

УДК 621.7.044

Формирование разрядного импульса в системах на базе электрогидравлического эффекта

Ситников А.В.^{1,*}, Ситников И.А.²,
Швецов И.А.³, Курбатов А.Ю.²

* sit_irina@mail.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ООО "КОБГАРД", Москва, Россия

³Публичное акционерное общество "Красногорский завод им. С.А. Зверева", Красногорск, Россия

В представленной работе рассматриваются вопросы расчета параметров управляющего импульса напряжения и разрядного тока в межэлектродном пространстве рабочей камеры технической системы, базирующейся на электрогидравлическом эффекте. Этот эффект заключается в возникновении области высокого давления при протекании искрового разряда через рабочую жидкость, заполняющую рабочую камеру. В работе представлена модель электрической системы устройства и приведен расчет примерный расчет переходных процессов для двух значений емкости накопительного конденсатора. Кроме того, в статье рассматривается работа умножителя напряжения, необходимого для получения напряжения в межэлектродном пространстве рабочей камеры, обеспечивающего возникновение искрового пробоя.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, эффект Юткина, гидроудар, переходной процесс, искровой разряд, электроды, умножитель напряжения, кавитация

Введение

Сущность электрогидравлического эффекта (эффекта Юткина) состоит в том, что при прохождении электроразрядного импульса через жидкость, в небольшом межэлектродном объеме происходит выделение большого количества тепловой энергии, в результате чего некоторый объем этой жидкости вскипает, в результате чего образуется газожидкостная смесь. Это приводит к возникновению высокого гидравлического давления. Величина этого давления может достигать десятков и даже сотен МПа [1, 2].

Электрогидравлический эффект (ЭГЭ) может применяться в технологических процессах, где существует необходимость получения высоких давлений, например, в машиностроении для обработки металлов давлением, металлургической промышленности, горно-геологоразведочной, нефтяной и пищевой промышленности для дробления различных

материалов [3, 4]. ЭГЭ используется также для создания насосов различного назначения [5].

Одним из главных преимуществ технических устройств, созданных на базе ЭГЭ является их экологичность. Воздействию гидравлического удара на объект не привносит в систему дополнительных источников загрязнения.

В электрогидравлических системах переход электрической энергии в механическую происходит без промежуточного преобразования электрической энергии в магнитную, как, например, в электродвигателях. Такая система преобразование энергии имеет как свои достоинства, так и недостатки.

К достоинствам можно отнести возможность получения градиента давления в сотни мегапаскалей в малогабаритных устройствах, возможность создания высокого давления как в герметичном, так и в открытом объеме рабочей камеры, отсутствие дополнительных источников загрязнения при технологическом процессе.

Недостатками метода являются: необходимость получения высоких напряжений между рабочими электродами, сложность описания гидродинамических процессов, возникающих в рабочей камере при протекании разрядных явлений, создание помех радиотехнической аппаратуре в момент разряда, сложность контроля электрических параметров системы из-за высокого уровня помех.

В результате описанных проблем, возникающих при создании технических и технологических систем, базирующихся на электрогидравлическом эффекте, разработка таких систем опирается, в большей мере, на эксперимент чем теоретический расчет. Это относится, как к гидравлической, так и к электрической части проекта.

При создании технических систем на базе ЭГЭ необходимо иметь достоверную информацию о процессах, протекающих в гидравлической системе, которые формируются за счет перехода электрической энергии разряда в механическую. Поэтому система формирования разрядного импульса должна создаваться на основе расчетов переходных процессов, возникающий в электрической цепи, как при запасании энергии, так и при разрядных явлениях в жидкостной среде.

Технологии расчетов переходных процессов в электрогидравлической системе формирования ЭГЭ посвящена данная статья.

Принцип работы системы на базе электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект заключается в создании попеременно высокого и низкого давления в межэлектродном пространстве при протекании искрового электрического разряда через жидкость. Простейшая схема электрогидравлической установки была предложена выдающимся изобретателем Львом Александровичем Юткиным еще в первой половине двадцатого века. С тех пор она не претерпела, практически, никаких изменений. Блок-схема устройства для создания ЭГЭ изображена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема установки для получения электрогидравлического эффекта

Источником напряжения является, как правило, промышленная сеть ~ 220 В, 50 Гц. Для создания высокоэнергетического гидравлического удара, в жидкости необходимо создать искровой разряд достаточно большой длины. Длина разрядного канала будет определять величину давления, создаваемого в системе ЭГЭ. Для получения давлений, достаточных для перекачки жидкости, т.е. в насосных системах, протяженность искрового разряда может быть несколько миллиметров, для систем дробления материалов и для технологических установок обработки металла давлением – в десятки и даже сотни раз больше.

Для того чтобы в рабочей камере, заполненной жидкостью, возник искровой разряд необходимо получить на электродах постоянное напряжение, величина которого будет превышать напряжение пробоя жидкой среды. Это напряжение зависит от электрического удельного сопротивления жидкости, которое может колебаться от порядка $\rho = 10^{11}$ Ом·м для трансформаторного масла, бензина, $\rho = 10^4$ Ом·м для дистиллированной воды, до $\rho = 20$ Ом·м для грунтовой воды. Удельное сопротивление морской воды и того меньше $\rho = 0.3$ Ом·м [6].

Таким образом, для получения искрового разряда в жидкой среде необходимо определить величины межэлектродного расстояния и напряжения на электродах, значения которых имеют прямую пропорциональность. Для получения искрового разряда в межэлектродном пространстве, заполненном антифризом ($\rho = 10^5$ Ом·м) [7], длиной $s = 5$ мм требуется напряжение порядка $U = 50$ кВ. Таким образом, в момент пробоя в межэлектродном пространстве будет протекать ток

$$I = \frac{U}{\rho \cdot s} = \frac{50 \cdot 10^3}{10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ А.}$$

Следовательно, в момент формирования искрового разряда выделяется мощность

$$P = U \cdot I = 50 \cdot 10^3 \cdot 100 = 5 \text{ МВт.}$$

При этом длительность разряда не превышает десятка миллисекунд. За это время электрическая энергия переходит в тепловую и механическую.

Для формирования напряжения, достаточного для возникновения разряда в рабочей жидкости, необходимо преобразовать переменное напряжение промышленной сети ~ 220 В, 50 Гц в постоянное напряжение десятков киловольт. Это можно осуществить, например, с помощью диодно-емкостного умножителя напряжения (рис. 2).

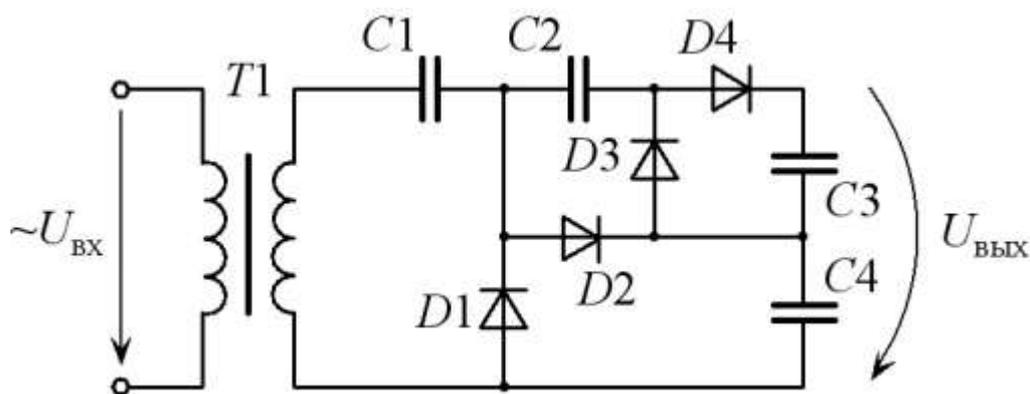


Рис. 2 Умножитель напряжения

В схеме рис. 2 переменное напряжение со вторичной обмотки трансформатора подается на диодно-емкостную схему. В течение первой четверти периода (T) входного воздействия ($\sim U_{\text{ВХ}}$) (рис. 2), диоды $D1$ и $D3$ будут находиться в закрытом состоянии, а диоды $D2$ и $D4$ – в открытом. Конденсаторы $C1$ и $C4$ зарядятся до значения $U_{\text{ВХ}}/2$. Напряжения на $C2$ и $C3$, а также напряжение на диоде $D4$, будут, практически, равны нулю, т.к. они зашунтированы низким сопротивлением открытого диода $D2$.

На интервале времени $t = \frac{T}{4} \div \frac{T}{2}$ входное напряжение начинает убывать, напряжение на диодах $D2$ и $D4$ становятся отрицательным, диоды закрываются, напряжение на конденсаторах остается неизменным (происходит медленный разряд конденсаторов за счет токов утечки и обратных токов диодов).

В момент прихода третьего четвертьпериода входного воздействия ($t = \frac{T}{2} \div \frac{3T}{4}$) открываются диоды $D1$ и $D3$, и начинается перезаряд конденсатора $C1$ и заряд $C2$. Напряжение на $C3$, $C4$ остаются, практически, неизменными: $U_{C3} = 0$; $U_{C4} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$.

На интервале $t = \frac{3T}{4} \div T$ диоды $D1$ и $D2$ закрываются, а диоды $D3$ и $D4$ открываются. Напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ начинают уменьшаться (по модулю), а на $C3$ и $C4$ расти. В результате по истечении одного периода входного воздействия, напряжение на $C3$ становится равным $U_{C3} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{4}$, а $U_{C4} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{2}$.

Следующий цикл перезарядки конденсаторов начинается не с нулевого значения, поэтому в конце следующего периода, напряжения растут. И в установившемся режиме напряжения становятся: $U_{C3} = U_{\text{ВХ}}$; $U_{C4} = U_{\text{ВХ}}$. Следовательно, выходное напряжение будет равно удвоенному амплитудному значению входного напряжения. Графики напряжений на конденсаторах $C3$ и $C4$ изображены на рис. 3.

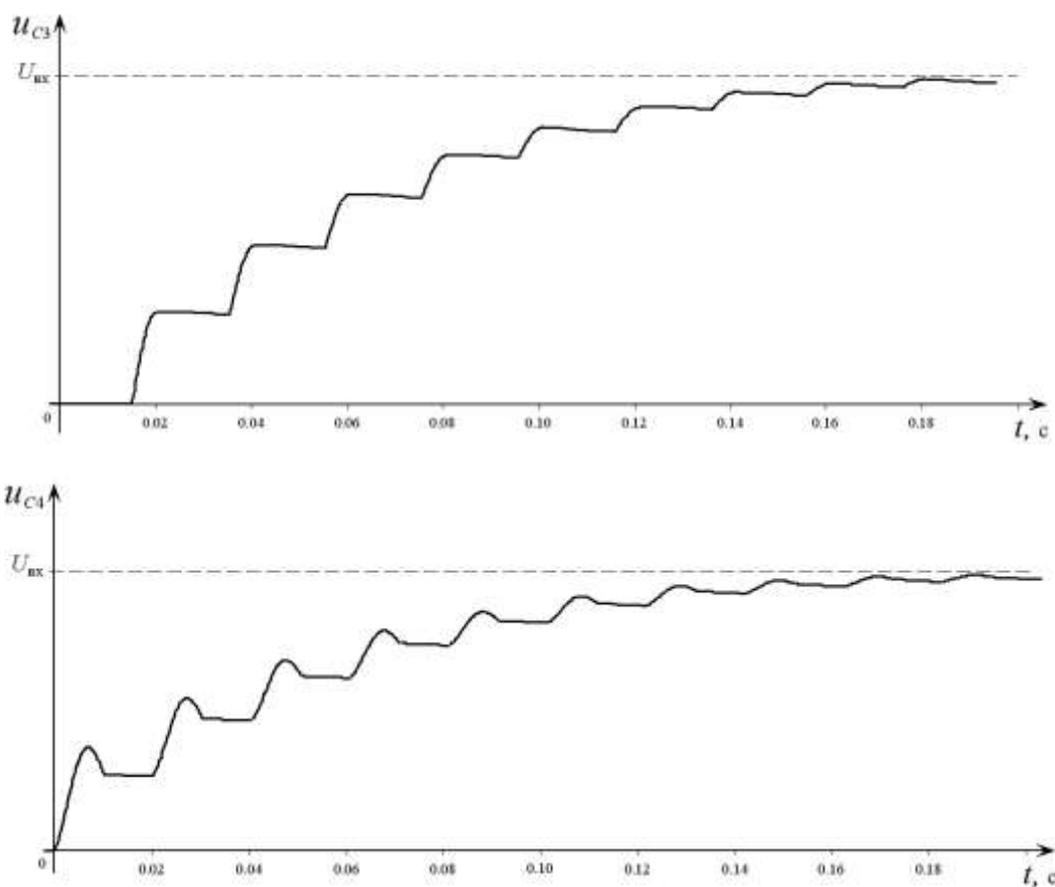


Рис. 3. Графики напряжений на конденсаторах $C3$ и $C4$

Выходное напряжение ($U_{вых}$ рис. 2) складывается из напряжений на обкладках конденсаторов $C3$ и $C4$: $U_{вых} = U_{C3} + U_{C4}$. График выходного напряжения имеет вид, представленный на рис. 4.

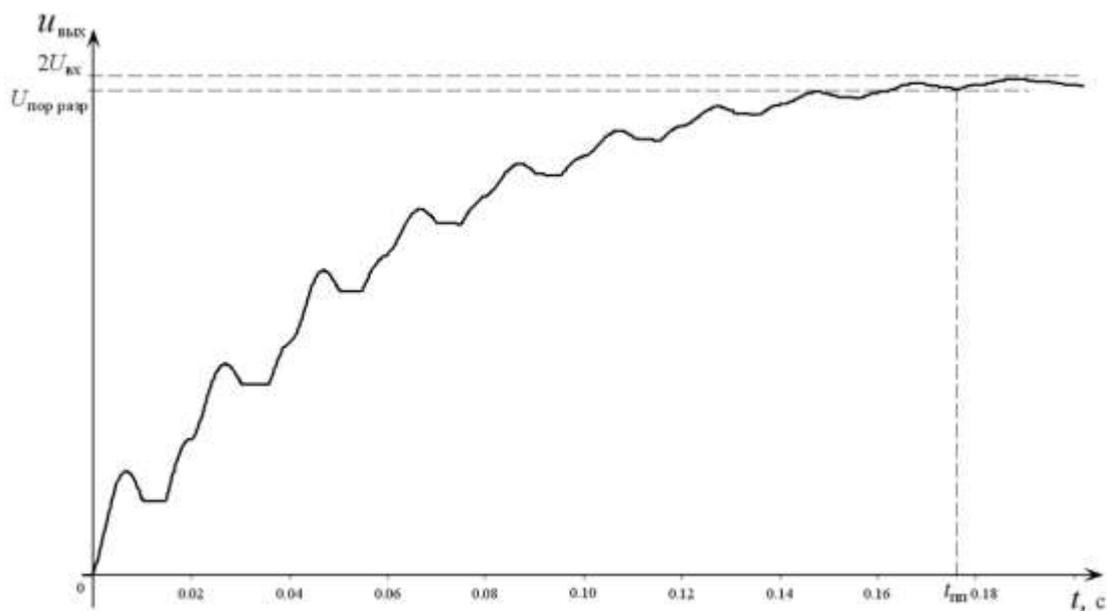


Рис. 4. График выходного напряжения умножителя

Время окончания переходного процесса (наступление квазиустановившийся режима) зависит от емкости конденсаторов и характеристик диодов. Постоянная времени цепи при заряде конденсаторов на первом четвертьпериоде цикла очень мала (микросекунды), при разряде за счет токов утечки на втором четвертьпериоде – велика (десятые доли секунды, а при больших емкостях конденсаторов – секунды). Для графиков, представленных на рис. 3, 4 время формирования нужного высокого напряжения $U_{\text{вых}}$ можно считать равным десяти периодам входного воздействия, т.е. для промышленной сети ~220 В, 50 Гц

$$t_{\text{уст}} = \frac{1}{50} \cdot 10 = 0.2 \text{ с.}$$

Высокое напряжение с зарядного(ых) конденсатора(ов) подается на электроды. Чтобы сформировать ударный, т.е. имеющий ступенчатый характер, механический импульс в рабочей среде системы, необходимо подавать на электроды напряжение, также имеющее ступенчатый вид. Т.е. необходимо управлять напряжением на электродах с помощью специального коммутирующего устройства. В качестве такого устройства, как правило, используются разрядники.

Существуют несколько типов разрядников: воздушные, газовые, вентильные, полупроводниковые и т.д. Принцип действия воздушных и газовых разрядников основан на возникновении лавинообразно нарастающего тока в межэлектродном пространстве за счет ионизации воздуха или газа при достижении на электродах порогового напряжения.

Газовые разрядники выполняются в двухэлектродном или трехэлектродном варианте. Два электрода являются основными, рабочими – они включаются в коммутируемую цепь, третий электрод называют «поджигающим» и используется для управления процессом формирования разрядного тока.

Перед включением между рабочими электродами приложено высокое напряжение, но ток через прибор не протекает, так как электроды разделены газообразным диэлектриком. При достижении напряжения порогового значения, в межэлектродном промежутке происходит лавинное размножение зарядов, рабочая газовая среда переходит в состояние плазмы, при этом электрическое сопротивление между рабочими электродами падает на много порядков, коммутируя внешнюю электрическую цепь.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) разрядников имеет вид, представленный на рис. 4. Такой характеристикой обладают и полупроводниковые элементы – варисторы, которые также часто используются в качестве разрядников. Вольт-амперные характеристики газовых разрядников, в отличие от варисторов, являются существенно несимметричной. Кроме того, в цепях защиты от перегрузок один из электродов газовых разрядников, как правило, заземляется.

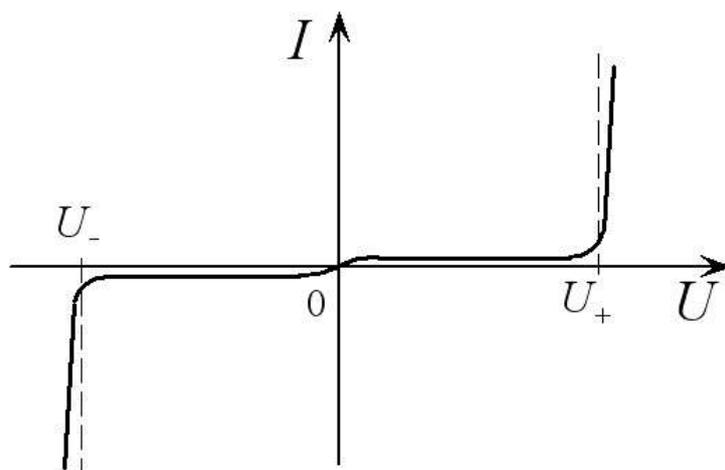


Рис. 4. ВАХ полупроводникового разрядника

Разрядник в системе электрогидроудара подбирается таким образом, чтобы пороговое напряжение $U_{\text{пор}} = U_+$ (рис. 4) обеспечивало уверенный пробой межэлектродного пространства, т.е. $U_{\text{пор}}$ должно быть чуть меньше напряжения на зарядном конденсаторе в момент окончания переходного процесса. Кроме того, используя управляемые (трехэлектродные) разрядники в качестве коммутирующего элемента, можно регулировать величину напряжения на электродах и, следовательно, давление внутри рабочей полости системы ЭГЭ.

Процессы, происходящие в межэлектродном пространстве рабочей полости электрогидравлической системы, заполненной жидкостью, аналогичны процессам, происходящим в газовой полости разрядника. При подаче импульса высокого напряжения, с положительного электрода системы ЭГЭ начинает расти искровой канал (стример) до тех пор, пока он не достигнет отрицательного электрода. Эту стадию называют предразрядной. На этом этапе формируется канал прохождения разрядного тока через жидкость. Жидкость ионизируется, сопротивление ее снижается. Этот этап сопровождается выделением тепловой энергии, часть жидкость разлагается на составляющие газы. Таким образом, в рабочей камере образуется газо-жидкостная полость, называемая разрядным каналом. Стример представляет собой плазменное образование внутри этой газо-жидкостной среды.

Процесс создания гидравлического удара можно разделить на два этапа: предразрядный и рабочий. В течении предразрядной стадии энергия электрического поля тратится на формирование разрядного канала и не участвует в непосредственном процессе создания гидравлического удара. Чем больший объем будет иметь разрядный канал, образуемый на предразрядной стадии, тем меньшее давление будет возникать в рабочем режиме. С целью снижения потерь энергии, расходуемой в предразрядной стадии, применяют различные средства, вплоть до замыкания электродов, однако в таком случае частота получения разрядов ограничена, так как процесс замыкания электродов очень инерционен, требует большого времени и сложен в реализации.

В процессе формирования разрядного канала расходуется около четверти энергии запасенной для создания ЭГЭ.

На следующей, рабочей стадии стример замыкает цепь, формируя разрядный канал, и в межэлектродный промежуток за короткое время поступает энергия, запасенная в зарядном конденсаторе. По мере поступления энергии, температура плазмы стримера в канале повышается до десятков тысяч градусов Кельвина, давление в канале достигает значений в сотни мегапаскаль. Плазма с большой скоростью раздвигает жидкость вокруг себя, образуя кавитационную полость. В жидкость излучается возмущение сжатия, которое при достаточно интенсивном разряде приобретает структуру ударной волны.

Далее, по инерции полость продолжает расширяться, плазма в ней остывает и превращается в пар, давление быстро снижается. Начинается обратное движение жидкости. Паровая полость схлопывается, снова расширяется, вызывая в момент смены направления движения еще один пик давления, еще одну волну сжатия. Процесс расширения-схлопывания повторяется несколько раз.

Форма стримера определяется структурой рабочей среды (жидкости) в межэлектродном пространстве, а также формой и величиной межэлектродного напряжения. Пространственное развитие стримера происходит по пути наибольшей плотности электрического поля в межэлектродном пространстве.

Напряженность электрического поля у поверхности наэлектризованного тела при постоянной линейной плотности заряда на единицу длины возрастает при увеличении кривизны поверхности. Например, для сферического тела напряженность определяется по формуле: $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2}$, где R – радиус сферы; q – заряд, равномерно распределенный по поверхности или объему; ϵ_0 – электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$); ϵ – диэлектрическая проницаемость среды в рабочей полости. Следовательно, вокруг заостренного электрода напряженность поля существенно выше, чем на поверхностях с большим радиусом кривизны. Поэтому электрод-источник стримера выполняют заостренным. Чтобы предотвратить распространение разряда в направлении, перпендикулярном оси электродов, приемный электрод выполняют с большим радиусом кривизны.

Область, охваченная разрядом, определяется границей, за которой напряженность электрического поля недостаточна для распространения разряда. При недостаточно большом напряжении для возникновения искрового разряда, на заостренном электроде системы может возникнуть коронный разряд, который проявляется в слабом свечении вокруг электрода и в возмущении состояния рабочей жидкости вблизи электрода. Такой вид разряда существенно снижает эффективность системы ЭГЭ. Поэтому напряжение, подаваемое на электроды должно изменяться, практически, ступенчато до величины, обеспечивающей зажигание именно искрового разряда, т.е. электрической дуги.

Форма стримера и форма области высокого давления напрямую зависят от формы электрического поля в межэлектродном пространстве (рис. 5).

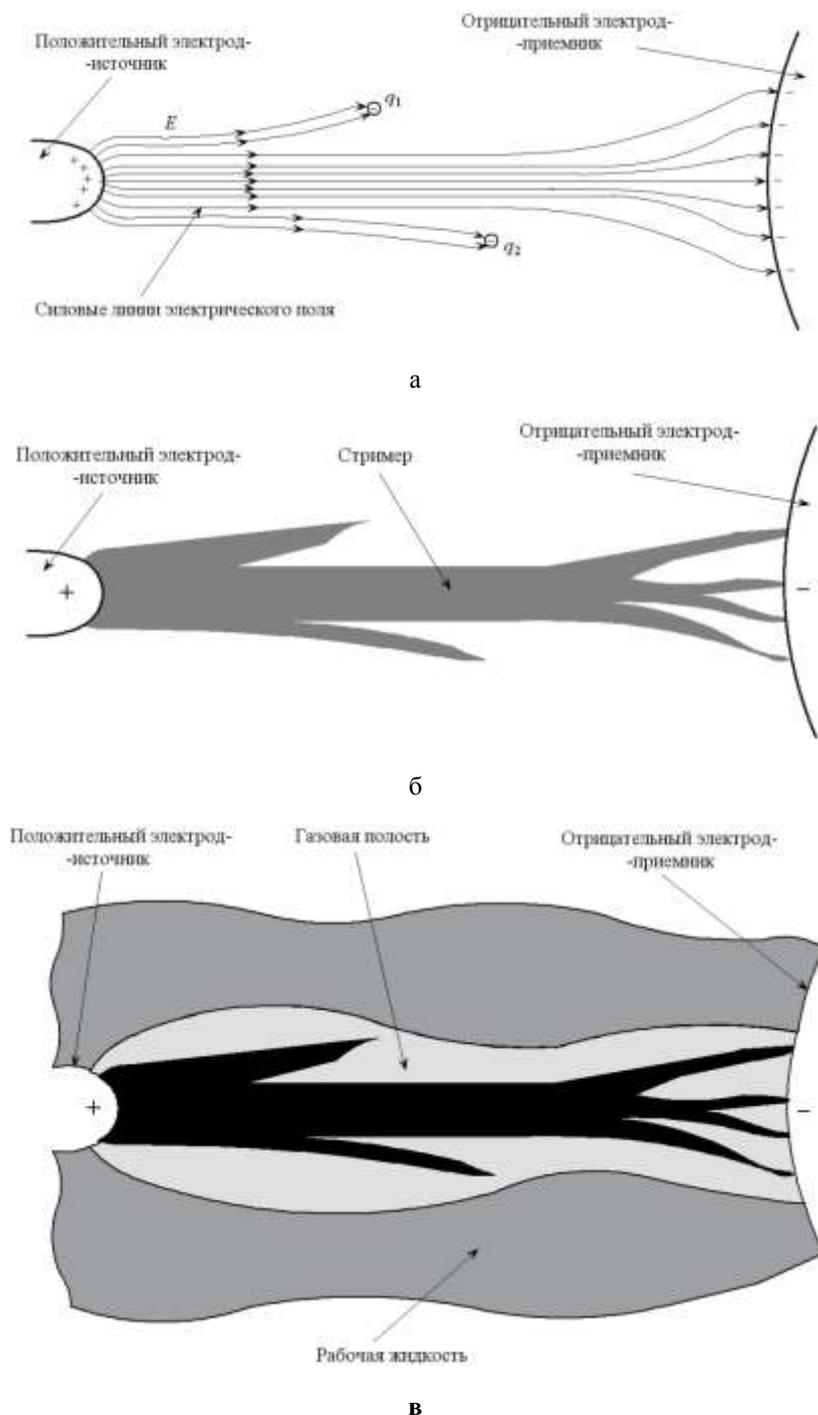


Рис. 5. Формирование стримера в межэлектродном пространстве: а – силовые линии электрического поля; б – форма стримера; в – область высокого давления (кавитационная область)

По мере разряда накопительного конденсатора, напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве снижается, дуговой разряд гаснет. В рабочей жидкости распространяется механический колебательный переходной процесс, характеристики которого будут определяться как свойствами механической структуры системы (геометрией рабочей полости, свойствами рабочей жидкости, механическими характеристиками стенок рабочей камеры и т.д.), так и видом и характеристиками переходных процессов в электри-

ческой системе ЭГЭ. Рассмотрим технологию расчета электрических переходных процессов при возникновении искрового разряда в системе ЭГЭ.

Переходные процессы в электрической системе ЭГЭ

Для расчета переходных процессов в системе ЭГЭ определим временные интервалы, в которых состояние системы можно считать квазиустановившимся. Рассмотрим работу схемы, начиная с момента времени, когда напряжение на зарядном конденсаторе достигает значения, равного напряжению срабатывания разрядника. Это время условно примем $t = 0$. При $U_C < U_{\text{пор}}$ сопротивление разрядника очень велико (рис. 4), при $U_C > U_{\text{пор}}$ сопротивление становится равным единице и даже долей Ома, поэтому в схеме, моделирующей работу электрической системы ЭГЭ, разрядник можно представить ключом $S_{\text{разр}}$ (рис. 6).

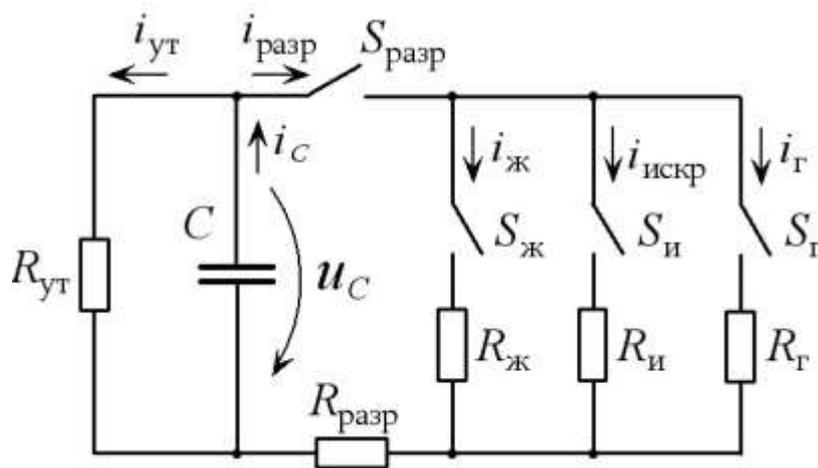


Рис. 6. Электрическая модель системы ЭГЭ

В схеме рис. 6 зарядная цепь накопительного конденсатора не рассматривается. Ее работа учитывается с помощью напряжения u_C , т.е. напряжения на конденсаторе для момента времени до срабатывания разрядника. Это время обозначим $t = 0_-$.

На схеме рис. 6 изображены: $R_{\text{ут}}$ – ветвь, моделирующая токи утечки конденсатора; $R_{\text{разр}}, S_{\text{разр}}$ – ветвь, моделирующая работу разрядника; $R_{\text{ж}}, S_{\text{ж}}$ – ветвь, моделирующая межэлектродный участок рабочей полости, заполненный жидкостью; $R_{\text{и}}, S_{\text{и}}$ – ветвь, моделирующая процесс возникновения искрового разряда в жидкости; $R_{\text{г}}, S_{\text{г}}$ – ветвь, моделирующая процесс протекания искрового разряда в газовой среде рабочей полости.

После срабатывания разрядника (замыкание ключа $S_{\text{разр}}$) ток разряда ($i_{\text{разр}}$) конденсатора протекает через жидкость между рабочими электродами, т.е. ключ $S_{\text{ж}}$ замкнут, а ключи $S_{\text{и}}$ и $S_{\text{г}}$ разомкнуты. Это стадия описана выше, как предразрядная. Жидкость в межэлектродном пространстве ионизируется и режим работы переходит в область искрового разряда в жидкостной среде. Этот режим моделируется размыканием ключа $S_{\text{ж}}$ и замыканием ключа $S_{\text{и}}$. Ключ $S_{\text{г}}$ остается в разомкнутом положении. Под воздействием высокой

температуры плазмы разряда рабочая жидкость испаряется и искровой разряд проходит в газовой среде. При этом ключи $S_{ж}$ и $S_{и}$ разомкнуты, а ключ $S_{г}$ – замкнут. При этом на каждой стадии работы схемы конденсатор C разряжается, напряжение u_C на его обкладках падает. В момент, когда напряжение становится настолько мало, что уже не способно поддерживать высокоэнергетичную стадию искрового разряда, искровой разряд гаснет и между электродами в среде рабочей жидкости будет протекать ток $i_{ж}$, т.е. ключи $S_{и}$ и $S_{г}$ будут разомкнуты, а ключ $S_{ж}$ – замкнут. Однако в этом режиме напряжение на разряднике падает ниже критического значения и он разрывает разрядную цепь конденсатора (размыкается ключ $S_{разр}$). Этот момент можно считать окончанием переходного процесса разряда. Процесс может быть повторен после того, как конденсатор снова зарядится до значения напряжения, достаточного для срабатывания разрядника.

Для расчета переходных процессов необходимо определиться с параметрами моделирующих элементов схемы рис. 6.

Величина входного напряжения, т.е. напряжения U_C , равна пороговому напряжению срабатывания разрядника: $U_C = U_{пор\ разр}$ (см. рис. 4), которое, в свою очередь, выбирается из расчета быстродействия системы (время $t_{пп}$ рис. 4) и уровня напряжения в межэлектродном пространстве.

Сопротивление $R_{разр}$, в режиме $U_C > U_{пор}$ на три-четыре порядка меньше сопротивления $R_{ут}$, сопротивления $R_{и}$ и $R_{г}$ имеют один порядок, но сопротивление ионизированной жидкости выше сопротивления ионизированного газа ввиду большей подвижности ионов в газовой среде. При этом сопротивление $R_{г}$ можно считать равным сопротивлению $R_{разр}$. Сопротивление $R_{ж}$, т.е. сопротивление неионизированной жидкости в рабочей полости гораздо выше сопротивлений $R_{и}$ и $R_{г}$ и определяется типом рабочей жидкости. Примем $R_{ж} = 10^3 R_{и}$.

Начальными условиями работы схемы ($t = 0_-$) будут: напряжение $U_C(0_-) = 2U_{вх}$; ключ $S_{разр}$ разомкнут; ключ $S_{ж}$ замкнут; ключи $S_{и}$ и $S_{г}$ разомкнуты.

При замыкании ключа $S_{разр}$ (срабатывании разрядника) в цепи возникает переходной процесс. Цепь рис. 6 имеет первый порядок, следовательно, напряжение на конденсаторе C (напряжение на электродах рабочей полости) и ток разряда будут определяться выражениями:

$$u_C(t) = U_C(\infty) + A_1 e^{-s_1 t},$$

$$i_{разр}(t) = I_{разр}(\infty) + B_1 e^{-s_1 t},$$

где $U_C(\infty)$, $I_{разр}(\infty)$ – установившиеся значения напряжения на конденсаторе и тока разряда после окончания переходного процесса; A_1 , B_1 – коэффициенты, определяемые из начальных условий; s_1 – корень характеристического уравнения [8].

Очевидно, что, ввиду отсутствия в схеме источников, напряжение $U_C(\infty)$ и ток $I_{разр}(\infty)$ равны нулю. Характеристическое уравнение цепи рис. 6 при разомкнутых ключах $S_{и}$ и $S_{г}$ и замкнутых $S_{разр}$ и $S_{ж}$ имеет вид: $\frac{1}{Cs_1} + \frac{R_{ут} \cdot (R_{разр} + R_{ж})}{R_{ут} + R_{разр} + R_{ж}} = 0$. Корень характери-

ческого уравнения: $S_1 = -\frac{R_{ут}+R_{разр}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot (R_{разр}+R_{ж})C}$. Т.к. $R_{ж} \gg R_{разр}$, сопротивлением $R_{разр}$ можно пренебречь, следовательно, $S_1 = -\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}$.

Учитывая полученные соотношения, можно записать:

$$u_C(t) = A_1 e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t}; i_{разр}(t) = B_1 e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t}.$$

Для определения значения коэффициентов A_1 и B_1 подставим в эти уравнения время $t = 0_+$ и, учитывая $U_C(0_+) = U_C(0_-) = 2U_{вх}$ и $I_{разр}(0_+) = \frac{2U_{вх}}{R_{ж}}$, получим $A_1 = 2U_{вх}$, $B_1 = \frac{2U_{вх}}{R_{ж}}$. Следовательно,

$$u_C(t) = 2U_{вх} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t}; i_{разр}(t) = \frac{2U_{вх}}{R_{ж}} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t}.$$

График напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ представляет собой экспоненту, идущую из значения $2U_{вх}$ и стремящуюся к нулю. Если до коммутации значение напряжения $U_C(0_-) = 2U_{вх}$, то разрядный ток был равен току утечки:

$$I_{разр}(0_-) = I_{ут}(0_-) = \frac{U_C(0_-)}{R_{ут}} = \frac{2U_{вх}}{R_{ут}}.$$

Этот переходной процесс будет длиться очень малое время (доли микросекунды), т.к. жидкость в рабочей полости ионизируется и между рабочими электродами формируется искровой разряд. В схеме рис. 6 ключ $S_{ж}$ размыкается, ключ $S_{и}$ замыкается, ключ $S_{г}$ остается в разомкнутом состоянии. Этот момент времени примем $t = t_1$. Сопротивление канала стримера падает на три-четыре порядка. В этом режиме можно пренебречь сопротивлением утечки ($R_{ут}$). Корень характеристического уравнения будет на несколько порядков больше, чем в предыдущем режиме работы: $S_2 = -\frac{1}{(R_{разр}+R_{и})C}$. Следовательно, уравнения для напряжения на конденсаторе и разрядного тока будут следующими:

$$u_C(t) = A_2 e^{-\frac{1}{(R_{разр}+R_{и})C}t}; i_{разр}(t) = B_2 e^{-\frac{1}{(R_{разр}+R_{и})C}t}.$$

Начальными условиями для расчета коэффициентов A_2 и B_2 являются напряжение на конденсаторе в момент возникновения искрового разряда

$$u_C(t_{1-}) = 2U_{вх} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t_1} = u_C(t_{1+}) \text{ и } i_{разр}(t_{1+}) = \frac{2U_{вх}}{R_{разр}+R_{и}} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t_1}.$$

Тогда значения коэффициентов будут следующими:

$$A_2 = 2U_{вх} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t_1}, B_2 = \frac{2U_{вх}}{R_{разр}+R_{и}} e^{-\frac{R_{ут}+R_{ж}}{R_{ут} \cdot R_{ж} \cdot C}t_1}.$$

Следовательно, переходной процесс в режиме искрового разряда описывается уравнениями:

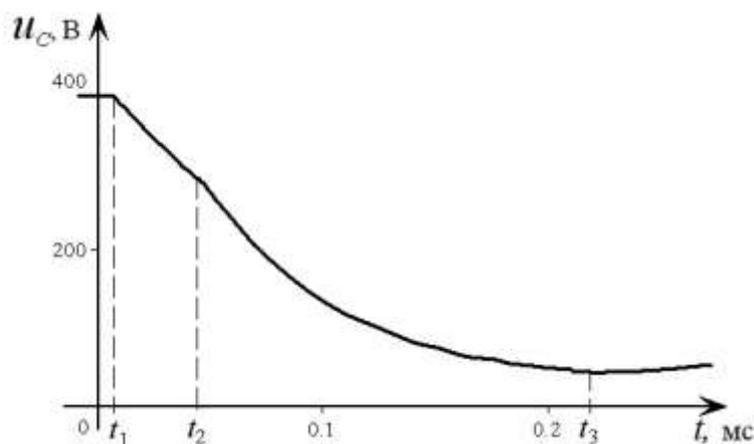
$$u_C(t) = 2U_{\text{ВХ}} e^{-\frac{R_{\text{УТ}}+R_{\text{Ж}}}{R_{\text{УТ}} \cdot R_{\text{Ж}} \cdot C} t_1} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{И}})C} t}; \quad i_{\text{РАЗР}}(t) = \frac{2U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{РАЗР}} + R_{\text{И}}} e^{-\frac{R_{\text{УТ}}+R_{\text{Ж}}}{R_{\text{УТ}} \cdot R_{\text{Ж}} \cdot C} t_1} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{И}})C} t}.$$

В процессе протекания искрового разряда жидкость в межэлектродном пространстве рабочей полости испаряется и стример будет замыкать электрическую цепь через ионизированный газ. Этот режим работы системы начинается в момент времени $t = t_2$. Процессы, протекающие в системе, полностью идентичны процессам предыдущего режима и отличаются лишь электрической проводимостью среды. Следовательно, расчет переходного процесса будет аналогичен предыдущему. В результате можно получить следующие уравнения для напряжения u_C и разрядного тока $i_{\text{РАЗР}}(t)$:

$$u_C(t) = 2U_{\text{ВХ}} e^{-\frac{R_{\text{УТ}}+R_{\text{Ж}}}{R_{\text{УТ}} \cdot R_{\text{Ж}} \cdot C} t_1} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{И}})C} t_2} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{Г}})C} t};$$

$$i_{\text{РАЗР}}(t) = \frac{2U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{РАЗР}} + R_{\text{Г}}} e^{-\frac{R_{\text{УТ}}+R_{\text{Ж}}}{R_{\text{УТ}} \cdot R_{\text{Ж}} \cdot C} t_1} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{И}})C} t_2} e^{-\frac{1}{(R_{\text{РАЗР}}+R_{\text{Г}})C} t}.$$

Переходной процесс в этом режиме будет проходить до момента времени, когда напряжение на конденсаторе станет ниже уровня, при котором становится невозможным поддержание искрового разряда в газовой среде межэлектродного пространства. Цепь при этом, практически размыкается (замыкается через неионизированный жидкостно-газовый промежуток рабочей камеры, сопротивление которого очень велико), ток становится равен току утечки. При многократно сниженном напряжении на конденсаторе в процессе разряда, этот ток можно считать равным нулю. Коммутирующее устройство (разрядник) размыкает цепь разряда, система переходит в режим заряда накопительного конденсатора. Цикл работы системы может повторяться. Таким образом, в цепи формируется переходной процесс, график которого изображен на рис. 7. График построен для следующих значений номиналов элементов схемы рис. 6: $R_{\text{УТ}} = 1 \text{ МОм}$; $R_{\text{РАЗР}} = 1 \text{ Ом}$; $R_{\text{Ж}} = 100 \text{ кОм}$; $R_{\text{И}} = 10 \text{ Ом}$; $R_{\text{Г}} = 5 \text{ Ом}$; $C = 10 \text{ мкФ}$.



а

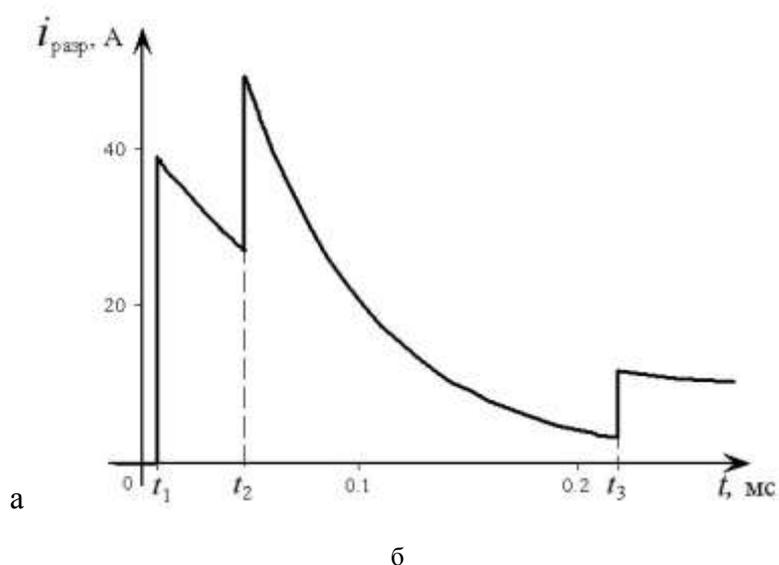


Рис. 7. Графики переходных процессов в системе ЭГЭ: а – напряжение на конденсаторе; б – разрядный ток

Таким образом, имея в своем распоряжении математический аппарат расчета переходных процессов, происходящих в электрической цепи системы ЭГЭ, можно формировать рабочий импульс с заданными характеристиками. Например, увеличение емкости накопительного конденсатора в два раза приводит к изменению параметров импульса в соответствии с графиками рис. 8.

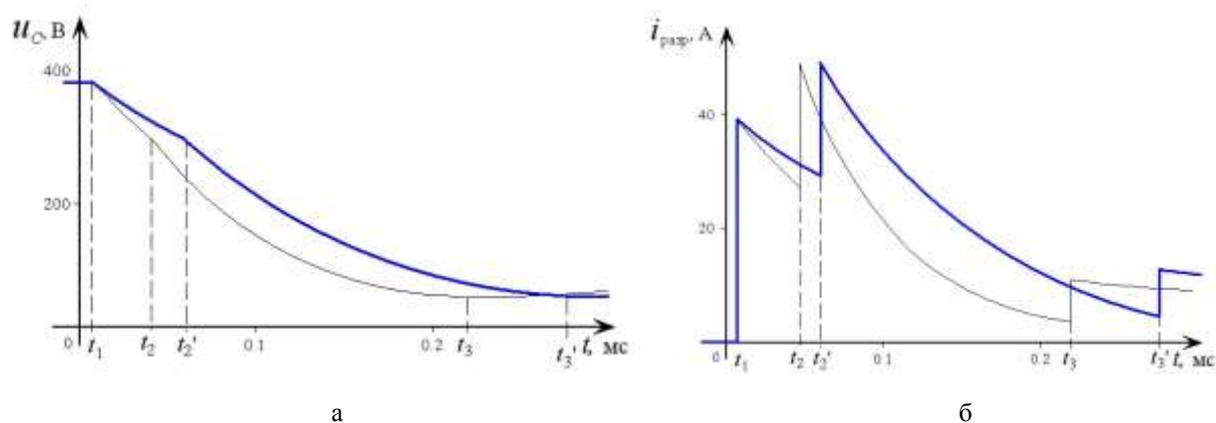


Рис. 8. Графики переходных процессов в системе ЭГЭ при увеличении емкости разрядного конденсатора: а – напряжение на конденсаторе; б – разрядный ток

На рис. 8 тонкой черной линией представлен исходный вариант переходного процесса, а толстой синей – при увеличении емкости конденсатора в два раза ($C = 20 \text{ мкФ}$) при тех же номиналах остальных элементов цепи рис. 6.

В электрическую модель системы ЭГЭ можно вводить и дополнительные элементы, например, катушку, моделирующую паразитную индуктивность проводов и вихревые токи. В этом случае, схема примет вид рис. 9.

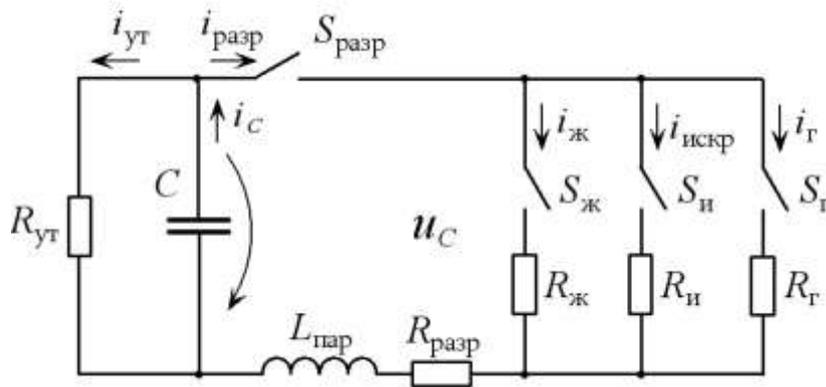


Рис. 9 Электрическая модель системы ЭГЭ с учетом паразитной индуктивности

При введении в схему рис. 9 катушки индуктивности, цепь приобретает второй порядок, следовательно в ней может возникнуть колебательный переходной процесс, условием возникновения которого будет наличие комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения. В режиме искрового разряда характеристическое уравнение можно записать в виде: $LS + \frac{R_{ут} \cdot (R_{разр} + R_{и})}{R_{ут} + R_{разр} + R_{и}} + \frac{1}{CS} = 0$. Учитывая $R_{ут} \gg R_{разр} + R_{и}$, можно записать: $LS + (R_{разр} + R_{и}) + \frac{1}{CS} = 0$. В таком случае, корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными при выполнении условия: $(R_{разр} + R_{и})^2 - 4 \frac{L}{C} < 0$ или $L > \frac{(R_{разр} + R_{и})^2 C}{4} = \frac{(1+10)^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{4} = 0.3$ мГн. Т.к. паразитная индуктивность имеет порядок десятка микрогенри, можно сделать вывод, что колебательный переходной процесс в электрической цепи системы ЭГЭ вряд ли возможен. Колебательные явления в электрической цепи могут возникнуть, если учесть механические колебания давления в кавитационной области межэлектродного пространства при расширении и схлопывании газожидкостной полости.

Выводы

Одним из главных недостатков технических устройств, создаваемых на базе электрогидравлического эффекта, является сложность воспроизведения в рабочем цикле идентичных ударных характеристик. Причиной этого является многомерность и нелинейность задачи анализа электромеханической системы в ее совокупности. Однако предложенный выше алгоритм расчета электрических переходных процессов позволяет определить параметры искрового разряда в рабочей полости, а, следовательно, предсказать поведение механической системы ЭГЭ.

Предложенный алгоритм, как показано в работе, может быть усовершенствован и приведен к параметрам реального технического устройства, путем введения в цепь емкостной модели таких элементов, как паразитная индуктивность, нелинейных элементов, моделирующих изменение электрической проводимости среды при формировании стри-

мера и т.д. Кроме того, в цепь электрической модели можно включать ветви, учитывающие периодические явления изменения давления в рабочей камере при расширении и схлопывании кавитационных областей. Но такой детальный расчет, естественно, нужно проводить для конкретных параметров технического устройства.

Список литературы

1. Юшков Ю.Г., Климов А.С., Гричневский Е.А., Юшков А.Ю. Исследование инициирования электрического разряда в воде при разработке электрогидравлической технологии // Технические науки: теория и практика: междунар. науч. конф. (Чита, Россия, 20-23 апреля 2012 г.): Сб. тр. Чита: Молодой ученый, 2012. С. 139-141. Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/7/2189/> (дата обращения 28.05.2018).
2. Дудышев В.Д. Методы преобразования энергии электрогидравлического удара и кавитации жидкости в тепло и иные виды энергии // Новая энергетика. 2005. № 1(20). С. 4-18. Режим доступа: http://001-lab.at.ua/NewEnergy/novaja_ehnergetika-2005_no.01.pdf (дата обращения 28.05.2018).
3. Дудышев В.Д. Новейшие энергетические технологии акад. Дудышева для получения дешевого тепла. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9916.html> (дата обращения 05.11.2017).
4. Нагдалян А.А., Оботурова Н.П. Влияние электрогидравлического эффекта на гидрацию биополимеров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 12. С. 74-78.
5. Бекаев А.А., Соковиков В.К., Мерзликин В.Г., Строков П.И., Мокринская А.Ю. Использование эффекта Л.А. Юткина в электрогидравлических устройствах // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ), посвященная 145-летию МГТУ «МАМИ» (Москва, 17 ноября 2010 г.): Материалы. М.: МГТУ «МАМИ», 2011. С. 22-32. Режим доступа: http://mospolytech.ru/science/mami145/scientific/article/s07/s07_04.pdf (дата обращения 28.05.2018).
6. Королев А.П., Баршутин С.Н. Материалы электроники и электротехники: учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2010. 79 с.
7. Григорьев А. Л. Формирование ударных волн импульсными электрическими разрядами в воде и исследование их воздействия на преграды: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 27 с.
8. Ситников А.В. Основы электротехники: учебник. М.: КУРС: ИНФРА-М., 2017. 288 с.
9. Ситников А.В., Масленникова С.И. Переходные процессы в электростатических системах // Радиостроение: электрон. журн. 2017. № 2. С. 18-36.
DOI: [10.24108/rdopt.0217.0000097](https://doi.org/10.24108/rdopt.0217.0000097)

10. Бекаев А.А., Соковиков В.К., Строков П.И. Электрогидравлические устройства на основе эффекта Л.А. Юткина // Вестник машиностроения. 2014. № 7. С. 45-48.

Electrohydraulic Effect-based Discharge Pulse Formation in Systems

A.V. Sitnikov^{1,*}, I.A. Sitnikov², I.A. Shvetsov³,
A.Yu. Kurbatov²

sit_inna@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²LLC "KOBGARD", Moscow, Russia

³Public Joint Stock Company "Krasnogorsk Plant
n.a. S.A. Zverev", Krasnogorsk, Russia

Keywords: electrohydraulic effect, Yutkin effect, hydraulic shock, transient, spark discharge, electrodes, voltage multiplier, cavitation

To create an electrohydraulic effect, it is necessary to apply a voltage to the electrodes located in the liquid-filled working chamber. The voltage value should be high enough for a spark discharge to occur between the electrodes. In this case, in the working chamber there will be high pressure of the shock wave nature.

Based on the electrohydraulic effect, a variety of technological devices can be created, for example, for the metal working process, crushing hard materials, pumping fluid, etc. Such devices have high efficiency and are environmentally friendly because of being not an additional pollutant source.

High pressure in the working chamber arises from the high temperature of the plasma streamer in the inter-electrode space. A spark discharge occurs when there is an avalanche ionization of the liquid caused by the electric current between the working electrodes. A temperature jump, when there is the spark discharge, results in the partially evaporating liquid and the gas-liquid cavity formation around the streamer, which expands, creating a shock wave in the working chamber.

To create technological devices based on electrohydraulic effect, it is necessary to be able to calculate the transients that occur, both in the electrical part and in the mechanical one. The paper proposes an algorithm to calculate the electric transients using a simple capacitive model of the system. Gives an example of calculation for two capacitance values of the storage capacitor and shows how time characteristics of the capacitor voltage and the discharge current in the inter-electrode space are changed.

The proposed model is simple and adaptive for different tasks. Introducing the additional elements into its structure allows us to carry out more complex calculations, for example, to take into account parasitic inductance in the system, nonlinearity, and to consider spatial transients.

Possessing a skill in the algorithm for calculating transients, allowed us to form a voltage pulse on the electrodes so that the parameters of the shock wave in the liquid-filled working chamber had the specified time and amplitude characteristics.

To obtain the spark discharge in the inter-electrode space filled with liquid, it is necessary to form high voltage. Such a voltage can be obtained on the plates of the storage capacitor, using a voltage multiplier, operation of which the paper also discusses in detail.

References

11. Yushkov Yu.G., Klimov A.S., Grichnevskij E.A., Yushkov A.Yu. Issledovanie initsirovaniia elektricheskogo razriada v vode pri razrabotke elektrogidravlicheskoj tekhnologii [The study of the initiation of electric discharge in water in the development of electrohydraulic technologies]. *Tekhnicheskie nauki: teoriia i praktika: mezhdunarodnaia nauchnaia konferentsiia* [Technical sciences: Theory and practice: Intern. scientific conf. (Chita, Russia, April 20-23, 2012)]: Proc. Chita, 2012. Pp. 139-141. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/7/2189/>, accessed 28.05.2018 (in Russian).
12. Dudyshev V.D. Methods of transformation of energy of electrohydraulic impact and cavitation of liquid into heat and other types of energy. *Novaia Energetika* [New Energy Technologies], 2005, no. 1(20), pp. 4-18 (in Russian). Available at: http://001-lab.at.ua/NewEnergy/novaja_energetika-2005_no.01.pdf, accessed 28.05.2018 (in Russian).
13. Dudyshev V.D. *Novejshie energeticheskie tekhnologii akademika Dudysheva dlia polucheniia deshevoogo tepla* [Akademik Dudyshev's new energetic technologies for obtaining cheap heat]. Available at: <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9916.html>, accessed 5.11.2017 (in Russian).
14. Nagdalian A.A., Oboturova N.P. Influence of electrohydraulic effect on the biopolymers hydration. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Current Problems of the Humanities and the Natural Sciences], 2012, no. 12, pp. 74-78 (in Russian).
15. Bekaev A.A., Sokovikov V.K., Merzlikin V.G., Stokov P.I., Mokrinskaia A.Yu. Ispol'zovanie effekta L.A. Yutkina v elektrogidravlicheskih ustrojstvakh [The effect of L.A. Yutkin in electro-hydraulic devices]. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiia i podgotovka kadrov: mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaja konferentsiia AAI* [Automobile and tractor construction in Russia: development priorities and training: intern. scientific and technical conf. of the Association of automotive engineers (AAI), dedicated to the 145th anniversary of MSTU «MAMI» (Moscow, 17th of November, 2010)]: Proc. Moscow, 2011. Pp. 22-32. Available at: http://mospolytech.ru/science/mami145/scientific/article/s07/s07_04.pdf, accessed 28.05.2018 (in Russian).

16. Korolev A.P., Barshutin S.N. *Materialy elektroniki i elektrotehniki* [Materials of electronics and electrical engineering]: a textbook. Tambov: Tambov State Technical Univ. Publ., 2010. 79 p. (in Russian).
17. Grigor'ev A.L. *Formirovanie udarnykh voln impul'snymi elektricheskimi razriadami v vode i issledovanie ikh vozdeystviia na pregrady. Avtoref. kand. diss.* [Formation of shock waves by pulsed electric discharges in water and study of their impact on obstacles. Abstract of the Cand. diss.]. Moscow, 2007. 27 p. (in Russian).
18. Sitnikov A.V. *Osnovy elektrotehniki* [Foundations of electrotechnics]: a textbook. Moscow: Kurs Publ.; INFRA-M Publ., 2017. 288 p. (in Russian).
19. Sitnikov A.V., Maslennikova S.I. Transients in electrostatic systems. *Radiostroenie* [Radio Engineering], 2017, no. 2, pp. 18-36. DOI: [10.24108/rdopt.0217.0000097](https://doi.org/10.24108/rdopt.0217.0000097) (in Russian)
20. Bekaev A.A., Sokovikov V.K., Stokov P.I. Electrohydraulic devices on the base of L.A. Yutkin effect. *Vestnik mashinostroeniia* [Machine Building Herald], 2014, no. 7, pp. 45-48 (in Russian).