

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХКОНТУРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

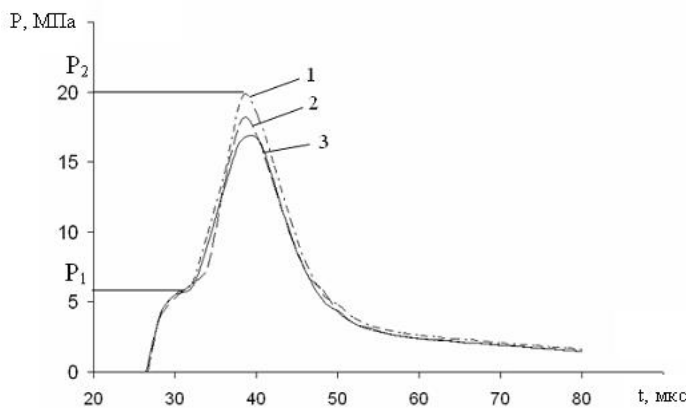
**Р.В.Тертилов**

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43-А, Николаев, 54018, Украина.

*В работе развит подход к синтезу двухконтурных генераторов импульсных токов, позволяющий путем решения обратных задач по заданному импульсу давления в точке рабочей среды выполнять синтез схемных параметров и режимов работы двухконтурных генераторов импульсных токов. Предложен алгоритм расчета данной задачи, а также приведен пример расчета и основные результаты. Библ. 8, табл. 1, рис. 5.*

**Ключевые слова:** оптимизация, обратные задачи, синтез, разрядноимпульсные технологии, двухконтурные генераторы импульсных токов.

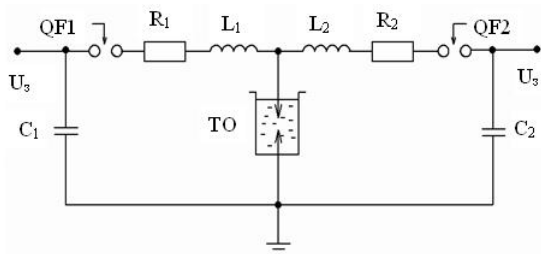
**Введение.** В импульсных технологиях, применяемых в промышленности, импульсы сжатия, которые распространяются в рабочей среде, в большинстве случаев, имеют крутой фронт и спад, близкий к экспоненциальному. Однако такая форма импульса давления не всегда удовлетворяет требованиям технологии. Например, для импульсной технологии интенсификации добычи углеводородов, а также для технологии запрессовки труб в трубных досках, как показывают экспериментальные данные, приведенные в работах [2,7], требуются более сложные по форме импульсы с несколькими пульсациями  $P_1$  и  $P_2$



**Рис. 1**

ся технически и позволяют генерировать разнообразные по форме и амплитуде, наперед заданные импульсы тока в канале разряда.

В связи с этим возникает задача определения схемных параметров каждого контура двухконтурного ГИТ для реализации требуемого импульса тока



**Рис. 2**

в нелинейной нагрузке. При ее решении воспользуемся подходом, рассмотренным в работе для одноконтурных ГИТ [3]. Задача решалась для разряда, инициируемого микропроводником.

**Постановка задачи и алгоритм решения.** На рис. 2 показана принципиальная схема разрядной цепи двухконтурного ГИТ, в которой использованы следующие обозначения:  $L_1, L_2$  – индуктивность первого и

второго контуров;  $C_1, C_2$  – емкостные накопители энергии;  $R_1, R_2$  – активные сопротивления контуров;  $U_3$  – зарядные напряжения контуров (приняты одинаковыми); QF1, QF2 – управляемые разрядники; ТО – технологический объем.

Суть подхода, который положен в основу решения данной задачи, заключается в определении параметров энергоисточника методом решения обратных задач по заданному импульсу давления в точке рабочей среды (рис. 1). При этом будем считать, что величина первого пика давления  $P_1$  определяется всецело энергией, вводимой в канал разряда первым контуром ГИТ, а второго  $P_2$  – вторым контуром ГИТ. Реализация данного подхода к расчету двухконтурного ГИТ основана на разбиении сложной системы преобразования энергии на более простые подсистемы поэтапного ее преобразования (рис. 3):

- гидродинамическую подсистему (ГДПС), включающую область жидкого пространства, ограниченную поверхностями объекта обработки и канала разряда;
- электродинамическую подсистему (ЭДПС), включающую нелинейную резистивную нагрузку – плазменный разрядный канал, потребляющий электрическую энергию импульсного электроразрядного источника энергии;
- электротехническую подсистему (ЭТПС), состоящую из двухконтурного ГИТ, подключенного к системе электропитания и передающего запасенную электрическую энергию через разрядную цепь в резистивную нагрузку плазменного канала.

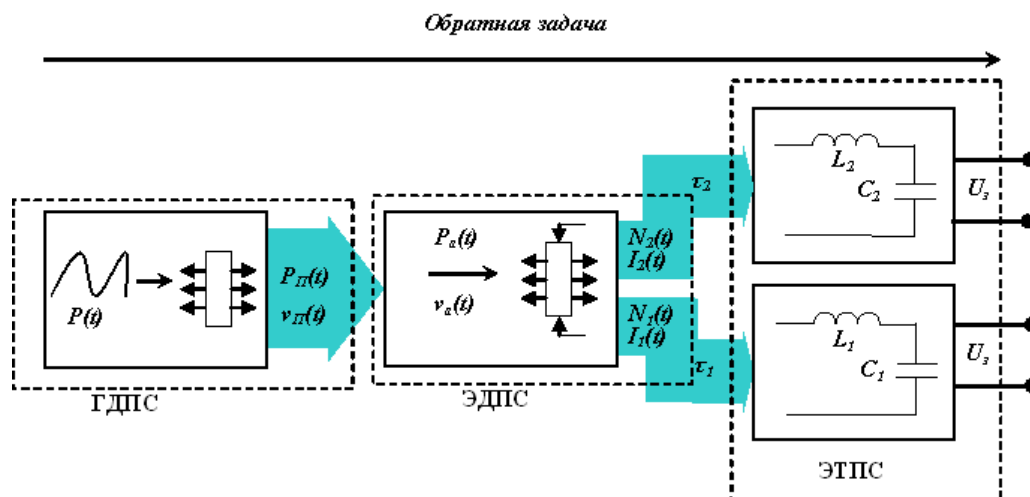


Рис. 3

На рис. 3:  $P(t)$  – давление в точке рабочей среды;  $P_П(t)$ ,  $P_a(t)$  – давление в расширяющемся поршне и в канале разряда;  $v_П(t)$ ,  $v_a(t)$  – скорость расширения поршня и канала разряда;  $I_1(t)$ ,  $I_2(t)$  – токи в контурах ГИТ;  $N_1(t)$ ,  $N_2(t)$  – мощность, выделяемая в канале разряда в 1-м и 2-м контуре;  $\tau_1, \tau_2$  – длительность 1-го и 2-го полупериода тока.

Следует отметить, что приведенные подсистемы для каждого контура взаимодействуют между собой по цепочному принципу, то есть выходные параметры одной подсистемы являются входными для другой. Математическая модель ГДПС предназначена для решения обратной гидродинамической задачи восстановления закона расширения канала разряда  $a(t)$  и давления на границе канала  $P_a(t)$  по заданному временному распределению давления  $P(t)$  в точке рабочей среды. Основной задачей математической модели для ЭДПС является определение амперсекундной характеристики разряда  $I(t)$ , электрической мощности  $N(t)$  и активного сопротивления  $R_a(t)$  канала разряда по известным из решения обратной гидродинамической задачи функциям  $a(t)$  и  $P_a(t)$ . Математическая модель для ЭТПС предназначена для определения типа, структуры и параметров накопителя энергии (зарядного напряжения  $U_3$ , емкости  $C$  и индуктивности  $L$ ).

Задача решалась поэтапно по следующему алгоритму.

1. По известным значениям (из решения обратной гидродинамической задачи (ОГДЗ)) давления и радиуса канала разряда, а также начальной длины микропроводника путем реализации математической модели (1) решается обратная электродинамическая задача, то есть восстанавливаются электродинамические характеристики для двух контуров.

2. Определяется закон электрической мощности, которая вводится во время работы первого контура ГИТ.

3. Определяется индуктивность  $L$ , емкость  $C$  для каждого контура ГИТ и зарядное напряжение  $U_3$ .

Система уравнений (1) представляет полную систему уравнений для определения электродинамических характеристик (электрической мощности, напряжения и омического сопротивления канала, электропроводности плазмы, разрядного тока) и является математической моделью для решения обратной электродинамической задачи (ОЭДЗ).

$$\left. \begin{aligned} \frac{N(t)}{\ell} &= \frac{S(t)}{\gamma-1} \cdot \frac{dP_a(t)}{dt} + \frac{\gamma}{\gamma-1} P_a(t) \cdot \frac{dS(t)}{dt}, & \sigma_a(t) &= [A(\gamma-1)]^{-1} P_a(t), \\ \frac{R_a(t)}{\ell} &= A(\gamma-1) [P_a(t) S(t)]^{-1}, \\ I(t) &= (\gamma-1)^{-1} \left\{ A^{-1} P_a(t) S(t) \left[ S(t) \cdot \frac{dP_a(t)}{dt} + \gamma P_a(t) \cdot \frac{dS(t)}{dt} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ \frac{U(t)}{\ell} &= \sqrt{A} \left\{ \frac{d[\ln(P_a(t))]}{dt} + \gamma \frac{d[\ln(S(t))]}{dt} \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина разрядного промежутка, м;  $S_a(t) = \pi a^2(t)$  – сечение цилиндрического канала, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты плазмы;  $A$  – искровая постоянная, В<sup>2</sup>с/м<sup>2</sup>.

Временная зависимость мощности, выделяемой в плазменном канале, при работе первого контура принята синусоидальной. Причем режим разряда этого контура близкий к критическому, т.е. за время первого полупериода тока выделяется 80 % энергии, запасенной в первом контуре ( $\eta = 0,8$ ). При таком режиме обеспечивается максимальная мощность в нагрузке (плазменном канале)

$$f(x) = G \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{\tau_1} \cdot t\right), \quad (2)$$

где  $G$  – постоянная;  $n=1$  – число полувольт синусоиды;  $t$  – текущее время, с. Постоянная  $G$  определялась из выражения

$$G = W / \int_0^{\tau_1} \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{\tau_1} \cdot t\right) dx, \quad (3)$$

где  $W$  – энергия, выделенная в результате работы первого контура ГИТ.

Правомочность вышеприведенной аппроксимации проверялась путем сравнения результатов решения прямой задачи (по известному значению мощности восстанавливается давление в точке рабочей среды) с результатом эксперимента.

Зарядное напряжение для каждого контура может быть определено из выражения:

$$U_3 = \frac{(0,92 - 0,65\eta^2) kN}{(1 - 0,85\eta) \sqrt{\eta^3 (0,37 + 0,6\eta^2)}}, \quad (4)$$

где  $kN = N_m / I_m$  – расчетный коэффициент, В;  $N_m$  – максимум мощности, полученный из решения ОЭДЗ, Вт;  $I_m$  – максимум тока, полученный из решения ОЭДЗ, А;  $\eta$  – доля энергии, выделившейся в течение первого полупериода тока.

Как указывалось, для первого контура ГИТ было принято, что величина критерия подобия электрических характеристик разряда  $\eta = 0,8$  (режим, близкий к согласованному), а для второго –

величина  $\eta$  определялась по значению  $\tau_m/\tau_1$ , исходя из аппроксимированной кривой, полученной в работе [1].

В результате решения системы уравнений (1) в конечном итоге определяются ток в разрядном контуре, напряжение на канале разряда и мощность, выделяемая в нем, которые являются исходными данными для решения задачи синтеза.

Учитывая то, что критерий  $\eta$  может быть представлен как отношение энергии, выделенной в течение первого полупериода тока, к запасенной, емкость каждого из накопителей можно выразить в

$$C = \frac{2}{\eta} \frac{\int_0^{\tau} N(t) dt}{(U_3)^2}. \quad (5)$$

Для определения индуктивности  $L$  разрядного контура было использовано соотношение [6]

$$\frac{\tau}{\pi\sqrt{LC}} = 1 + \eta^3, \quad \text{откуда} \quad L = \left( \frac{1}{\pi\sqrt{C}} \frac{\tau}{1 + \eta^3} \right)^2. \quad (6,7)$$

Уравнения (4), (5) и (7) обеспечивают решение задачи синтеза искомого источника энергии и являются математической моделью ЭПЭС.

**Пример расчета.** В соответствии с представленным подходом решим задачу, когда по заданной функции давления в точке среды  $P(t)$  (рис. 1, кривая 1) на расстоянии 40 мм от оси канала разряда нужно определить параметры двухконтурного ГИТ.

По известным значениям начальной длины микропроводника, давления и радиуса канала разряда была восстановлена электрическая мощность в результате решения ОЭДЗ (рис. 4, кривая 1).

Поскольку по восстановленному двухпульсационному закону мощности в данном случае невозможно определить длительность работы первого контура ГИТ, а следовательно, и параметры, то

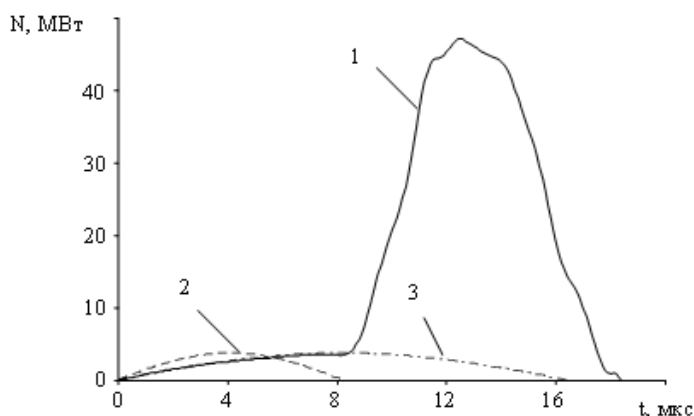


Рис. 4

первую пульсацию мощности (кривая 1) аппроксимировали синусоидами (кривые 2, 3), энергия которых до момента включения 2-го контура равняется энергии первой пульсации восстановленной мощности.

Для проверки допустимости такой аппроксимации был выполнен расчет давления в той же точке среды. Полученные результаты расчетов давления в точке жидкости (рис. 1, кривая 2, 3) отличаются незначительно от экспериментальной кривой давления (рис. 1, кривая 1), что, в свою очередь, подтверждает правомочность применения данного подхода. В то же время, поскольку запасенная энергия первого контура ГИТ (рис. 4, кривая 3) выделяется как в первом, так и во втором полупериоде, то этот факт усложняет расчет, в связи с чем принято в данной работе расчет производить относительно закона ввода электрической мощности, вид которой представлен кривой 2 на рис. 4. По этому закону ввода электрической мощности были вычислены значения давления в канале разряда и его радиуса, по которым была решена ОЭДЗ. Получены зависимости тока (кривая 2) и мощности от времени (кривая 1), представленные на рис. 5.

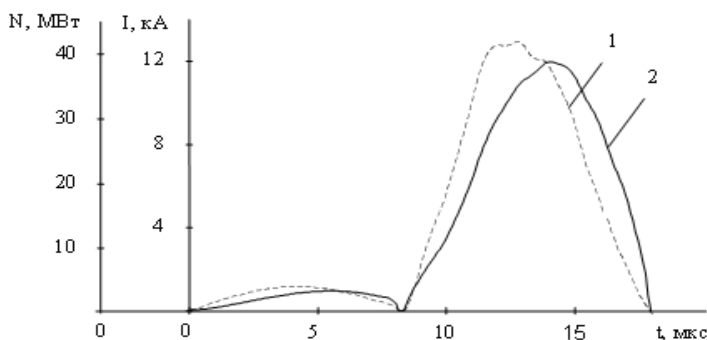


Рис. 5

С учетом изложенного выполнен расчет параметров энергоисточника двухконтурного ГИТ. Результаты расчета с целью возможного их применения для элект-

троразрядных установок округлены в соответствии с существующими стандартизованными значениями и сведены в таблицу.

Наименование элемента	Параметры ГИТ	
	1-й контур	2-й контур
Емкость $C$ , мкФ	0,5	5,5
Индуктивность $L$ , мкГн	6	0,6
Зарядное напряжение $U_3$ , кВ	10	10

При расчете параметров второго контура ГИТ можно не учитывать энергию, которая выделилась во второй полуолне тока первого контура и которая составляет всего около 2% от запасенной во втором контуре.

Развитый в работе подход позволяет методом компьютерного моделирования выполнять синтез параметров и режимов работы двухконтурных ГИТ по известному из технологических требований давлению  $P(t)$  в точке рабочей среды.

Следует также отметить, что в случае оптимизации разрядноимпульсных технологий на базе применения многоконтурных ГИТ, то есть при наличии трех контуров и более, описанный подход может быть использован для расчета дополнительных контуров с учетом имеющихся подсистем и взаимосвязей между ними.

**Выводы.** Впервые на базе решения обратной задачи развит подход синтеза параметров двухконтурных ГИТ по известному из технологических требований многоимпульсационному давлению в точке рабочей среды при высоковольтном инициируемом разряде для оптимизации РИТ. Предложен алгоритм и выполнен расчет параметров двухконтурного ГИТ по экспериментально полученному двухимпульсационному импульсу давления в точке рабочей среды, проведено сравнение с расчетом прямой задачи, показана правомочность развитого в работе подхода.

Автор благодарит доктора технических наук, профессора Вовченко А.И. за внимание к работе и ценные замечания.

1. *Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – №6. – С. 54–60.

*Vovchenko A.I., Divak N.P., Tertilov R.V.* Optimization of electrohydropulse technologies and choice of appropriate operating modes of their energy sources // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2009. – №6. – P. 54–60. (Rus.)

2. *Вовченко А.И., Посохов А.А.* Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. – Киев: Наукова думка, 1992. – 168 с.

*Vovchenko A.I., Posokhov A.A.* The controled electroexplosion processes of energy conversion in condensed inviroment. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 168 p. (Rus.)

3. *Вовченко А.И., Шамко В.В., Шишов А.М.* Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов // *Технічна електродинаміка*. – 2005. – №3. – С. 68–73.

*Vovchenko A.I., Shamko V.V., Shishov A.M.* The mathematical modeling and optimization of electrohydropulse technological processes // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2005. – №3. – P. 68–73. (Rus.)

4. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с.

*Krivitskii E.V.* Dynamics of electroexplosion in liquid. – Kyiv: Naukova dumka, 1986. – 208 p. (Rus.)

5 *Кривицкий Е.В., Кустовский В.Д., Сливинский А.П.* Исследование влияния начальных условий на динамику развития канала подводной искры. Влияние внешнего источника накачки энергии // *Техн. физика*. – 1980. – Т. 50. – № 8. – С. 1713–1716.

*Krivitskii E.V., Kustovskii V.D., Slivinskii A.P.* The investigation of initial conditions influence on the dynamics of channel spark development. The influence of external pumping energy source // *Tekhnicheskaiia fizika*. – 1980. – Vol. 50. – № 8. – P. 1713–1716. (Rus.)

6. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.

*Krivitskii E.V., Shamko V.V.* The transient processes by high voltage explosion in the water. – Kyiv: Naukova dumka, 1979. – 208 p. (Rus.)

7. *Нагорный В.П., Денисюк И.И., Петрушенко С.В.* Импульсная технология интенсификации добычи углеводородов // *Материалы Международной научной конференции (17–21 августа 2009) «Импульсные процессы в механике сплошных сред»*. – Николаев: КП «Николаевская обл. тип.». – 2009. – С. 136–138.

*Nagornyi V.P., Denisiuk I.I., Petrushenko S.V.* The pulse technology of intensification extraction hydrocarbons // *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (17–21 of August 2009) «Impulsnye protsesy v mekhanike sploshnykh sred»*. – Nikolaev: KP «Nikolaevskaia oblastnaia tipografiia». – 2009. – P. 136–138. (Rus.)

**8.** *Хайнацкий С.А., Шамко В.В.* Влияние режима подкачки энергии от внешнего источника на газодинамику подводного электровзрыва // *Электрический разряд в конденсированных средах*. – К.: Наукова думка, 1989. – С. 28–42.

*Khainatskii S.A., Shamko V.V.* The influence of energy pumping mode from the external source on the gas dynamics of electric explosion in the water // *Elektricheskiy razriad v kondensirovannykh sredakh*. – Kyiv: Naukova dumka, 1989. – P. 28–42. (Rus.).

УДК 537.528: 621.373

**Р.В. Тертілов,**

**Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України,  
пр. Жовтневий, 43-А, Миколаїв, 54018, Україна.**

**Оптимізація розрядноімпульсних технологій на базі використання двоконтурних генераторів імпульсних струмів**

*У роботі розвинено підхід синтезу двоконтурних генераторів імпульсних струмів, що дозволяє шляхом рішення обернених задач по заданому імпульсу тиску в точці робочого середовища виконувати синтез схемних параметрів і режимів роботи двоконтурних генераторів імпульсних струмів. Запропоновано алгоритм розрахунку даної задачі, а також наведено приклад розрахунку і основні результати. Бібл. 8, табл. 1, рис. 5.*

**Ключові слова:** оптимізація, обернені задачі, синтез, розрядноімпульсні технології, двоконтурні генератори імпульсних струмів.

**R.V. Tertilov,**

**Institute of Pulse Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Oktiabrskii, 43-A, Nikolaev, 54018, Ukraine.**

**Optimization of discharge technologies on applying base of pulse current generator with two discharge circuits**

*The approach of double-circuit pulsed current generator synthesis which allows by a given pulse pressure at the working volume by the way of solving inverse problems to carry out the synthesis of circuit parameters and operating modes of double-circuit impulse current generators is developed. The solving algorithm is proposed and the calculation example as well as main results is given. References 8, table 1, figures 5.*

**Key words:** optimization, inverse problems, synthesis, discharge technologies, generators of pulse currents with two discharge circuits.

Надійшла 15.12.2009  
Received 15.12.2009