

Оптимизация параметров струйного частотного коммутатора

А. А. Воронин, П. А. Кулаков, В. И. Приходченко

Самарский государственный технический университет, Россия

Решена задача по оптимизации параметров струйного частотного коммутатора. Оптимизационная задача была сведена к задаче Куна—Таккера. В качестве целевой функции при этом использовались стоимостные показатели контактных материалов, а ограничениями служили условия термической и электродинамической стойкости жидкометаллических струй. Для решения задачи условной оптимизации применен один из методов прямого поиска — метод комплексов. В результате произведенных на ЭВМ расчетов для струй различной длины и при разном времени работы струи установлено, что минимум объемного расхода жидкого металла достигается при таком соотношении диаметра струи и скорости металла в ней, при котором наблюдается равенство допустимых плотностей тока термической и электродинамической стойкости. Показано, что применение в качестве промежуточного рабочего тела галлия или эвтектического сплава Ga—In—Sn позволяет получить значительно большую плотность тока в пределах термической и электродинамической стойкости по сравнению с ртутью или эвтектическим сплавом Na—K.

Ключевые слова: жидкометаллические контакты, частотный коммутатор, термическая и электродинамическая стойкость струи жидкого металла, оптимизация параметров, задача нелинейного программирования.

Для создания коммутационных аппаратов, работающих в режиме периодического замыкания и размыкания цепи, необходимо организовать зонный жидкометаллический контакт, ограниченный во времени и пространстве [1]. Частотный коммутатор должен производить коммутацию цепи с определенной частотой, выдерживать заданное время импульса t_n и паузы тока t_p . Коммутация больших токов вызывает эрозионный износ дугогасительных контактов.

Расчет оптимальных параметров струйного частотного коммутатора является достаточно сложной задачей ввиду нелинейного характера связей, существующих между этими параметрами. В качестве главного критерия оптимизации выберем расход жидкого металла при коммутации. Для оценки расхода жидкого металла рассмотрим один цикл работы струйного частотного коммутатора. Величина объемного расхода в этом случае определяется по следующему выражению:

$$Q = \frac{\pi \cdot l \cdot d^2}{4} + \frac{\pi \cdot t_n \cdot v \cdot d^2}{4}, \quad (1)$$

где d и l — диаметр и длина струи жидкого металла, м; t_n — время импульса (одного цикла работы), с; v — скорость жидкого металла в струе, м/с.

Время импульса и длина струи в выражении (1) являются входными параметрами. Время импульса определяется частотой коммутации, длина

струи выбирается исходя из конструктивных соображений. Для того чтобы минимизировать расход жидкого металла, необходимо найти оптимальное соотношение диаметра струи и скорости металла в ней.

При минимизации объемного расхода необходимо, чтобы плотность тока в струе жидкого металла не превышала плотности тока термической и электродинамической стойкости. Эти ограничения выражаются следующими неравенствами:

$$g_1 = \frac{a}{\sqrt{t_u}} - \frac{4I}{\pi \cdot d^2} \geq 0; \quad (2)$$

$$g_2 = \frac{2}{t_u \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\mu_0} (d^2 + 2v^2 \cdot t_u^2)} - \frac{4I}{\pi \cdot d^2} \geq 0, \quad (3)$$

где a — параметр, зависящий от физических свойств жидкого металла, рассчитывается по выражению [1]

$$a = \sqrt{\frac{\gamma_{пл} \cdot c_{пл}}{\rho_{пл} \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{1 + \alpha(T_1 - T_{пл})}{1 + \alpha(T_0 - T_{пл})}}.$$

Кроме того, возможная величина длины струи не должна быть меньше длины струи, принятой исходя из конструктивных особенностей частотного коммутатора:

$$g_3 = l - \frac{v^2}{g} \cdot \sin(2 \arcsin \frac{\sqrt{g \cdot d}}{10v}) \geq 0. \quad (4)$$

Таким образом, задачу оптимизации параметров жидкометаллической струи для минимизации объемного расхода на одном цикле работы струйного частотного коммутатора можно записать в виде условий Куна—Таккера следующим образом:

$$\text{минимизировать } Q(d, v) \quad (5)$$

$$\text{при ограничениях } g_j(d, v) \geq 0, \quad j = 1, 2, 3, \quad (6)$$

$$d > 0, \quad v > 0. \quad (7)$$

Прежде, чем приступить к решению задачи (5)—(7), необходимо знать, является ли функция, выражающая величину объемного расхода, выпуклой или вогнутой. От этого в значительной степени зависит выбор стратегии оптимизации. Функция является выпуклой, если ее матрица Гессе положительно определена или положительно полуопределена. Если матрица Гессе отрицательно определена или отрицательно полуопределена, то функция — вогнутая [2]. Матрица Гессе для функции (1) имеет следующий вид:

$$H_Q = \begin{vmatrix} \frac{\pi \cdot l}{2} + \frac{\pi \cdot t_u \cdot v}{2} & \frac{\pi \cdot t_u \cdot d}{2} \\ \frac{\pi \cdot t_u \cdot d}{2} & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\pi^2 \cdot t_u^2 \cdot d^2}{4}. \quad (8)$$

Очевидно, что матрица Гессе вида (8) отрицательно определена при всех значениях переменных, удовлетворяющих условию (7). А это значит,

что функция (1) является вогнутой. Поэтому минимум объемного расхода жидкого металла в струе будет соответствовать не глобальному экстремуму функции (1) (глобальный экстремум вогнутой функции является максимумом этой функции), а частному экстремуму, который достигается в том случае, если выполняются ограничения (6), (7).

Для решения задачи условной оптимизации (5)—(7) применен один из методов прямого поиска — метод комплексов [3]. В результате произведенных на ЭВМ расчетов для струй различной длины и при разном времени работы струи установлено, что минимум объемного расхода жидкого металла достигается при таком соотношении диаметра струи и скорости металла в ней, при котором наблюдается равенство допустимых плотностей тока термической и электродинамической стойкости. То есть при равенстве диаметров струи, полученных из условий термической и электродинамической стойкости жидкометаллической струи. Из системы (2), (3) при описанных условиях выражения для оптимальных скорости жидкого металла в струе и диаметра струи имеют вид:

$$v = \sqrt{\frac{I \cdot b}{2\pi \cdot \gamma \cdot t_u \cdot \sqrt{t_u}}}; \quad (9)$$

$$d = \sqrt{\frac{-I\sqrt{t_u} \cdot b + I\sqrt{t_u} \cdot b + 16\mu_0 \cdot a^2 \cdot \gamma \cdot t_u^2}{2\pi \cdot a \cdot \gamma}}, \quad (10)$$

где $b = \mu_0 \cdot a^2 \cdot t_u - 4\gamma$.

А поскольку величины скорости жидкого металла в струе и диаметр струи должны выражаться действительными числами, то необходимо, чтобы выполнялось следующее условие:

$$t_u > \frac{4\gamma}{\mu_0 \cdot a^2}. \quad (11)$$

То есть выражения (9), (10) пригодны для определения оптимальных параметров струи жидкого металла для величины времени импульса, удовлетворяющей неравенству (11). В табл. 1 приведены граничные значения времени импульса, при которых выполняется условие (11), для различных жидких металлов при двух характерных температурах нагрева струи.

По приведенной методике выполнены расчеты для эвтектического сплава Ga—In—Sn и величин коммутируемого тока $I = 1—1000$ кА и времени импульса $t_u = 0,0001—0,01$ с. Полученные значения параметров жидкометаллической струи приведены в табл. 2, 3.

Одним из преимуществ струйного жидкометаллического контакта является возможность повышения ресурса работы коммутационного аппарата. Конструкция частотного коммутатора струйного типа [4] показана на рисунке. Коммутатор состоит из неподвижных электродов 1, 2 и дополнительного электрода 3. Неподвижные твердометаллические электроды 1, 2 помещены в ванны с жидким металлом 4, 5, которые вращаются в противоположные стороны. В боковых стенках ванн имеются сквозные радиальные отверстия 6, 7. На одном уровне с отверстиями 6, 7 по обе стороны от дополнительного электрода 3 помещены щелевые дугогасительные камеры 8, 9. Ванны закреплены на валах 10, 11, которые

Т а б л и ц а 1. Граничные значения времени импульса

Металл	Характерные температуры нагрева	$t_{и}, с$
Ga	120	$2,9 \cdot 10^{-5}$
	1983	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Ga—In—Sn	120	$3,9 \cdot 10^{-5}$
	2000	$4,2 \cdot 10^{-6}$
Hg	120	$2,6 \cdot 10^{-4}$
	357	$7,8 \cdot 10^{-5}$
Na—K	120	$1,4 \cdot 10^{-5}$
	784	$5,5 \cdot 10^{-5}$

Т а б л и ц а 2. Параметры струйного частотного коммутатора на ток коммутации 1 кА

Время импульса $t_{и}, с$	0,001	0,001	0,001	0,001
Длина струи $l, м$	0,3	0,15	0,02	0,003
Диаметр струи $d, м$	0,0037	0,012	0,0037	0,0012
Скорость металла в струе $v, м/с$	171,3	54,2	17,1	5,4
Объемный расход жидкого металла $Q, м^3/цикл$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$

Т а б л и ц а 3. Параметры струйного частотного коммутатора на ток коммутации 1000 кА

Время импульса $t_{и}, с$	0,01	0,001	0,0001
Длина струи $l, м$	0,2	0,11	0,08
Диаметр струи $d, м$	0,075	0,042	0,024
Скорость металла в струе $v, м/с$	84,6	147,7	209,2
Объемный расход жидкого металла $Q, м^3/цикл$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$

соединены с приводным устройством (на рисунке не показано). Вся конструкция помещена в корпус 12.

Работа частотного коммутатора осуществляется следующим образом. Ванны вращаются приводным устройством в противоположные стороны. При этом жидкий металл под действием центробежных сил выбрасывается из радиальных отверстий боковых стенок ванн и через дополнительный электрод замыкает цепь. Длительность замыкания

обуславливается временем соприкосновения струи жидкого металла с дополнительным электродом. При размыкании цепи возникающая дуга

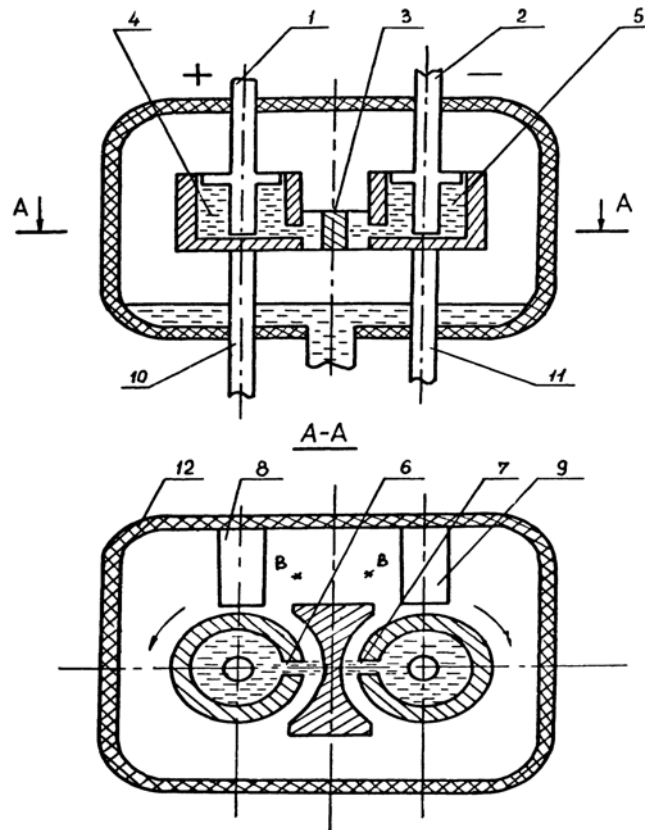


Схема струйного частотного коммутатора: 1, 2 — неподвижные электроды; 3 — дополнительный электрод; 4, 5 — ванны с жидким металлом; 6, 7 — отверстия; 8, 9 — щелевые дугогасительные камеры; 10, 11 — валы; 12 — корпус.

центробежными силами и силами наложенного магнитного поля затягивается в щелевую дугогасительную камеру и в ней гасится. После выполнения цикла переключений частотный коммутатор перезаряжается жидким металлом, после чего опять готов к работе.

Устранение трущихся изоляционных поверхностей повышает ресурс работы частотного коммутатора, при этом вогнутая форма боковых поверхностей дополнительного электрода делает возможным создание короткой жидкометаллической струи одинаковой длины, что повышает ее устойчивость и уменьшает электрическое сопротивление. Кроме того, разрыв по воздуху между электродами повышает уровень изоляции конструкции.

Выводы

Решена задача по оптимизации параметров струйного частотного коммутатора. Оптимизационная задача была сведена к задаче Куна—Таккера. В качестве целевой функции при этом использовали стоимостные

показатели контактных материалов, а ограничениями служили условия термической и электродинамической стойкости жидкометаллических струй. В результате произведенных на ЭВМ расчетов для струй различной длины и при разных значениях времени работы струи установлено, что минимум объемного расхода жидкого металла достигается при таком соотношении диаметра струи и скорости металла в ней, при котором наблюдается равенство допустимых плотностей тока термической и электродинамической стойкости. То есть при равенстве диаметров струй, полученных из условий термической и электродинамической стойкости жидкометаллической струи.

Показано, что применение в качестве промежуточного рабочего тела галлия или эвтектического сплава галлий—индий—олово позволяет получить значительно большую плотность тока в пределах термической и электродинамической стойкости по сравнению с ртутью или эвтектическим сплавом натрий—калий.

1. Воронин А. А., Кулаков П. А., Приходченко В. И. Частотные коммутаторы с жидкометаллическим рабочим телом // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2008. — С. 66—70.
2. Ланкастер П. Теория матриц. — М.: Наука, 1978. — 280 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.
4. А. с. 1040541 СССР. Частотный коммутатор / Н. А. Ахмеров, А. А. Воронин, П. А. Кулаков и др. — Оpubл. 31.05.1982.

Оптимізація параметрів струминного частотного комутатора

О. А. Воронін, П. О. Кулаков, В. І. Приходченко

Вирішено завдання щодо оптимізації параметрів струминного частотного комутатора. Оптимізаційне завдання було зведено до завдання Куна—Таккера. В якості цільової функції при цьому використовували вартісні показники контактних матеріалів, а обмеженнями слугували умови термічної та електродинамічної стійкості рідкометалевих струменів. Для вирішення завдання умовної оптимізації використано один з методів прямого пошуку — метод комплексів. В результаті проведених на ЕВМ розрахунків для струменів різних довжини і часу роботи встановлено, що мінімум об'ємної витрати рідкого металу досягається за умов такого співвідношення діаметру струменя і швидкості металу в ньому, при якому спостерігається рівність допустимих густин струму термічної і електродинамічної стійкості. Показано, що використання в якості проміжного робочого тіла галія або евтектичного сплаву Ga—In—Sn дозволяє отримати значно більшу густину струму в границях термічної та електродинамічної стійкості у порівнянні із ртутью або евтектичним сплавом Na—К.

Ключевые слова: рідкометалеві контакти, частотний комутатор, термічна та електродинамічна стійкість струменя рідкого металу, оптимізація параметрів, завдання нелінійного програмування.

Optimisation of parameters of the jet frequency commutators

A. Voronin, P. Kulakov, V. Prikhodthenko

A task is decided on optimization of parameters of stream frequency commutators. An optimization task was taken to the task of Kuhn—Takker. As an objective function the cost indexes of pin materials were here used, and limitations the terms of thermal and electrodynamic firmness of liquid-metal streams served as. For the decision of task of the constrained optimization was applied one of methods of direct search is a method of complexes. As a result of the calculations produced on computer for the streams of different length and it was set at the different values of burn-time of stream, that a minimum of by volume expense of liquid metal is arrived at such correlation of diameter of stream and speed of metal in it, which equality of possible closenesses of current of thermal and electrodynamic firmness is at. It is shown that application as an intermediate working body of gallium or eutecticum alloy Ga—In—Sn, allows to get considerably the large values of closeness of current within the limits of thermal and electrodynamic firmness, as compared to mercury or eutecticum alloy Na—K.

Keywords: *liquid-metal contact , frequency commutators, terms of thermal and electrodynamic firmness of liquid-metal streams, optimization of parameters, problem of nonlinear programming*