

# СИНТЕЗ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ

Р.В. Тертилов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, [dpte@iip.com.ua](mailto:dpte@iip.com.ua)*

Предложен подход к синтезу импульсных емкостных нелинейно-параметрических источников энергии при изменении сопротивления разрядной цепи во времени по известному из технологических требований давлению в точке рабочей среды с учётом конструктивных особенностей электродной системы и электропроводности воды.

УДК 621.373:537.5

## ВВЕДЕНИЕ

Показано [1], что один из эффективных методов управления процессом электровзрывного преобразования энергии – это метод параметрического изменения электрического сопротивления цепи. Там же приведено решение задачи синтеза генератора импульсных токов (ГИТ) для случая скачкообразного изменения сопротивления цепи при инициировании разряда взрывом микропроводника.

Однако в большинстве существующих разрядно-импульсных технологиях (РИТ) разряд формируется высоковольтным пробоем (ВП). Отличием ВП от инициируемых разрядов являются наличие предпробивных потерь (энергия, затрачиваемая на формирование канала разряда) и, как следствие, стохастичность электрических и гидродинамических характеристик.

Причем в зависимости от геометрии электродной системы (радиуса закругления электрода  $r_3$ , длины его оголенной части  $l_3$ ), проводимости воды  $\sigma_v$  и длины межэлектродного промежутка  $l$  предпробивные потери энергии могут достигать от нескольких до 100% от энергии, запасенной в емкостном накопителе, что необходимо учитывать при синтезе ГИТ.

В связи с этим цель данной работы – уточнить алгоритм решения задачи синтеза ГИТ и математические модели, развитые ранее для разряда, инициируемого взрывом микропроводника, применительно к высоковольтному пробую при условии обеспечения минимальных предпробивных потерь энергии.

В работе [2] показано, что между электродинамическими и гидродинамическими характеристиками электрического разряда, инициируемого взрывом микропроводника и ВП, существует корреляционная причинно-следственная связь. Ввиду этого для решения данной задачи могут быть использованы математические модели, полученные ранее для разряда, инициированного взрывом микропроводника [1].

## ПОСТАНОВКА И СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При параметрическом изменении активного сопротивления цепи разрядный ток  $I(t)$  и мощность  $N(t)$  имеют характерный вид (рис. 1). Исходя из этого следует, что сопротивление цепи (обозначим его  $R_{c2}$ ) будет включено на интервале  $[0; t_1]$ , а в интервале  $[t_1; t_2]$   $R_{c2}$  равно нулю (отключено). Необходимо определить величину  $R_{c2}$  на временном интервале  $[0; t_1]$  (рис. 1), а также емкость  $C$ , индуктивность  $L$ , длину разрядного промежутка  $l$  и величину зарядного напряжения  $U_3$ .

В случае высоковольтного пробоя жидкости схема последовательности решения задачи синтеза нелинейно-параметрического энергоисточника по заданной зависимости давления от времени в точке жидкости имеет вид, представленный на рис. 2.

Здесь  $P(t)$  – давление в точке среды;  $P_a(t)$  – давление в канале разряда;  $v_a(t)$  – скорость расширения канала разряда;  $I(t)$  – ток в канале разряда;  $N(t)$  – электрическая мощность, выделявшаяся на активном сопротивлении канала разряда;  $U$  – напряжение заряда конденсаторной батареи в момент  $t_1$ ;  $U_{nc}$  – пробивное напряжение высоковольтного разряда (напряжение самопробоя);  $U_{nu}$  – начальное напряжение, полученное из решения обратной электродинамической задачи ОЭДЗ;  $S_3$  – площадь оголённой части положительного электрода;  $f(l)$  – функциональная зависимость величины предпробив-

ных потерь от длины межэлектродного промежутка;  $R(t)$  – сопротивление цепи, равное  $R_{c2}$  на интервале  $[0; t_1]$  и  $R_c$  (известно) на интервале  $[t_1; t_2]$  (рис. 1); ГДПС, ЭДПС, ЭТПС, КФПС – гидродинамическая, электродинамическая, электротехническая и каналформирующая подсистемы обратной задачи соответственно, знаком  $(^*)$  обозначены удельные параметры, то есть приведенные к единице длины канала разряда.

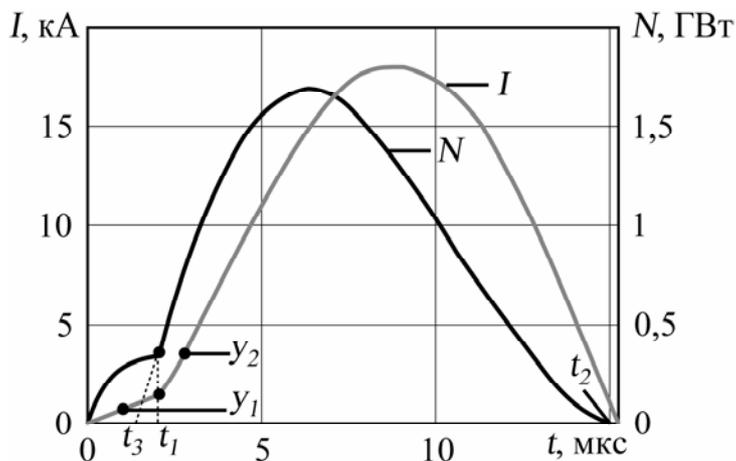


Рис. 1. Характерный ток и мощность

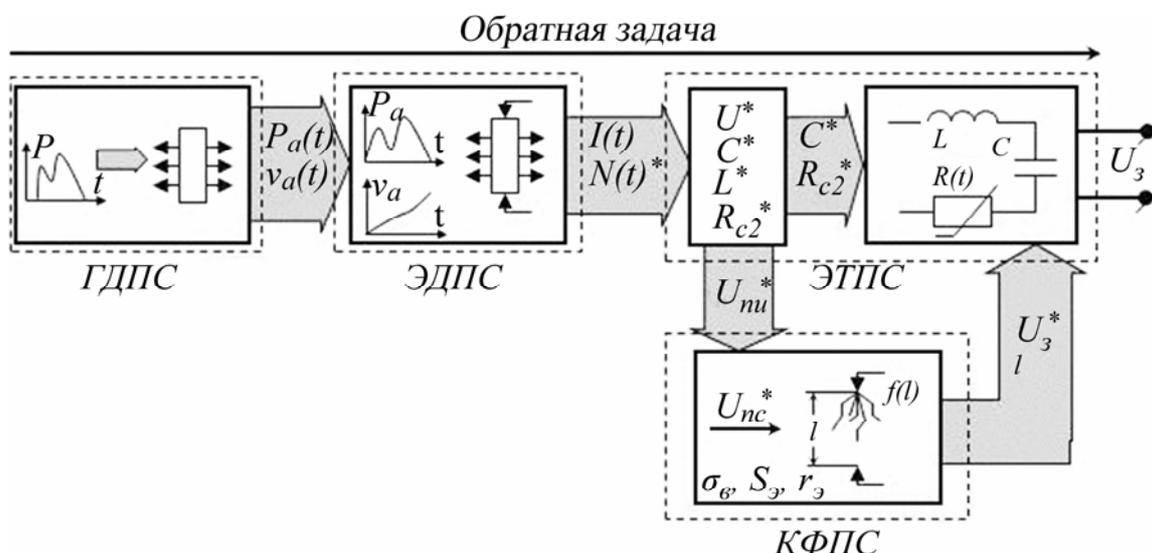


Рис. 2. Структурная схема решения обратной задачи

Представленные выше подсистемы (рис. 2) отличаются от подсистем, представленных в работе [1], наличием КФПС, которая позволяет учесть потери энергии, затрачиваемые на пробой межэлектродного промежутка. В связи с наличием КФПС связь между подсистемами становится более сложной, это необходимо учесть при уточнении математических моделей и алгоритма решения задачи синтеза ГИТ.

Задача решалась поэтапно: на первом этапе по известным из решения ОЭДЗ данным удельной электрической мощности  $N(t)^*$  и току  $I(t)$  определяются схемные параметры разрядного контура – емкость  $C^*$ , индуктивность  $L^*$ ; на втором – сопротивление цепи  $R_{c2}^*$  и начальное напряжение  $U_{nu}^*$ ; на третьем этапе, выбрав электродную систему ( $S_3, l_3, r_3, \sigma_B$ ), а также зная  $I(t), N(t)^*, U_{nu}^*$ , определяются: величина минимальных относительных предпробивных потерь энергии  $f_{min}$ , длина межэлектродного промежутка  $l$  и величина пробивного напряжения  $U_{nc}^*$ ; на четвертом этапе с использованием  $l_3, r_3, \sigma_B, l, f_{min}, C^*, U_0$  (минимальное пороговое напряжение перехода теплового пробоя в лидерный) определяются зарядное напряжение  $U_3$  и абсолютные значения параметров ГИТ ( $R_{c2}, L, C$ ).

Для решения задачи первого этапа был использован подход, изложенный в работе [1]. Суть его заключается в том, чтобы выбрать такой ГИТ, который бы реализовал заданный на интервале  $[t_1; t_2]$  ток (рис. 1).

Для этого путем интерполяции кривой мощности (рис.1) определяем длительность полупериода  $\tau = t_2 - t_3$ . Зная ее значение, можно рассчитать параметры ГИТ ( $C^*, L^*, U^*$ ) при помощи системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U^* &= \frac{(0,92 - 0,65 \cdot \eta^2) \cdot N_m^* / I_m}{(1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}} \\ C^* &= \frac{2}{\eta} \cdot \frac{\int_0^\tau N(t)^* \cdot dt}{(U^*)^2} \\ L^* &= \left( \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{C^*}} \cdot \frac{\tau}{1 + \eta^3} \right)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $N_m^*$ ,  $I_m$  – максимум мощности и тока соответственно;  $\eta$  – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода тока [3, 4].

Далее, зная  $C^*$ ,  $L^*$ ,  $U^*$  и используя ранее полученное выражение (2) в [1], решаем задачу второго этапа и определяем удельное сопротивление цепи  $R_{c2}^*$ :

$$R_{c2}^* = \frac{L^* \left( \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=y_2} - \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=y_1} \right)}{I}, \quad (2)$$

где  $I$  – значение тока в точке  $t_1$  (рис. 1).

Для определения начального напряжения  $U_{nu}^*$  был использован энергетический подход [1], который учитывает энергию, затрачиваемую на сопротивление цепи, что является немаловажным для данной задачи, поскольку от ее величины будет зависеть, какие параметры ГИТ необходимо выбрать для реализации заданного из технологических требований давления в точке жидкости. Получим

$$U_{nu}^* = \sqrt{\frac{2 \cdot W^*}{C^*}}, \quad (3)$$

где  $W^*$  – доля энергии, выделившейся за время  $[0; t_2]$  (рис. 1).

Определенные в результате решения задач первого и второго этапов величины  $C^*$ ,  $U_{nu}^*$  являются исходными данными для КФПС.

Вычисляем параметры КФПС (решение задачи третьего этапа) с использованием математической модели (4):

$$\left. \begin{aligned} l_a &\approx 2l \\ U_0 &= 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_3 \cdot \ln \left( 4 \cdot \frac{l}{r_3} \right) \\ U_{nc}^* &= \sqrt{1-f} \cdot \left( \sqrt{\frac{4 \cdot \sqrt{\pi S_3} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_B (1 + 40l)}{f \cdot C^*}} + U_0 \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $l_a$  – длина канала разряда, которая при ВП жидкости примерно вдвое превышает длину разрядного промежутка;  $\alpha$  – постоянная, равная  $0,36 \cdot 10^6 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}$ .

Алгоритм реализации, который представлен в работе [4].

То есть, задаваясь конкретной электродной системой ( $r_3$ ,  $l_3$ ), проводимостью воды  $\sigma_B$  и в качестве порогового условия принимая равенство значений  $U_{nc}^* = U_{nu}^*$ , рассчитываются величина относительных предпробивных потерь  $f_{\min}$  и величина межэлектродного промежутка  $l$ .

Далее решается задача четвертого этапа и определяются величина зарядного напряжения  $U_3$  по формуле (5), а также абсолютные значения параметров ГИТ ( $R_{c2}$ ,  $L$ ,  $C$ ):

$$U_3 = \sqrt{\frac{4\sqrt{\pi S_3} \cdot \alpha \cdot l \cdot \sigma_b (1 + 40l)}{f \cdot C}} + U_0. \quad (5)$$

Таким образом, уравнения (1–5) позволяют проводить синтез емкостного нелинейно-параметрического энергоисточника со скачкообразным изменением электрического сопротивления цепи для РИТ, использующих ВП.

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В качестве исходных данных взяты электродинамические характеристики тока  $I(t)$  и мощности  $N(t)$  (рис. 1), полученные экспериментально [5] для случая инициируемого разряда.

По представленным математическим моделям и алгоритму при заданных кривых тока  $I(t)$  и мощности  $N(t)$  (рис. 1) выполнен синтез нелинейно-параметрического энергоисточника при ВП межэлектродного промежутка.

Для расчета выбраны различные значения  $r_3$ ,  $l_3$  и электропроводности воды  $\sigma_b$ , что позволяет исследовать степень влияния указанных величин на выбор необходимых параметров нелинейно-параметрического источника энергии при условии относительных минимальных предпробивных потерь  $f_{\min}$ . Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты решения задачи синтеза ГИТ

$l_3$ , мм	$r_3$ , мм	$U_3$ , кВ	$U_{пр}$ , кВ	$f_{\min}$ , %	$R_{c2}$ , Ом	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$l$ , мм
$\sigma_b = 0,02 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$								
5	3	77	76	2,8	22	1,4	10	86
30	4	98	93	9	27	1,2	12	106
70	5	117	107	16	31	1	14	122
$\sigma_b = 0,04 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$								
5	3	77	75	5,4	21	1,5	9,5	85
30	4	97	89	16	25	1,2	11,3	101
70	5	116	94	26	28	1,1	12,6	113
$\sigma_b = 0,08 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$								
5	3	77	73	10	21	1,5	9,3	83
30	4	96	82	26	24	1,3	10,5	94
70	5	114	88	39	25	1,2	11,3	100

Анализ этих данных показывает, что обеспечить необходимые (с точки зрения технологии) электродинамические характеристики  $I(t)$  и  $N(t)$  при условии относительных минимальных предпробивных потерь  $f_{\min}$  возможно при различной электрической проводимости рабочей среды (воды)  $\sigma_b$ , различных геометриях электродной системы ( $r_3$ ,  $l_3$ ), различной длине межэлектродного промежутка  $l$  путём согласованного выбора параметров ГИТ ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ,  $R_{c2}$ ). Причем с ростом  $\sigma_b$  от 0,02 до 0,08 (Ом·м)<sup>-1</sup> при фиксированной электродной системе (например,  $l_3 = 5$  мм,  $r_3 = 3$  мм) величина  $l$  уменьшается, а  $f_{\min}$  увеличивается, при этом параметры ГИТ также изменяются, но в рассматриваемом случае – незначительно. Поэтому при изменении (увеличении) проводимости параметры ГИТ можно не менять, так как их отличие лежит в пределах инженерной точности.

Следует отметить, что в РИТ по различным причинам может возникнуть необходимость ограничения (фиксирование) одного из параметров: разрядного контура ГИТ ( $U_3$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R_{c2}$ ), длины межэлектродного промежутка  $l$ , величины относительных предпробивных потерь  $f$ . В этом случае представляется весьма актуальным предложенный подход, который позволяет рассчитать параметры энергоисточника при условии ограничения одной из указанных величин.

Поскольку, как видно из табл. 1, зарядное напряжение  $U_3$  превышает рабочее напряжение, применяемое в современных РИТ (50 кВ), то в качестве примера с использованием предложенного подхода выполнен расчёт параметров ГИТ при ограничении величины зарядного напряжения. Поэтому по заданным электродинамическим характеристикам  $I(t)$  и  $N(t)$  (рис. 1) определяются параметры ГИТ с  $U_3 = 50$  кВ, которые обеспечили бы заданные технологические требования. При этом  $\sigma_b$  принята равной 0,055 (Ом·м)<sup>-1</sup> (характерно для Николаевского региона),  $r_3$  равен 4 мм и длина оголенной части электрода  $l_3 = 30$  мм. Результаты расчёта представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета при условии  $U_3 = 50$  кВ

$l_3$ , мм	$r_3$ , мм	$U_3$ , кВ	$U_{пр}$ , кВ	$f$ , %	$Rd$ , Ом	$C$ , мкФ	$L$ , мкГн	$l$ , мм
30	4	50	43	25	12	2,6	5,5	49

Следует отметить, что данный подход даёт возможность зафиксировать лишь одну из приведенных величин ( $L$ ,  $C$ ,  $U_3$ ,  $R_{c2}$ ,  $l$ ,  $f$ ), при этом выбрав такой ГИТ, который бы реализовал заданные технологические требования. Но с практической точки зрения наиболее рациональным является изменение параметров  $U_3$ ,  $l$  ГИТ, которое относительно легко технически реализуется.

Для проверки допустимости описанного подхода к синтезу емкостных нелинейно-параметрических источников энергии при параметрическом изменении сопротивления цепи по полученным параметрам (табл. 2) восстановлены электродинамические характеристики тока и мощности (рис. 3) [6]. Они незначительно отличаются от экспериментальных кривых ( $I(t) \sim 2,3\%$ , а  $N(t) \sim 3,2\%$ ), что подтверждает возможность использования данного метода для синтеза импульсных емкостных нелинейно-параметрических источников энергии в случае ВП в воде.

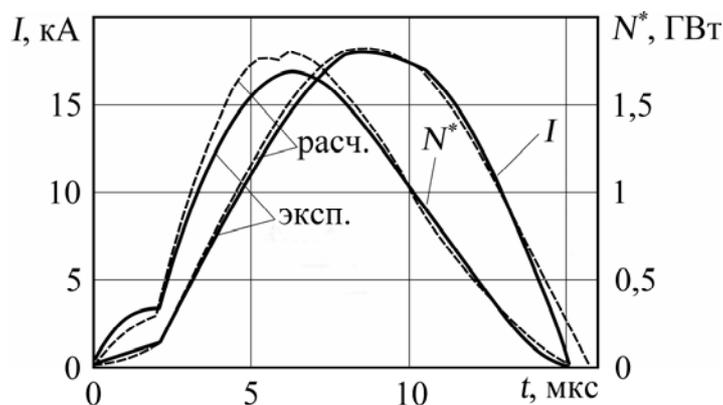


Рис. 3. Характеристики тока и мощности

## ВЫВОДЫ

Разработанные ранее алгоритм и соответствующие математические модели для случая инициируемого разряда [1] развиты для РИТ, использующих высоковольтный пробой жидкости. Решена задача синтеза импульсного емкостного нелинейно-параметрического источника энергии со скачкообразным изменением во времени активного сопротивления цепи для высоковольтного пробоя в воде.

Показано, что обеспечить заданное из технологических требований давление в точке рабочей среды  $P(t)$  при условии относительных минимальных предпробивных потерь  $f_{\min}$  возможно путём согласованного выбора параметров ГИТ, конструктивных особенностей электродных систем и свойств рабочей среды.

Во время разрядно-импульсного технологического процесса величина электропроводности рабочей среды под воздействием различных факторов может увеличиваться, это приводит к изменению необходимого гидродинамического воздействия на объект обработки, что является нежелательным. В таком случае для обеспечения оптимального силового воздействия необходимо провести корректировку параметров действующей технологической установки, которые могут быть рассчитаны с использованием развитых в работе алгоритмов и математических моделей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий. *Збірник наукових праць НУК*. 2010, 4(433), 118–124.
2. Вовченко А.И., Блащенко А.Д., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Исследование электрогидродинамических характеристик и тестирование алгоритмов оптимизации разрядно-импульсных технологий на базе высоковольтного пробоя. *Техніч. електродинаміка*. 2011, (4), 69–75.
3. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них. *Техн. електродинаміка*. 2009,

(6), 54–60.

4. Вовченко А.И., Шомко В.В., Шишов А.М. Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов. *Техн. електродинаміка*. 2005, (3), 68–73.

5. Вовченко А.И., Посохов А.А. *Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах*. К.: Наук. Думка, 1992. 168 с.

6. Блащенко А.Д., Дивак Н.П. Подход к синтезу емкостного электроразрядного источника энергии для разрядно-импульсных технологий. *Материалы Международной научной конференции (17–21 августа 2009) «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. Николаев: КП Николаевская обл. тип., 2009. 151–153.

*Поступила 04.11.11*

#### **Summary**

The approach of synthesis of pulse capacity nonlinear parametrical energy sources by changing in time of discharge circuit resistance by pressure, which is known from technological requirements with considering of constructive features of electrode system and water electrical conductivity is proposed.

---