

УДК 621.315.61

АШМАРИН В.В.¹, ФИЛИППОВ З.С.², ФИЛИППОВА О.А.³

к.т.н, доцент ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия¹

аспирант ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия²

к.э.н, доцент ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет
имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия³

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНЫМ КРОУБАРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЁРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Настоящее исследование посвящено разработке конструкции и схемы управления четырёхканальным кроубаром с использованием твёрдого диэлектрика. Разработанная конструкция четырёхканального кроубара обеспечивает равномерное распределение тока, что способствует более эффективному гашению колебаний в нагрузке [1].

Представленная конструкция четырёхканального кроубара позволяет не только надёжно защитить оборудование от перенапряжений, но и минимизировать время срабатывания. Ключевым элементом данной конструкции является твердый диэлектрик, выбранный с учётом его диэлектрической прочности и скорости электрического пробоя.

Схема управления позволяет синхронизировать моменты включения каналов, оптимизируя процесс переключения и минимизируя нежелательные эффекты [2].

Схема управления четырёхканальным кроубаром с использованием твердого диэлектрика включает в себя: прецизионный высоковольтный источник питания, систему контроля входного напряжения и тока, а также цепь управления поджиганием разрядника. Контроль напряжения осуществляется с высокой точностью, а при превышении заданного порогового значения запускается процесс зажигания разрядника.

Для определения соотношения величин основных параметров замыкателя нагрузки с твёрдым диэлектриком, при которых повышается эффективность процесса метания твёрдых тел, требуется учёт ряда ключевых факторов. Важнейшими являются: характеристики диэлектрика, геометрия разрядного промежутка, энергия, запасаемая в накопителе, и масса метаемого тела.

Оптимизация этих параметров позволяет максимально эффективно передавать энергию от накопителя к метаемому телу в процессе электрического разряда. В частности, выбор диэлектрика с высокой диэлектрической прочностью и малой диэлектрической проницаемостью позволяет запасть больше энергии при заданном напряжении. Геометрия разрядного промежутка влияет на скорость нарастания тока и эффективность передачи импульса силы. С другой стороны, масса метаемого тела должна быть согласована с энергией,

запасаемой в накопителе, чтобы обеспечить оптимальное ускорение и дальность полёта. Слишком большая масса снижает скорость, а чрезмерно малая масса ведёт к неэффективному использованию энергии.

Таким образом, для повышения эффективности процесса метания твёрдых тел необходимо эмпирически подбирать оптимальные соотношения между этими параметрами, проводя серию экспериментов с различными значениями и анализируя результаты по показателям скорости и стабильности броска.

Анализ осциллограммы демонстрирует значительное уменьшение времени спада тока в индуктивной нагрузке при использовании кроубара в шунтирующем режиме, соответствующем условию формулы (1). Это объясняется тем, что при правильно подобранных параметрах энергия, накопленная в индуктивности, эффективно перенаправляется в кроубар, минуя внутреннее сопротивление генератора импульсных токов. Для повышения эффективности процесса метания твердых тел целесообразно использовать шунтирующий режим генератора импульсных токов при определённых соотношениях величин основных параметров замыкателя нагрузки с твёрдым диэлектриком (кроубара) L и индуктивной нагрузки L_1 [3].

Определение оптимальных значений основных параметров замыкателя нагрузки с твёрдым диэлектриком (кроубара) при которых достигается максимальная эффективность процесса метания твёрдых тел, задаётся формулой (1). Для нахождения оптимальных значений этих параметров необходимо учитывать ряд ключевых факторов [4]:

$$L \leq 0,05L_1, R \leq 0,05\omega L_1, \quad (1)$$

где L – индуктивность кроубара;

R – активное сопротивление кроубара;

L_1 – индуктивность нагрузки.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_0(L_3 + L_1)}}$$

где ω – круговая частота цепи разряда генератора импульсных токов;

C_0 – ёмкость батареи конденсаторов генератора импульсных токов;

L_3 – индуктивность стартового разрядника.

При соблюдении условия, заданного формулой (1), следует, что уменьшение индуктивности нагрузки L_1 приводит к более строгим требованиям к основным параметрам кроубара. Для малых значений индуктивности нагрузки $L_1 \leq 100$ нГн, характерных для электродинамических ускоряющих систем малых масс кондукционного типа, требуется применение кроубаров с низкой индуктивностью $L \leq 5$ нГн. Такие кроубарные разрядники должны надёжно функционировать при протекании больших импульсных токов и обеспечивать малое активное сопротивление замыкания, равное $R \leq 5$ мОм.

С учётом указанных требований разработана конструкция четырёхканального кроубара на основе твёрдого диэлектрика, представленная на рисунке 1 [5].

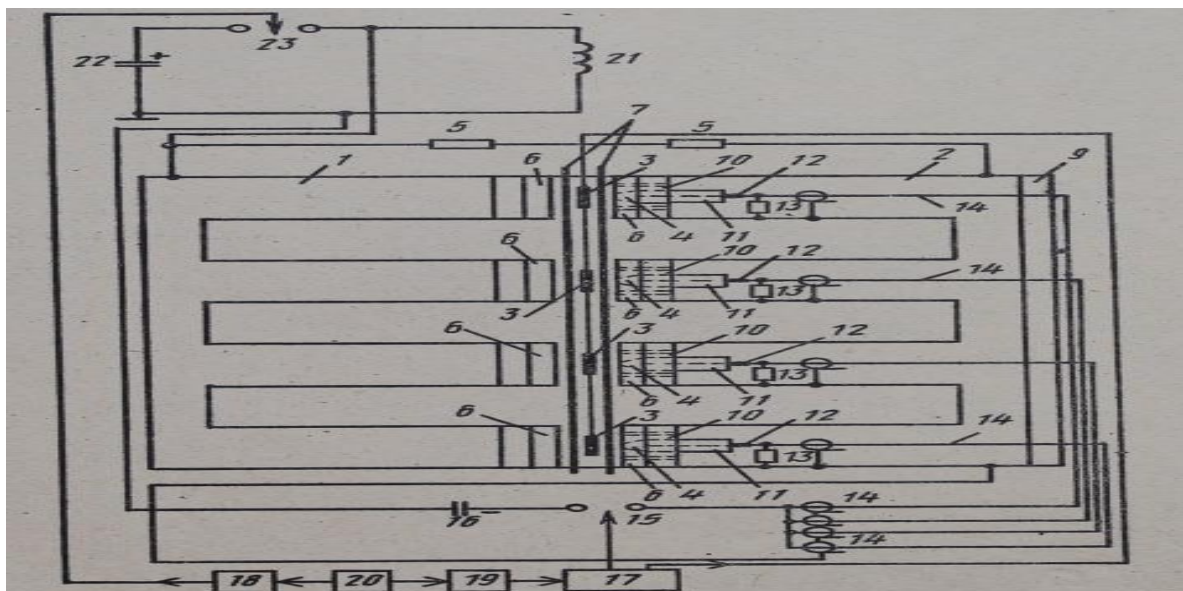


Рисунок 1. Схема управления четырёхканальным кроубаром (вид сверху)

Вид сверху четырёхканального кроубара и его схема управления, представленные на рисунке 1, оснащены двумя главными электродами 1 и 2, выполненными в виде металлической гребёнки с зубцами, подсоединенными параллельно индуктивной нагрузке 21. В конструкции предусмотрены четыре управляющих электрода 3 с острыми концами, предназначенные для одноразового использования, расположенные напротив конусообразных каналов 4 и резистивного делителя напряжения 5. На зубцах главных электродов 1 и 2 установлены металлические полосы 6, обладающие высокой устойчивостью к эрозии. Между главными электродами 1 и 2 расположены два слоя твёрдого диэлектрика 7.

На рисунке 2 представлен вид сбоку четырёхканального кроубара со схемой управления.

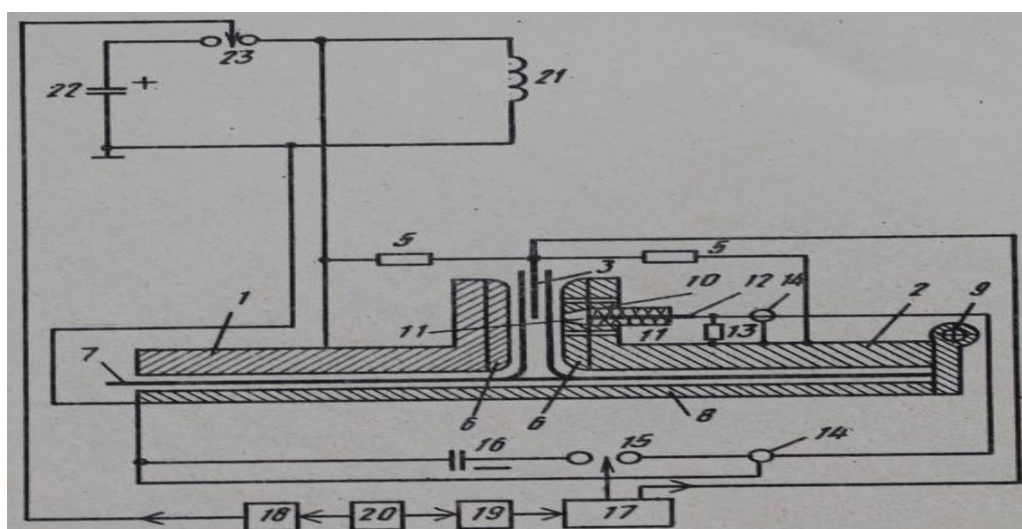


Рисунок 2. Схема управления четырёхканальным кроубаром (вид сбоку)

Вид сбоку четырёхканального кроубара и его схема управления, представленные на рисунке 2, имеют главный электрод 2, который соединён с заземлённой токопроводящей шиной 8. Подъём и опускание устройства осуществляется с помощью специального механизма 9. На зубцах электродов 2 установлены четыре камеры поджига.

Камера поджига состоит из металлического корпуса 10, который соединяется с главным электродом 2 непосредственно перед конусообразным каналом 4, просверленным в металлокерамической пластине 6, полиэтиленовой изолирующей трубки 11, дополнительного электрода 12 и сопротивления 13.

Дополнительные электроды 12, соединённые с помощью коаксиальных кабелей 14 равной длины, образуют дополнительный контур схемы зажигания, состоящей из коммутатора 15 и конденсатора 16. Все коаксиальные кабели 14 являются стандартными, и их длина выбирается таким образом, чтобы время двойного пробега волны по ним превышало разброс времени срабатывания по поверхности изолирующей трубки 11. При соблюдении этого условия кабели 14 будут функционировать как независимые источники равных и синхронно полученных высоковольтных поджигающих импульсов. Это позволит обеспечить надёжное срабатывание схемы зажигания с кабелями 14, гарантирует синхронный пробой всех поджигающих искровых промежутков по поверхности изолирующей втулки 11 и устойчивое одновременное включение всех камер поджига. Коммутатор 15 запускается с помощью генераторов импульсных напряжений 17 и 18 (ГИН), блока задержки 19 (БЗ) и блока поджига 20 (БП). Главные электроды 1 и 2 кроубара шунтируют нагрузку 21.

Так как электрод 2 может перемещаться благодаря специальному устройству 9, то ток в месте соединения электрода 2 и токопроводящей шины 8 осуществляется через подвижные пластины. Это упрощает и ускоряет замену твердого пленочного диэлектрика в кроубаре. В качестве диэлектрика в кроубаре используется изоляция из листового полиэтилена 7.

Таким образом, главные электроды 1 и 2 изолированы друг от друга сменной двухслойной полиэтиленовой пленкой 7. Между слоями полиэтилена установлены управляющие электроды 3, вырезанные из алюминиевой фольги конденсаторной секции. Управляющие электроды 3 имеют острые концы, что способствует формированию зоны с высокой напряжённостью электрического поля и образованию «прокола» в листах полиэтилена напротив конусообразных каналов 4.

За конусообразными каналами расположены камеры поджига, которые при срабатывании создают одновременные плазменные струи. Размеры листов полиэтиленовой изоляции 7 зависят от зарядного напряжения конденсаторов генератора импульсных токов 22. Резисторы 5 делителя напряжения (ДН) идентичны и обеспечивают равномерную напряжённость электрического поля в полиэтиленовом диэлектрике в промежутках (1–3) и (3–2). Полиэтиленовый диэлектрик способен обеспечить изоляцию между коммутирующими главными электродами толщиной от 1 до 3 мм при напряжении до 100 кВ и выше. Сопротивление делителя напряжения равно $R = 100 \text{ МОм}$.

При включении стартового коммутатора 23 на управляющих электродах 3 кроубара возникает напряжение, равное половине рабочего напряжения генератора импульсных токов, который начинает разряжаться на нагрузку 21, и в момент, когда разрядный ток достигает максимума, происходит включение кроубара. Кроубар запускается импульсом высокого напряжения, формируемым генератором импульсных напряжений 18. Максимальное значение импульса составляет $U_{\text{макс}} = 100$ кВ, длительность фронта $\tau_{\text{ф}} = 100$ нс, а скорость увеличения напряжения $dU/dt = 1$ кВ/нс. Резистор 13, имеющий величину сопротивления, равную $R = 50$ кОм, предназначен для соединения дополнительного электрода 12 с заземлённой точкой генератора импульсных токов. При запуске коммутатора 15 конденсатор 16 разряжается на коаксиальные кабели развязки 14 и дополнительные электроды 12. Коммутатор 15 запускается от генератора импульсных напряжений 18. Управление генератором импульсных напряжений 17 и 18 осуществляется от блока поджига 20.

Генератор импульсных напряжений 18 срабатывает в момент времени $t = T/4$, что соответствует максимальному значению разрядного тока. Здесь T обозначает период колебаний разрядного тока генератора импульсных токов, состоящего из конденсаторов 22, стартового разрядника 23 и индуктивной нагрузки 21. Задержка времени $\Delta t = T/4$, равная четверти периода разряда, требуемая для момента инициирования срабатывания коммутатора 15, создается блоком задержки 19.

Четырёхканальный кроубар действует следующим образом: от блока поджига 20 одновременно включаются генератор импульсных напряжений 18 и блок задержки 19. Генератор импульсных напряжений 18 запускает стартовый разрядник 23 генератора импульсных токов, конденсаторы которого будут разряжаться на нагрузку, в результате чего разрядный ток начинает протекать по индуктивной нагрузке 21. Когда ток в нагрузке достигнет максимального значения, а напряжение на основных электродах стартового разрядника 1 и 2 станет близким к нулю, блок задержки 19 генерирует импульс напряжения на поджиг генератора импульсных напряжений 17, который запускает разрядник 15 схемы зажигания камер поджига.

В сменном диэлектрике в местах с наибольшей напряжённостью электрического поля, то есть на острых окончаниях управляющих электродов 3, одновременно возникают «проколы» под действием импульса напряжения с коротким временем нарастания, создаваемого генератором импульсных напряжений 18. В момент появления «прокола» в сменном полиэтиленовом диэлектрике конденсатор 16 схемы зажигания начинает разряжаться в камеру поджига. По кабелям 14 одновременно поступает поджигающий импульс $U_{\text{п}} = 20$ кВ в камеру поджига, что приводит к пробое по поверхности промежутков, образованных дополнительными электродами 12 и металлическим корпусом 10. Камеры поджига срабатывают. Давление в конусообразных каналах 4 резко возрастает, образуются плазменные струи, направленные к электроду 1. Плазма с высокой проводимостью наполняет образовавшиеся «проколы» в пленочном диэлектрике 7, замыкает главные электроды 1 и 2 и надёжно формирует токопроводящие промежутки (1–2) с сопротивлением

области разряда практически ничтожной величины, равной (3–5) мОм при напряжении на батарее конденсаторов 22, равном нулю.

На рисунке 3 (а; б) представлены осциллограммы токов в индуктивной нагрузке и четырёхканального кроубара с использованием твёрдого диэлектрика [6].

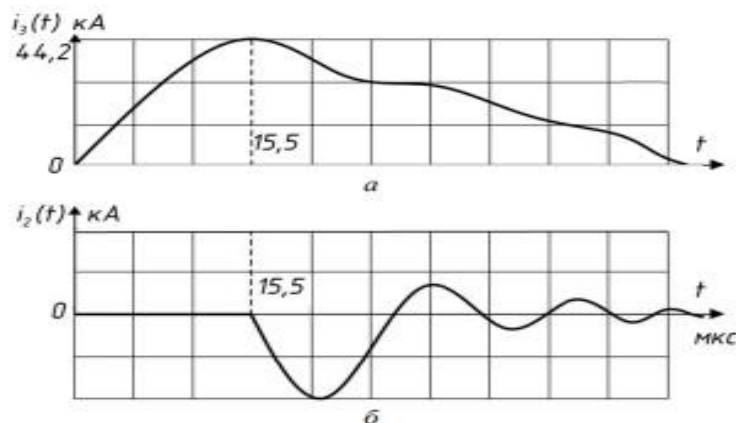


Рисунок 3 (а; б). Осциллограммы токов в индуктивной нагрузке и четырёхканального кроубара с использованием твёрдого диэлектрика

Через кроубар протекает ток, представленный на рисунке 3 (б), в нагрузке 21 образуется униполярный импульс тока, представленный на рисунке 3 (а).

В ходе исследования применялся генератор импульсных токов, состоящий:

- из девяти конденсаторов типа ИК-25-12 с общей ёмкостью $C = 108$ мкФ;
- запасаемая энергия составляет $W = 34$ кДж;
- индуктивность нагрузки $L_1 = 680$ нГн;
- максимальный ток $I_m = 44$ кА;
- период колебаний $T = 62$ мкс;
- индуктивность кроубара $L = 34$ нГн;
- активное сопротивление кроубара $R = 3,4$ мОм.

Подводя итог сказанному, можно констатировать, что определение оптимальных значений основных параметров замыкателя нагрузки с твёрдым диэлектриком (кроубара), при которых достигается максимальная эффективность процесса метания твёрдых тел, оказывается наиболее результативным при соблюдении условий, заданных формулой (1) [7].

При выполнении этих условий, заданных формулой (1), уменьшение индуктивности нагрузки L_1 требует более строгого соответствия параметрам кроубара. Доказано, что основные параметры кроубара соответствуют требованиям формулы (1), а применение шунтирующего режима генератора импульсных токов в данном случае оказывается наиболее эффективным [8].

Настоящее исследование, направленное на разработку конструкции и схемы управления четырёхканальным кроубаром с использованием твёрдого диэлектрика, обеспечивает равномерное распределение тока, что способствует более эффективному гашению колебаний в нагрузке. Представленная конструкция четырёхканального кроубара позволяет не только надёжно

защищать оборудование от перенапряжений, но и сокращать время срабатывания до минимума за счёт нескольких ключевых особенностей, которые дают следующие практические преимущества [9]:

- максимальная защита критических узлов. Благодаря времени срабатывания менее 100 нс кроубар шунтирует опасный импульс до того, как он достигнет защищаемого оборудования;

- высокая надёжность при многократных воздействиях. Распределение энергии перенапряжения между четырьмя каналами предотвращает деградацию компонентов даже при частых срабатываниях;

- стабильность работы в широком диапазоне условий. Схема управления автоматически адаптируется к изменениям температуры и напряжения питания, сохраняя заданные параметры срабатывания;

- простота интеграции. Унифицированные габариты и стандартные интерфейсы позволяют внедрить устройство в существующие системы без доработки конструкции.

Список литературы:

1. Филиппов, З. С. Применение систем управления качеством в российской и международной практике / З. С. Филиппов, О. А. Филиппова // Качество и конкурентоспособность в XXI веке : материалы XIX Международной научно-практической конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2021. – С. 315-320. – EDN POJXFZ.

2. Филиппов, З. С. Эволюция развития системного подхода к управлению качеством / З. С. Филиппов, О. А. Филиппова // Качество и конкурентоспособность в XXI веке : материалы XIX Международной научно-практической конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2021. – С. 309-314. – EDN EFKBUM.

3. Авторское свидетельство № 1557613 А1 СССР, МПК H01T 2/02. Шунтирующий разрядник : № 4463364 : заявл. 20.07.1988 : опубл. 15.04.1990 / В. В. Ашмарин, А. М. Абрамов, В. А. Лоц [и др.] ; заявитель Чувашский государственный университет им.И.Н.ульянова. – EDN PHWSIY.

4. Ашмарин, В. В. Разработка и исследование шунтирующего разрядника для мощных емкостных накопителей энергии, работающих на малоиндуктивные электродинамические устройства / В. В. Ашмарин, А. А. Блохинцев // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 14-23. – EDN YTFIUV.

5. Авторское свидетельство № 983852 А1 СССР, МПК H01T 5/00, H01T 3/00. Многоканальный искровой разрядник : № 3299158 : заявл. 05.06.1981 : опубл. 23.12.1982 / В. В. Ашмарин, А. А. Блохинцев, С. А. Калихман ; заявитель Чувашский государственный университет им.И.Н.ульянова. – EDN IUSKAP.

6. Патент № 2011253 С1 Российская Федерация, МПК H01T 2/02. Многоканальный управляемый разрядник : № 4943717/07 : заявл. 02.04.1991 : опубл. 15.04.1994 / А. М. Абрамов, В. В. Ашмарин, С. А. Калихман ; заявитель Чувашский государственный университет им.И.Н.Ульянова. – EDN NPAYTK.

7. Филиппова, О. А. Стратегический управленческий учет и его роль в управлении финансовыми потоками организации / О. А. Филиппова // Проблемы

и перспективы развития социально-экономического потенциала российских регионов : Материалы I Всероссийской электронной научно-практической конференции. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – С. 182-190. – EDN YTBFLC.

8. Ашмарин, В. В. Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы : специальность 05.14.12 «Техника высоких напряжений» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ашмарин Василий Васильевич. – Москва. – 1994. – 19 с. – EDN ZKINYZ.

9. Филиппова, О. А. Совершенствование управления затратами на качество как основы повышения эффективности системы менеджмента качества : дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Филиппова Ольга Александровна. – Казань, 2007. – 149 с. – EDN NOTOEF.