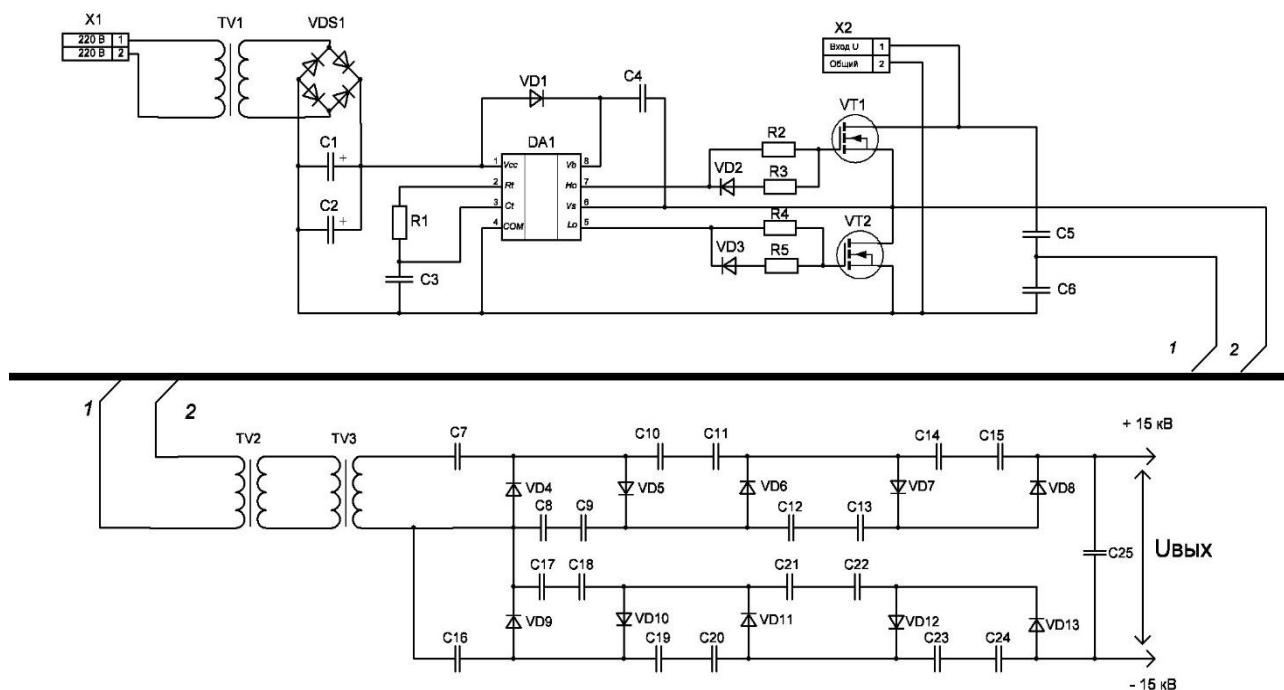


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема блока питания установки электроспиннинга

Результаты и обсуждение

На данный момент блок питания функционирует согласно требованиям, однако при сборке, несмотря на предварительные расчеты, возникали некоторые трудности, которые нужно обсудить подробнее:

- 1) Эффект появления сквозных токов через транзисторы VT1 и VT2, что может привести к сильному нагреву и выходу из строя полупроводниковых элементов.
- 2) Изоляция импульсного повышающего трансформатора
- 3) Изоляция платы с умножителем напряжения.

Рассмотрим решения данных проблем подробнее.

Наличие сквозных токов в схеме полумостового инвертора обусловлено моментом времени, когда один из транзисторов уже открылся, а второй не успел закрыться. Чтобы обеспечить переключение транзисторов, полумостовой драйвер IR2153 имеет «мертвое» время 1,2 мкс, которого может оказаться недостаточно. Для решения данной проблемы было предпринято несколько шагов.

Первый шаг - использовать особенность драйвера и обеспечить разные токи заряда/разряда затворов силовых транзисторов с помощью параллельно включенных резисторов и диодов VD2 и R3, VD3 и R5.

Второй шаг – выбрать современные транзисторы с улучшенными динамическими характеристиками. Первоначально были установлены силовые ключи на транзисторах IRF740, которые в последствие заменены на STP4NK60ZFP. Сравнительные характеристики транзисторов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение динамических характеристик конкурирующих транзисторов

| Параметр | | IRF740 | STP4NK60ZFP |
|-------------------|---------------------------|--------|-------------|
| $t_{d(on)}$, нс | Время задержки включения | 14 | 12 |
| t_r , нс | Время фронта | 27 | 9,5 |
| $t_{d(off)}$, нс | Время задержки выключения | 50 | 29 |
| t_f , нс | Время спада | 24 | 16,5 |
| C_{iss} , пФ | Входная емкость | 1400 | 510 |
| C_{oss} , пФ | Выходная емкость | 330 | 67 |

Повышающий импульсный и разделительный трансформаторы изготовлены вручную и являются специализированным изделием. Формфактор магнитопровода Б44 с ферритом НМ2000. Рассчитаны основные параметры трансформатора, требуемый коэффициент трансформации – 20. Количество витков первичной обмотки – 31, вторичной – 620. Амплитуда входного напряжения равна 150 В, на выходе переменное с амплитудой 3 кВ. Проблема изоляции решается с помощью электроизоляционного компаунда, которым заливается весь каркас с обмотками.

Чтобы избежать влияния высоковольтной части схемы на импульсную и усилить гальваническую развязку принято решение использовать согласующий (развязывающий) трансформатор с коэффициентом трансформации равным 1. Это также следует сделать по причине того, что при подключении выходов УН к электродам установки электроспиннинга, на вторичной обмотке относительно первичной формируется разность потенциалов порядка 15 кВ. Медная обмотка развязывающего трансформатора помещена в дополнительную изоляцию.

Для получения выходного напряжения в 30 кВ применяется двуканальный множитель напряжения.

Умножитель напряжения решено расположить на печатной плате. Из-за простоты требуемых контактных площадок и несложности соединений на плате

она изготовлена вручную методом травления. На плате предусмотрен вырез между плечами каналов УН с целью избежать пробой по поверхности платы. Фильтрующий конденсатор на выходе УН поднят над платой, так как при получении на выходе напряжения более 18 кВ по его корпусу, прилегающему к плате, начиналась утечка.

Важно отметить, что выбранные конденсаторы, накапливающие энергию в звене умножителя, имеют максимальное напряжение между обкладками 3 кВ и достаточно большой допуск по емкости +80% -20%. Во время работы УН на конденсаторах напряжение может достигать 6 кВ, по этой причине конденсаторы включены последовательно. При этом важно, чтобы емкости конденсаторов в паре отличались как можно меньше. Пары конденсаторов в каждом звене умножителя выбраны исходя из близкого значения измеренной емкости. Для дополнительной электроизоляции корпуса конденсаторов помещены в термоусадочную трубку.

Внешний вид конструкции приведен на рисунке 3.

Заключение

Спроектированный и собранный блок питания позволит расширить возможности лаборатории, откроет дорогу новым исследованиям.

Основные результаты работы:

- разработан и собран блок питания на расчетное максимальное выходное напряжение 30 кВ;
- применена схема полумостового инвертора на специализированном драйвере IR2153;
- для дополнительной гальванической развязки вторичной обмотки повышающего трансформатора применен согласующий трансформатор;
- использована схема двухканального умножителя напряжения, что позволит применять данный блок питания для экспериментов как с положительной, так и с отрицательной полярностью выходного напряжения;
- проверена работа блока питания на практике, измерен коэффициент пульсаций, который имеет значение 0,03 %;
- получены первые образцы микро- и нано- волокон из растворенных полимеров.

Перспективы:

- разработка цепи обратной связи для стабилизации выходного напряжения и подключения к модулю индикации;
- использование, в качестве входного напряжения инвертора, выпрямленного напряжения сети, с возможностью регулировки выходного напряжения блока питания.

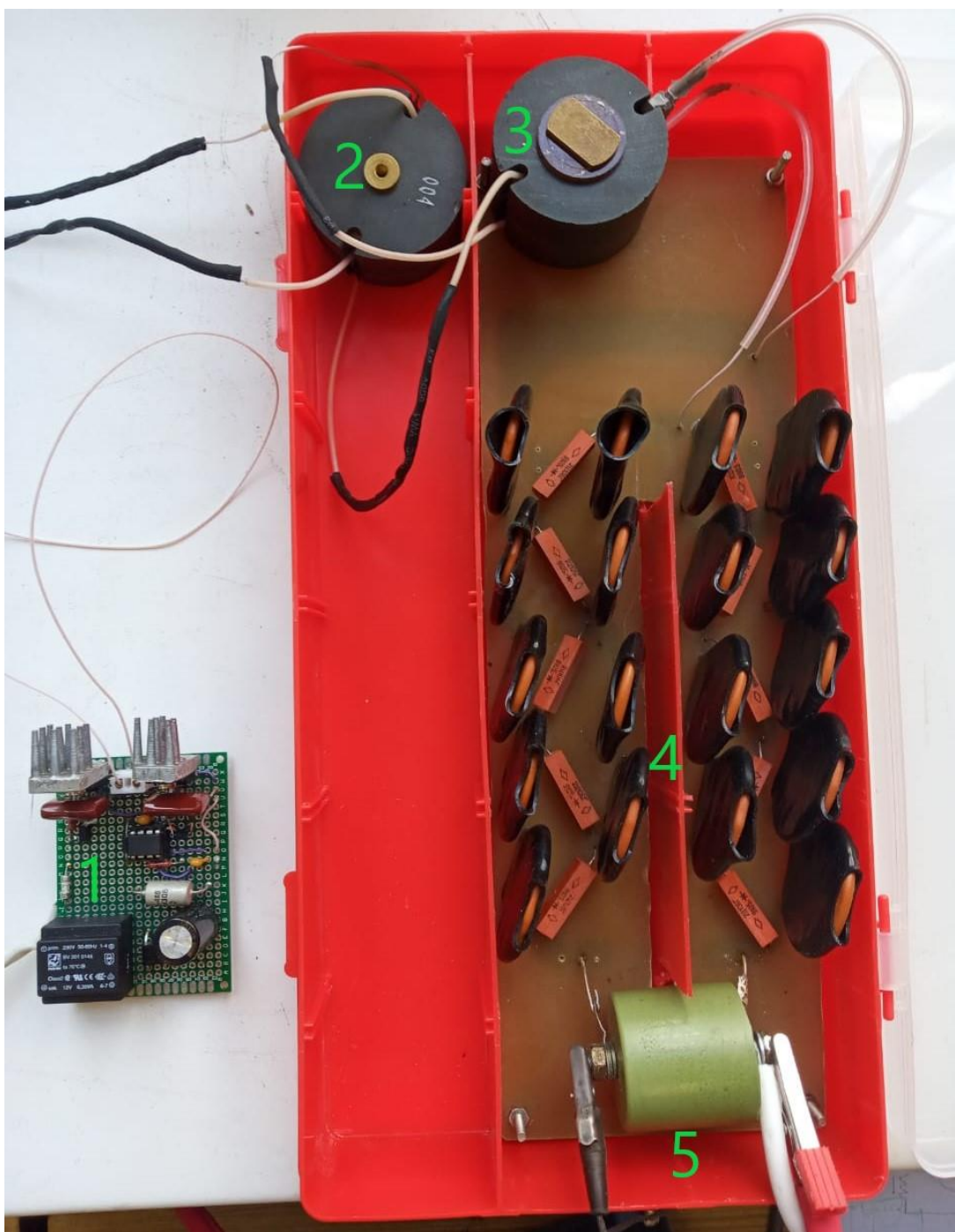


Рисунок 3 – Блок питания для установки электроспиннинга. 1 – полумостовой инвертор, 2 – согласующий трансформатор, 3 – повышающий импульсный трансформатор, 4 – двухканальным умножителем напряжения, 5 – выходной фильтр.

Библиографический список

1. Electrospinning and Elctrospun Nanofibers: Methods, Materials and Applications / Jiajia Xue, T. Wu, Y. Day, Y. Xia // Chemical Reviews. – 2019. – Vol. 119, Iss. 8. – P. 5298–5415.
2. Prabu G. T. V. A Novel Profiled Multi-Pin Electrospinning System for Nanofiber Production and Encapsulation of Nanoparticles into Nanofibers / G. T. V. Prabu, B.

Dhurai // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 4302.

3. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
4. Иванов-Цыганов А. И. Электро-преобразовательные устройства РЭС / А. И. Иванов-Цыганов. – Москва : Высшая школа, 1991. – 272 с.