

Список литературы: 1. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость: Пер. с нем. В.Д.Мазина и С.А. Спектора. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.П.Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
2. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.

Поступила в редколлегию 29.06.2010

УДК 537.528:621.3.011.74

Н. П. ДИВАК, аспирант, ИИПТ НАН Украины, Николаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА БАЗЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРОБОЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКИ С РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО $5 \cdot 10^4$ В

Методом чисельного моделювання досліджено можливість оптимізації електрогідроімпульсних технологій по заданому у воді імпульсу тиску та мінімальних відносних передпробивних втратах енергії при зарядній напрузі ємнісного енергонакопичувача до $5 \cdot 10^4$ В. Для прийнятих у роботі даних побудовано номограми, які дозволяють проводити експрес-аналіз необхідних параметрів ємнісного накопичувача з зарядною напругою до $5 \cdot 10^4$ В.

According to the method of numerical modeling the investigation of optimization possibility of electrohydro pulse technologies according to the specified pressure pulse in the water and minimum of relative energy losses which forerun a discharge by the work voltage of capacitor above $5 \cdot 10^4$ V is made. The nomograms which allow to carry out the express-analysis of essential parameters of capacitor with work voltage above $5 \cdot 10^4$ V for the specified data are built.

Одним из наиболее общих подходов к оптимизации электрогидроимпульсных (ЭГИ) технологий является подход, основанный на выборе параметров и режимов работы энергоисточника высоковольтной электротехнологической установки (ВЭУ), обеспечивающей требуемое конкретной технологией пространственно-временное распределение давления $P(t)$ на объект обработки. В работах [1–4] развита методология оптимизации ЭГИ технологий на базе решения обратных задач как для случая инициированного разряда, так и высоковольтного пробоя. Для обоих случаев в работах [1–4] представлены соответствующие математические модели и результаты тестирования для синтеза емкостного энергоисточника ВЭУ. Причем в работе [4] обоснована возможность реализации требуемого технологией оптимального импульса $P(t)$, воздействующего на объект обработки при условии минимальных относительных передпробивных потерь энергии при взаимосогласован-

ном выборе параметров емкостного накопителя, электродных систем и величин межэлектродного промежутка. Требование минимальных относительных предпробивных потерь, по крайней мере, в диапазоне удельной электропроводности воды $\sigma_v = (0,055-0,1)$ См/м и практически используемых электродных систем с радиусом токовода $r_e = (3-5)$ мм приводит к необходимости использования рабочих напряжений (зарядных напряжений U_z) емкостных энергоисточников ВЭУ свыше $7 \cdot 10^4$ В [4]. Максимальное рабочее напряжение, применяемое в настоящее время в ЭГИ технологиях, не превышает $5 \cdot 10^4$ В. Создание высоковольтного оборудования (емкостных энергоисточников) с рабочим напряжением свыше $5 \cdot 10^4$ В не имеет принципиальных трудностей, но это потребует разработки практически всех высоковольтных элементов (конденсаторов, коммутаторов, зарядных устройств, электродных систем и т.д.) на более высокие напряжения и, следовательно, дополнительных финансовых и временных затрат.

Поэтому исследование возможности оптимизации ЭГИ технологий при рабочем напряжении до $5 \cdot 10^4$ В является актуальной проблемой.

Цель работы: Исследовать возможность оптимизации ЭГИ технологий на базе высоковольтного пробоя по заданному импульсу давления $P(t)$ и минимальных относительных предпробивных потерях путем взаимосогласованного выбора параметров емкостного энергоисточника и геометрии электродной системы при рабочем напряжении до $5 \cdot 10^4$ В включительно.

Фактически данные исследования являются логическим продолжением работы [4], поэтому в дальнейшем для синтеза емкостного энергоисточника ВЭУ воспользуемся методологией и математическими моделями работы [4]. В качестве исходных данных для синтеза принимаем электродинамические характеристики (рис. 1, б), полученные из решения обратных гидродинамической и электродинамической задач в [2] по заданной временной зависимости гидродинамического давления $P(t)$ на расстоянии $r = 0,09$ м от источника возмущения (канала разряда) (рис. 1, а).

С использованием выражения, полученного в [5], и по функциям погонной (удельной на единицу длины канала разряда) мощности $N(t)/l_a$ и тока $I(t)$ (рис. 1, б) определяем величину погонного падения напряжения на разрядном промежутке в момент его пробоя U_{np}/l_a :

$$\frac{U_{np}}{l_a} = \frac{N_m}{I_m \cdot l_a} \cdot \frac{(0,92 - 0,65 \cdot \eta^2)}{(1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot \sqrt{\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)}}, \quad (1)$$

где N_m – максимум мощности, Вт; I_m – максимум тока, А; η – критерий подобия электродинамических характеристик разряда, который характеризует режим разряда ($\eta = 1$ – разряд критический, $\eta = 0$ – режим короткого замыкания); l_a – длина канала разряда.

Так как заданный режим разряда (рис. 1, б) предполагается реализовы-

вать посредством высоковольтного пробоя жидкости, то следует учесть тот факт, что длина канала в таком случае согласно экспериментальным данным [5] примерно вдвое превышает длину разрядного промежутка l , то есть $l_a \approx 2l$; это должно быть учтено в дальнейших расчетах.

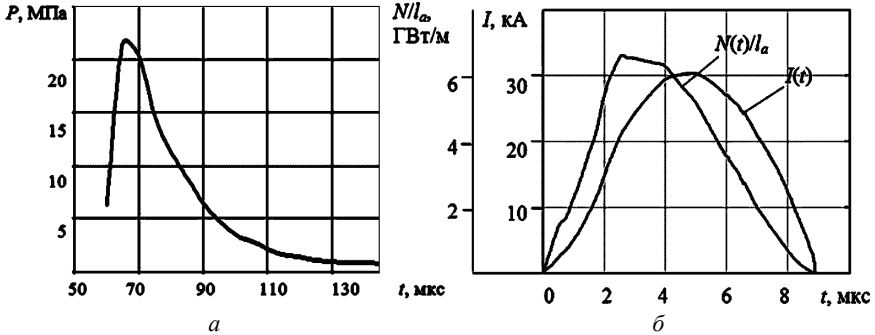


Рисунок 1 – Функции давления $P(t)$ (а), тока $I(t)$ и удельной на единицу длины канала разряда мощности $N(t)/l_a$ (б)

Алгоритм определения η изложен в [2] для электродинамических характеристик, представленных на рис. 1, б, $\eta = 0,57$. Зная значение η , для исходных данных (рис. 1, б) с использованием выражения (1) становится возможным рассчитать величину погонного напряжения пробоя В/м:

$$\frac{U_{np}}{2l} = 1,05 \cdot 10^6. \quad (2)$$

Условие (2) определяет необходимую погонную мощность $N(t)/l_a$ (рис. 1, б), а, следовательно, и давление в точке рабочей среды $P(t)$ (рис. 1, а).

С другой стороны, энергия, запасенная в конденсаторе $W = \frac{C \cdot U_z^2}{2}$ может быть представлена:

$$W = f \cdot W + W_{np}, \quad (3)$$

где $W_{np} = \frac{C \cdot U_{np}^2}{2}$ – энергия емкостного накопителя в момент пробоя разрядного промежутка; f – доля энергии от запасенной, затрачиваемой на формирование канала разряда, зависит от σ_v , U_z , l и геометрии электродной системы [6].

Из выражения (3) находим:

$$U_{np} = \sqrt{1-f} \cdot U_z. \quad (4)$$

В [6] получена зависимость для определения зарядного напряжения в зависимости от геометрии электродной системы, удельной электропроводно-

сти воды, величины относительных потерь энергии:

$$U_z = \sqrt{\left((100 \cdot l + 1,25)^2 - 1,25^2 \right) \cdot \frac{\sqrt{S_e} \cdot \alpha \cdot \sigma_v}{35,3 \cdot f \cdot C^*} + 1,82 \cdot 10^6 \cdot r_e \cdot \ln \left(4 \cdot \frac{l}{r_e} \right)}, \quad (5)$$

где $\alpha = 0,36 \cdot 10^6 \text{ В}^2 \cdot \text{с/м}$; $S_e = 2\pi \cdot r_e \cdot l_e$ – площадь оголенной части положительного электрода (l_e – длина оголенной части положительного электрода); C^* – величина «погонной» электрической емкости конденсаторной батареи, Ф·м, выражения для определения представлены в [2].

Выражения (2–5) позволяют определить длину межэлектродного промежутка, а, следовательно, и величину относительных предпробивных потерь для ВЭУ с зарядным напряжением энергоисточника $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$, работающей в заданном технологическом режиме ($P(t)$) (рис. 1, а), при различных параметрах электродной системы (r_e, l_e) и удельной электропроводности рабочей среды σ_v .

В табл. 1–3 представлены расчетные параметры ВЭУ (электрическая емкость C , индуктивность L) с $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ и соответствующие им величины l, f для различных электродных систем (r_e), $l_e = 0,05 \text{ м}$ и при величинах удельной электропроводности рабочей среды, изменяемой в диапазоне $\sigma_v = (0,055–0,1) \text{ См/м}$. Также в табл. 1–3 для каждого r_e представлены минимально возможные величины относительных предпробивных потерь энергии f_{min} , рассчитанные по методологии [4].

Таблица 1 – Расчетные параметры емкостного энергоисточника ВЭУ при $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ и $\sigma_v = 0,055 \text{ См/м}$

r_e , мм	l , м	C , мкФ	L , мкГн	f , %	f_{min} , %	$N(t)/I_a$, ГВт/ м	τ_1 , мкс	η
3	0,023	2,44	2,59	9,1	7,0	6,871	8,821	0,483
4	0,022	2,50	2,54	13,0	11,0			
5	0,021	2,57	2,47	17,0	13,0			

Таблица 2 – Расчетные параметры емкостного энергоисточника ВЭУ при $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ и $\sigma_v = 0,08 \text{ См/м}$

r_e , мм	l , м	C , мкФ	L , мкГн	f , %	f_{min} , %	$N(t)/I_a$, ГВт/ м	τ_1 , мкс	η
3	0,0222	2,497	2,549	12,5	12,0	6,871	8,821	0,483
4	0,0216	2,571	2,47	17,5	15,0			
5	0,02	2,66	2,39	23,1	19,0			

Для подтверждения достоверности полученных результатов (табл. 1–3) по расчетным параметрам ВЭУ (табл. 1–3) для каждого случая были также вычислены значения: режима разряда η (доля энергии, выделившейся за вре-

мя первого полупериода тока по отношению ко всей) [5]:

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot A \cdot l_a^2}{U_{np} \sqrt{LC}}}, \quad (6)$$

где $A = 0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$ – искровая постоянная; длительность первого полупериода тока τ_1 [5]:

$$\tau_1 = \pi \cdot (1 + \eta^3) \sqrt{LC}; \quad (7)$$

а также значение максимальной погонной электрической мощности N_m/l_a [5]:

$$\frac{N_m}{l_a} = \frac{U_{np}^2}{l_a} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot [\eta^3 \cdot (0,37 + 0,6 \cdot \eta^2)]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Таблица 3 – Расчетные параметры емкостного энергоисточника ВЭУ
при $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ и $\sigma_v = 0,1 \text{ См}/\text{м}$

r_e , мм	l , м	C , мкФ	L , мкГн	f , %	f_{min} , %	$N(t)/l_a$, ГВт/м	τ_1 , мкс	η
3	0,0219	2,53	2,51	15,0	14,0	6,871	8,821	0,483
4	0,0211	2,62	2,427	20,7	18,0			
5	0,02	2,72	2,33	26,7	22,0			

Величины длительности первого полупериода тока τ_1 , критерий подобия электрических характеристик η и погонное значение амплитуды электрической мощности N_m/l_a для всех случаев одинаковы (табл. 1–3) и соответствуют исходным данным (рис. 1, б), что является подтверждением того, что рассчитанные параметры ВЭУ при условии $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ реализуют один и тот же режим разряда, а, следовательно, и $P(t)$.

Анализ данных показывает, что обеспечить заданный технологией импульс $P(t)$ (рис. 1, а) при условии f_{min} в рассматриваемом диапазоне изменения геометрии электродной системы (r_e) и σ_v , используя рабочее напряжение $5 \cdot 10^4 \text{ В}$, не представляется возможным. Это объясняется тем, что уменьшение U_z ВЭУ влечет за собой уменьшение W , но для обеспечения заданной гидродинамической нагрузки $P(t)$ погонная энергия, выделяемая в канале разряда, должна оставаться постоянной, следовательно, при уменьшении W межэлектродный промежуток l также необходимо уменьшать (при постоянстве величин σ_v , S_e). Но в [4] показано, что f_{min} возможно обеспечить только при определенной величине l , поэтому при $U_z = 5 \cdot 10^4 \text{ В}$ относительные предпробивные потери энергии f будут превышать минимальные f_{min} [4].

Однако для выбранных в работе начальных условий отличие f от f_{min} (табл. 1–3) составляет не более 10 %, что с учетом точности использованных в работе эмпирических соотношений и, в том числе искровой постоянной A , не превышает погрешность проведенных расчетов.

Для оценки параметров емкостного накопителя ВЭУ, реализующего заданный импульс $P(t)$ при других зарядных напряжениях, путем математического моделирования и обобщения расчетных данных параметры ВЭУ (L , C , U_z) и величина относительных предпробивных потерь энергии f представлены графически как функции от длины межэлектродного промежутка l (рис. 2).

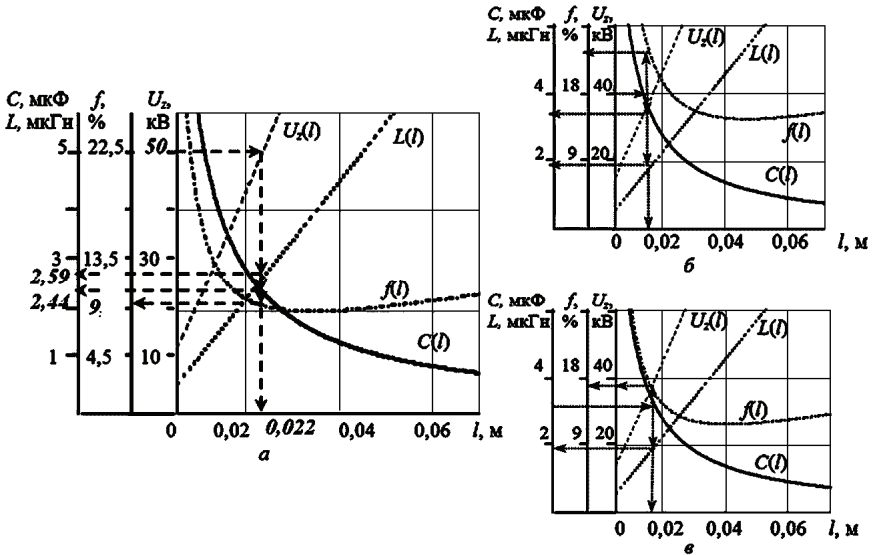


Рисунок 2 – Номограммы для определения параметров емкостного накопителя (L , C , U_z) ВЭУ с различными электродными системами ($r_e = 3$ мм (а), $r_e = 4$ мм (б), $r_e = 5$ мм (в)) при $l_e = 0,05$ м, $\sigma_v = 0,055$ См/м.

Данные номограммы могут быть использованы для быстрого определения различных комбинаций параметров ВЭУ, работающей в заданном технологическом режиме, причем при выборе нужной комбинации можно исходить из различных требований: ограничение зарядного напряжения емкостных энергоисточников ВЭУ (рис. 2 а, б), минимизация относительных предпробивных потерь энергии, выбор электрической емкости (рис. 2, в) и т.д.

Пример использования номограммы.

На рис. 2, а показан ход определения параметров ВЭУ с зарядным напряжением энергоисточника $U_z = 5 \cdot 10^4$ В (радиус скругления положительного электрода $r_e = 3$ мм, длина оголенной части электрода $l_e = 0,05$ м, удельная электропроводность рабочей среды $\sigma_v = 0,055$ См/м). На оси абсцисс находим значение зарядного напряжения, равное $5 \cdot 10^4$ В, проводим горизонтальную линию до пересечения с функцией $U_z(l)$. От полученной точки проводим вертикальную линию, ее пересечение с осью ординат определяет величину межэлектродного промежутка $l = 0,022$ м. Далее от точек пересече-

ния с функциями $L(l)$, $C(l)$, $f(l)$ проводим горизонтальные линии к соответствующим осям абсцисс и определяем $L = 2,59$ мкГн, $C = 2,44$ мкФ, $f = 9$ %. На рис. 2, б показан ход определения параметров ВЭУ с зарядным напряжением $U_z = 4 \cdot 10^4$ В, а для номограммы, представленной на рис. 2, в, требованием, исходя из которого определяются остальные параметры ВЭУ, является величина емкости конденсаторной батареи равная $C = 3$ мкФ.

При других исходных данных ($P(t)$, $N(t)$, $I(t)$) характер зависимостей, представленных на рис. 2, сохранится, однако изменятся величины, диапазоны и т.д.

Выводы.

1. Зарядное напряжение емкостного накопителя, равное $5 \cdot 10^4$ В, обеспечивает режим работы ВЭУ для получения требуемого $P(t)$ при относительных предпробивных потерях f , превышающих f_{min} , однако отличие f от f_{min} составляет не более 10 %, что находится в пределах расчетной погрешности и является удовлетворительным для инженерных расчетов. Поэтому можно сделать вывод, что возможно оптимизировать ЭГИ технологический процесс на базе емкостного накопителя с зарядным напряжением, не превышающим $5 \cdot 10^4$ В при рассмотренных начальных данных по заданному технологией импульсу давления $P(t)$ и минимальных относительных предпробивных потерях энергии f_{min} .

2. Предложенные номограммы позволяют проводить экспресс-анализ необходимых параметров емкостного накопителя и величин предпробивных потерь энергии при зарядных напряжениях до $5 \cdot 10^4$ В для принятых в работе начальных условий.

Автор благодарит доктора технических наук, профессора, вед. науч. сотр. Вовченко А. И. и науч. сотр. Блащенко А. Д. за внимание к проделанной работе и ценные замечания.

Список литературы: 1. *Вовченко А.И.* Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов / *А.И. Вовченко, В.В. Шомко, А.М. Шишов* // Техн. электродинамика. – 2005. – № 3. – С. 68-73. 2. *Вовченко А.И.* Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак, Р.В. Тертилов* // Техн. электродинамика. – 2009. – № 6. – С. 54-60. 3. *Вовченко А.И.* Оптимизация высоковольтных электроразрядных систем и технологий, использующих длительные разряды / *А.И. Вовченко, Н.П. Дивак* // Збірник наук. праць НУК. – 2009. – № 4 (427). – С. 136-141. 4. *Вовченко А.И.* Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электротехнологических установок с учетом предразрядных процессов / *А.И.Вовченко, Н.П. Дивак* / Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 18. – С. 61-67. 5. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости / *Е.В.Кривицкий*. – К.: Наукова думка, 1986. – 208 с. 6. *Кужекин И.П.* Импульсный пробой и канал разряда в жидкости: Дис... канд. техн. наук. 05.09.05 /Моск. энерг. ин-т. – М., 1967. – 186 с.

Поступила в редколлегию 23.06.2010.