



УДК 533.9.07:537.533

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

Б. А. Тугай

Рассмотрены вопросы автоматического управления током электронных пушек на основе высоковольтного тлеющего разряда с холодным катодом путем изменения давления в пушке при непрерывной ее откачке и регулируемом напуске газа с помощью малоинерционного электромагнитного натекателя. Приведена математическая модель процесса автоматического управления током газоразрядной пушки и ее решение на ЭВМ. Показано влияние газодинамических характеристик систем откачки и напуска газа на процесс управления, проведено сравнение расчетных и экспериментальных переходных характеристик управления током газоразрядной электронной пушки для напыления.

Problems of automatic control of current of electron guns with a cold cathode, based on a high-voltage glowing discharge, by changing the pressure in the gun at its continuous pumping and adjustable gas leak-in using a low-inertia electromagnetic flow regulator are considered. Mathematical model of process of automatic control of gas-discharge gun current and its solution in the computer are given. The effect of hydrodynamic characteristics of systems of gas pumping and leak-in on the process of control is shown, the comparison of estimated and experimental transient characteristics of current control of gas-discharge electron gun for cladding is given.

**Ключевые слова:** газоразрядная электронная пушка; натекатель; разряд; система управления; математическая модель

В настоящее время для электронно-лучевой плавки и напыления покрытий, а также для сварки тонкостенных изделий все большее применение находят электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом. Несмотря на сравнительно невысокую удельную мощность в пучке такие пушки имеют ряд преимуществ перед широко используемыми в электронно-лучевых технологиях пушками с термоэлектронными эмиттерами. Они отличаются длительным сроком службы холодного катода с развитой эмиссионной поверхностью, могут устойчиво работать в среде различных газов в широком диапазоне значений давления, обеспечивают формирование электронных пучков различной формы, относительно просты и надежны в работе. Их использование позволяет упростить технологическое оборудование [1]. В промышленности применяются газоразрядные пушки мощностью от единиц до сотен киловатт. В зависимости от назначения они отличаются конструктивными, электронно-оптическими и энергетическими характеристиками. Управление током газоразрядных пушек осуществляют путем изменения давления в области горения разряда с помощью регулируемого напуска газа в пушку при ее непрерывной откачке. Такой способ управления обусловлен

сильной зависимостью тока газоразрядной пушки от давления в разрядном промежутке [2]. Если в процессе работы регулировать натекание газа в пушку, изменяя давление в ней, и поддерживать неизменным ускоряющее напряжение, то можно управлять током разряда, а следовательно, и мощностью пучка во всем рабочем диапазоне пушки [3]. Регулируемый напуск газа в пушку осуществляют с помощью натекателей. Для большинства технологических процессов, где используются газоразрядные электронные пушки (ГРЭП), требуется автоматическое управление их параметрами с высокой точностью и малым временем регулирования. В отдельных случаях, особенно при запуске пушек большой мощности, когда возможны частые дуговые пробои, система напуска газа должна обеспечивать работу в режиме стабилизации давления газа в пушке или в ручном режиме управления. При этом натекатели, используемые в системах управления током пушки, должны отличаться высокой стабильностью параметров и малой инерционностью электрически управляемого привода.

Физическая модель типовой системы автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем газа состоит из газоразрядной электронной пушки 2 с лучепроводом 7, источника высоковольтного питания пушки 3, датчика тока пушки 4, электронного регулятора 12, натекателя газа с электромагнитным приводом 11, дозирующим

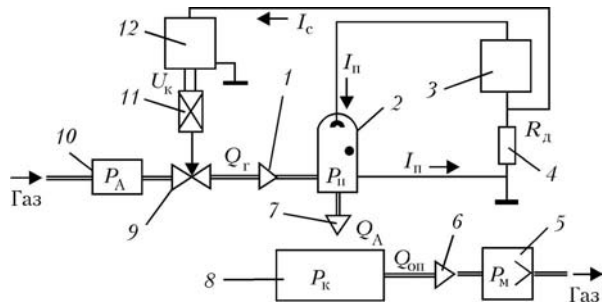


Рис. 1. Система автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем

устройством 9 и газовой камерой 10, канала для напуска газа 1, соединяющего натекатель с пушкой, вакуумной камеры 8, вакуумпровода 6, соединяющего вакуумную камеру с вакуумным насосом 5 (рис. 1). Датчиком тока пушки является низкоомное сопротивление, включенное последовательно в низковольтный участок цепи разряда или датчик на основе эффекта Холла, включаемый в высоковольтный участок цепи разряда и имеющий высоковольтную гальваническую развязку по напряжению. Электромагнитный натекатель снабжен прямоходовым электромагнитным приводом, конструктивно соединенным жестко со штоком дозирующего устройства и работающим в аналоговом режиме. Непрерывная откачка пушки осуществляется через лучепровод совместно с вакуумной камерой.

В процессе работы пушки сигнал с датчика тока разряда поступает в электронный блок управления, где сравнивается с заданным опорным напряжением, устанавливаемым в зависимости от требуемого значения тока разряда, усиливается ПИД-усилителем и поступает на обмотку электромагнита натекателя. В зависимости от силы сигнала управляющего воздействия натекатель направляет поток газа в пушку, находящуюся под непрерывной откачкой, в результате чего давление в ней устанавливается таким, при котором ток разряда соответствует заданному. Инерционность исполнительных устройств, а также газодинамических процессов откачки и напуска газов ограничивают временные характеристики управления током ГРЭП. При этом существенного улучшения характеристик системы управления током пушки достигают путем выбора оптимальных значений параметров систем откачки и напуска газа на этапе проектирования электронной пушки и вакуумной установки, а также исполнительного устройства. Такая задача связана с большим объемом экспериментальных исследований. Она значительно упрощается при компьютерном моделировании систем автоматического управления током ГРЭП.

В работе [3] приведена математическая модель системы автоматического управления током электронной пушки на основе ВТР, в которой используется электромагнитный натекатель с дозирующим устройством, выполненным в виде осесимметрично расположенных седла с плоской уплотняющей поверхностью и отверстием для протока газа в центре, а также подвижного штока с плоской торцевой по-

верхностью со стороны седла. Эта конструкция дозирующей пары характерна тем, что рабочий ход штока определяется пропускной способностью отверстия в уплотнителе и ограничен положением стопа прямоходового электромагнитного привода натекателя.

В реальных конструкциях электромагнитных натекателей с указанной дозирующей парой рабочий ход штока составляет 0,01... 0,02 мм, поэтому при изменении температурного режима натекателя вследствие различия значений коэффициентов температурного расширения материалов его конструкции изменяется зазор между штоком и седлом дозирующей пары вплоть до запираения натекателя. Это приводит к нарушению работы системы управления током пушки как в ручном, так и в автоматическом режимах. К тому же характеристика зависимости потока газа от положения штока в указанной дозирующей системе имеет существенно нелинейный характер на начальном участке, что затрудняет регулирование тока пушки при ручном управлении.

В данной работе исследуется система автоматического управления током ГРЭП с электромагнитным натекателем, в котором изменена конструкция дозирующей пары, вследствие чего уменьшена нелинейность характеристики его производительности и практически отсутствует влияние температурного режима натекателя на стабильность его работы. Это позволило эффективно использовать его как в автоматическом, так и в ручном режиме управления током пушки. Приведены математическая модель системы автоматического управления током ГРЭП и ее решение на ЭВМ, исследовано влияние газодинамических характеристик систем откачки и напуска газа на характеристики управления, показано влияние динамических характеристик электромагнитного привода натекателя на процесс управления током пушки, проведено сравнение расчетных и экспериментальных переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП.

**Математическая модель системы автоматического управления током пушки.** При составлении математической модели газодинамическую систему пушки с системой откачки рассматривали как систему с сосредоточенными параметрами, в которой не учитывали объемы вакуум-проводов и газовыделение из их поверхностей, а также потоки газов, не оказывающие заметного влияния на динамику изменения давления в ГРЭП в процессе ее работы, т. е. натекание газа в пушку и вакуумную камеру технологической установки, сорбционные процессы на поверхности разрядной камеры пушки и вакуумной камеры установки и др. Предполагалось, что откачка вакуумной камеры и газоразрядной пушки осуществляется вакуумным насосом, быстрота действия которого в значительной мере постоянна в широкой области значений давления, что характерно



для наиболее широко применяемых в электронно-лучевых установках диффузионных, ротационных и других насосов [4].

Математическую модель системы автоматического управления током ГРЭП можно представить системой дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода натекателя, зависимость его газовой проводимости от силы управляющего сигнала и условие баланса газовых потоков в разрядной камере пушки и вакуумной камере электронно-лучевой установки. При этом входным параметром модели является управляющее напряжение на натекателе  $U_n$ , а выходным — сигнал с датчика тока пушки  $I_p$ .

Динамика прямоходового электромагнитного привода натекателя, работающего в аналоговом режиме, описывается уравнением баланса напряжений в цепи питания электромагнита и условием равновесия сил его механической части, которые в малых отклонениях имеют вид

$$R_k \Delta i_n + L_k \frac{d\Delta i_n}{dt} = \Delta U_n,$$

$$m_n \frac{d^2 \Delta l_n}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \Delta F_i = \Delta F_s - \Delta F_n - \Delta F_T,$$

где  $R_k$ ,  $L_k$ ,  $i_n$ ,  $U_n$  — соответственно активное сопротивление, индуктивность, ток и напряжение в обмотке электромагнита натекателя;  $m_n$  — масса подвижной части натекателя;  $l_n$  — координата, определяющая положение якоря со штоком относительно седла клапана;  $F_s$  — тяговая сила электромагнита;  $F_n$  — упругая сила пружины;  $F_T$  — сила трения.

$$\Delta F_s = C_s \Delta i_n, \quad \Delta F_n = C_n \Delta l_n,$$

$$\Delta F_T = C_k \frac{dl_n}{dt},$$

где  $C_s$  — крутизна тяговой характеристики электромагнита;  $C_n$  — коэффициент жесткости пружины;  $C_k$  — коэффициент силы трения.

Для уменьшения влияния температурного режима на стабильность работы натекателя конструкция его дозирующей пары изготовлена в виде штока 1, на торцевой поверхности которого выполнен цилиндрический выступ меньшего диаметра, и седла 2 в виде полого цилиндра, внутри которого перемещается выступ штока (рис. 2). В запертом состоянии натекателя уплотняющими поверхностями дозирующей пары являются плоские поверхности торца штока и полого цилиндрического седла. При перемещении штока в процессе регулирования проводимости натекателя  $S_d$  определяется проводимостями зазоров, образованных поверхностями уплотнения  $S_{d1}$  и цилиндрическими поверхностями отверстия седла и выступа штока  $S_{d2}$ , а также проводимостью цилиндрического отверстия седла  $S_{d3}$ , которые яв-

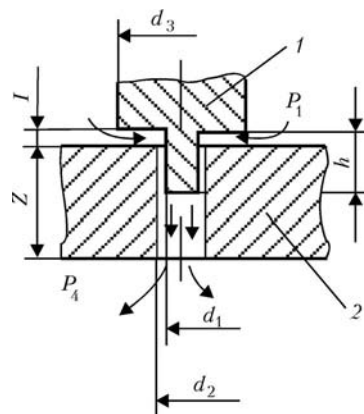


Рис. 2. Схематическое изображение конструкции дозирующей пары натекателя

ляются функциями осевого перемещения штока относительно седла  $l_n$ . В такой конструкции обеспечивается ход штока на расстояние до нескольких миллиметров, что практически исключает влияние изменения температуры натекателя на его газовую проводимость.

Выражение для определения пропускной способности натекателя  $S_d$  можно записать в виде суммы последовательно включенных проводимостей  $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$ ,  $S_{d3}$ :

$$\frac{1}{S_d} = \frac{1}{S_{d1}} + \frac{1}{S_{d2}} + \frac{1}{S_{d3}}.$$

Проводимость  $S_{d1}$ , образованную плоскими уплотняющими поверхностями штока и седла, можно рассматривать как проводимость прямоугольного трубопровода с сечением  $a_1 \times e_1$  и длиной  $c_1$ , определяемыми из следующих выражений:

$$a_1 = p(d_3 - d_2); \quad b_1 = \frac{h}{2}; \quad c_1 = \frac{d_3 - d_2}{2}.$$

Тогда, согласно работе [4], газовая проводимость данного участка вакуум-провода для воздуха при ламинарном потоке будет иметь вид

$$S_{d1} = A_1 \bar{p}_1 l^2,$$

где  $A_1 = 5,8 \cdot 10^8 k_1 d_2^2 (d^3 - d^2)^{-1}$ ;  $k_1$  — эмпирический коэффициент, значение которого зависит от соотношения  $a_1/e_1$ ;  $p_1$  — среднее значение давления газа на данном участке вакуум-провода.

Проводимость  $S_{d2}$  второго участка, образованная двумя цилиндрическими поверхностями выступа штока и отверстия в седле дозирующей пары, можно также рассматривать как прямоугольный вакуум-провод с сечением  $a_2 \times e_2$  и длиной  $c_2$ , которые вычисляются из соотношений

$$a_2 = p(d_2 - d_1); \quad b_2 = \frac{d_2 - d_1}{2}; \quad c_2 = \frac{h - l}{2}.$$

Тогда газовая проводимость  $S_{d2}$  для воздуха при ламинарном потоке определится как



$$S_{л2} = \frac{A_2 \bar{p}_2}{h - l},$$

где  $A_2 = 488k_2 p^2 (d_2 - d_1)^2$ ;  $k_2$  — эмпирический коэффициент, значение которого зависит от соотношения  $a/\sigma$ ;  $\bar{p}_2$  — среднее значение давления на участке вакуум-провода с газовой проводимостью  $S_{л2}$ .

Проводимость  $S_{л3}$ , образованная цилиндрическим отверстием в седле дозирующей пары с диаметром  $d_c = d_2$  и высотой  $H_c = z - h - l$ , определяется по формуле

$$S_{л3} = \frac{a_3 \bar{p}_3}{z - h - l}.$$

где  $A_3 = 1360d_2^4$  (для воздуха);  $\bar{p}_3$  — среднее значение давления на участке вакуум-провода с проводимостью  $S_{л3}$ .

Тогда общая проводимость дозирующей пары натекателя будет определяться из выражения

$$S_{л} = p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{z - h - l}.$$

Проводимость газового канала  $S_{к}$ , расположенного между натекателем и пушкой, существенно больше проводимости натекателя  $S_{л}$  и при вычислении суммарной проводимости канала напуска газа в пушку  $S_{г}$  ею можно пренебречь. На характеристики регулирования существенное влияние оказывает транспортное запаздывание газа, обусловленное перемещением молекул газа по каналу от натекателя к пушке. Без учета эффекта размывания фронтов газового потока в трубопроводе канал напуска газа можно рассматривать как звено с чистым временным запаздыванием  $\tau_3$  в контуре регулирования. Тогда выражение для суммарной проводимости газового канала с учетом временного запаздывания будет иметь вид

$$S_{г}(t) = \left( p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{z - h - l} \right) (t - \tau_3).$$

Модель газодинамической системы пушки с системой откачки можно представить системой дифференциальных уравнений, описывающих условия баланса газовых потоков в разрядной камере пушки и вакуумной камере электронно-лучевой установки. Основными потоками, определяющими давление в разрядной камере пушки, являются регулируемый поток газа  $Q_{г}$ , поступающий в ГРЭП через натекаТЕЛЬ и вакуум-провод, соединяющий натекаТЕЛЬ с разрядной камерой пушки, и поток газа, откачиваемый из пушки через лучепровод  $Q_{л}$ . Уравнение баланса газовых потоков в разрядной камере ГРЭП можно записать в виде

$$V_{п} \frac{dp_{п}}{dt} = Q_{г} - Q_{л},$$

где  $V_{п}$  — объем разрядной камеры пушки;  $p_{п}$  — давление газа в пушке.

Регулируемый поток газа  $Q_{г}$  определяется проводимостью  $S_{г}$  и разностью давлений в натекателе  $p_A$  и пушке  $p_{п}$

$$Q_{г} = S_{г} (p_A - p_{п}).$$

Поток газа, откачиваемого из пушки через лучепровод  $Q_{л}$ , определяется проводимостью лучепровода и разностью давлений в пушке и вакуумной камере электронно-лучевой установки.

$$Q_{л} = S_{л} (p_{п} - p_{к}),$$

где  $S_{л}$  — проводимость лучепровода;  $p_{к}$  — давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки.

Основными потоками, определяющими давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки в ГРЭП, являются поток газа, поступающего из пушки в вакуумную камеру  $Q_{л}$ , и поток газа, откачиваемого из вакуумной камеры вакуумным насосом  $Q_{от}$ . Уравнение баланса газовых потоков в вакуумной камере электронно-лучевой установки можно записать в виде

$$V_{к} \frac{dp_{к}}{dt} = Q_{л} - Q_{от},$$

где  $V_{к}$  — объем вакуумной камеры.

Поток газа, откачиваемого из вакуумной камеры, пропорционален скорости откачки камеры  $S_{от}$  и давлению в ней  $p_{к}$ ,  $Q_{от} = S_{от} p_{к}$ .

Быстрота откачки камеры определяется быстротой действия вакуумного насоса  $S_{п}$  и проводимостью вакуум-провода  $S_{в}$ , соединяющего вакуумную камеру и вакуумный насос,

$$\frac{1}{S_{от}} = \frac{1}{S_{п}} + \frac{1}{S_{в}}.$$

Проводимость  $S_{в}$  определяется геометрией вакуум-провода, зависит от давления в вакуум-проводе и может быть рассчитана с помощью уравнений динамики разреженного газа.

Быстрота действия вакуумного насоса, согласно работе [4], определяется по формуле

$$S_{п} = S_{р} \left( 1 - \frac{p_{м}}{p_{к}} \right),$$

где  $S_{р}$  и  $p_{м}$  — расчетная быстрота действия насоса и предельное давление в насосе (параметры, которые приводятся предприятием-изготовителем в техническом паспорте на насос).

Тогда выражение для определения потока откачиваемого газа из вакуумной камеры будет иметь вид

$$Q_{от} = \frac{1}{\frac{1}{S_{в}} + \frac{1}{S_{р}}} \left( 1 - \frac{p_{м}}{p_{к}} \right) p_{к} = \frac{S_{в} S_{р}}{S_{в} + S_{р}} (p_{к} - p_{м}).$$

Зависимость тока пушки от давления описывается эмпирическим соотношением

$$I_{п} = a p_{п}^m U_{п}^n \quad (1)$$



где  $a, m, n$  — постоянные, зависящие от рода газа, материала катода, геометрии электродов. Причем  $m$  может изменяться в пределах  $2 \dots 4$ .

Выходным параметром объекта управления является напряжение сигнала обратной связи  $U_{o.c}$ , поступающего на электронный регулятор с датчика тока пушки:

$$U_{o.c} = K_d I_n.$$

Математическую модель для ГРЭП как объекта, в котором стабилизируется ток разряда путем изменения давления в разрядном промежутке с помощью автоматически управляемого электромагнитного натекаателя, можно записать как

$$\begin{cases} R_n i_n + L_k \frac{di_n}{dt} = U_n, \\ m_n \frac{d^2 l_n}{dt^2} = C_3 i - C_n I_n - C_k \frac{dl_n}{dt}, \\ S_r(t) = \left( p_1 l^2 + \frac{A_2 p_2}{hl} + \frac{A_3 p_3}{(z-h-l)} \right) (t - \tau_3), \\ V_n \frac{dp_n}{dt} = S_r(p_A - p_n) - S_d(p_n - p_k), \\ V_k \frac{dp_k}{dt} = S_d(p_n - p_k) - \frac{S_b S_p}{S_b + S_p} (p_k - p_m), \\ I_n = a p_n^m U^n; \quad U_{o.c} = k_d I_n. \end{cases} \quad (2)$$

Полученная система уравнений является нелинейной. Для ее решения разработана программа, позволяющая моделировать динамику отдельно взятого объекта или объекта в составе замкнутой системы и учитывающая влияние нелинейностей, а также запаздывание в канале напуска газа. В замкнутой системе использовали ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{per}(p) = k_{per} \left( 1 + \frac{1}{T_i p} + T_n p \right),$$

где  $k_{per}$  — коэффициент передачи регулятора;  $T_i$  — время издрорма;  $T_n$  — время предварения.

**Численное решение математической модели системы автоматического управления током пушки.** Решение системы уравнений в нелинейном виде производили на ЭВМ методом Эйлера [5, 6]. Для реализации метода Эйлера система дифференциальных уравнений

$$\frac{dY(t)}{dt} = F(t, Y)$$

представлялась следующим образом:

$$\frac{Y_{n+1} - Y_n}{\tau} - F(t_n, Y_n) = 0,$$

где  $n$  — номер шага решения;  $t$  — шаг по времени;  $Y$  — вектор решений системы;  $F$  — функция времени текущего состояния объекта исследования.

В соответствии с этим система уравнений (2) при переходе к конечно-разностным уравнениям без

учета изменения шага интегрирования по времени имеет следующий вид:

$$\begin{cases} i_n^n = f(p_n^{n-1}, U_n); \\ i_n^{n+1} = i_n^n + \frac{U_n - R_y i_n^n}{L_k} \tau; \\ l_n^{n+1} = l_n^n + \tau y; \\ y^{n+1} = y + \left[ \frac{c_3}{m_n} i_n^n - \frac{c_n}{m_n} I_n^n - \frac{c_k}{m_n} y^n \right] \tau; \\ S_d^n = C_n I_n^n; \\ p_n^{n+1} = p_n^n + \frac{S_d^{n+1} p_A^{n-Z} S_d (p_n^n - p_k^n)}{V_n} \tau; \\ p_k^{n+1} = p_k^n + \frac{S_d (p_n^{n+1} - p_k^n) - \frac{S_b S_p}{S_b + S_p} (p_k^n - p_m)}{V_k} \tau; \end{cases}$$

где  $y = \frac{dl_n}{dt}$ ;  $Z$  — запаздывание в количестве шагов  $t$  по времени. Верхние индексы при переменных указывают номер шага по времени.

В программе предусмотрена возможность изменения коэффициентов системы уравнений в процессе выполнения программ, а также модифицирование нелинейностей, входящих в эти уравнения, путем изменения соответствующих подпрограмм-функций.

При установлении пропускной способности дозирующей пары натекаателя  $S_d$ , условно разделенной нами на три характерных участка, применяли приближенные методы расчета, поскольку при ламинарном течении газов в формулы расчета пропускной способности каждого из участков вакуум-провода входит среднее значение давления газа на этом участке, которое в свою очередь зависит от его пропускной способности.

Для определения давления газа на выделенных участках вакуум-провода, образованного дозирующей парой натекаателя, разделяли их на большое количество приращений давления  $dp$ . Значения  $dp$  зависят от разности давлений на входе и выходе вакуум-провода и количества приращений  $dp$ . Чем больше количество приращений, тем точнее полученный результат, однако при этом возрастает количество вычислений и время, необходимое для расчета. В нашем случае ограничились количеством приращений  $kd = 50$ . Исходя из того, что рассчитываемый вакуум-провод условно разделен нами на три характерных участка, среднее давление на каждом из них определялось как

$$\bar{p}_1 = \frac{p_1 + p_2}{2}; \quad \bar{p}_2 = \frac{p_2 + p_3}{2}; \quad \bar{p}_3 = \frac{p_3 + p_4}{2},$$

где  $p_1 = p_{вх}$ , и  $p_4 = p_{вых}$  — уровни давления газа соответственно на входе и выходе натекаателя, значения которых известны;  $p_2, p_3$  — давления газа на границе условного раздела участков вакуум-провода, значения которых неизвестны. Определение значений давления  $p_2$  и  $p_3$  производилось в каждом цикле:  $p_2 = p_1 - s dp$ , где  $s$  — счетчик цикла и для первой итерации  $s = 1$ ;  $p_3 = p_1 - z dp$ , где  $z$  — также



счетчик цикла,  $z = s + 1$ . За действительные принимали такие значения давления, с которыми выполняется условие непрерывности потока с наибольшей достоверностью. Для этого в программе вычисляли некую величину  $ek$ , характеризующую ошибку вычисления истинных значений давления и проводимости. Математически это выглядит следующим образом:

$$ek = ((p_1 - p_2)S_{д1} - (p_2 - p_3)S_{д2})^2 + (p_2 - p_3)S_{д2} - (p_3 - p_4)S_{д3})^2.$$

В данном выражении вычисляется разница потоков в первом и втором, а также во втором и третьем вакуум-проводах. За действительные принимают такие значения, для которых  $ek$  является наименьшим. Разницы потоков возводили в квадрат во избежание такой ситуации, при которой возможно появление больших отрицательных значений  $ek$  и, соответственно, значительное увеличение ошибки вычислений.

Разработанная программа позволяет результат решения системы уравнений выводить на экран компьютера в виде графика переходной характеристики и допускает наложение вариантов решения в заданной системе координат. Графики или их серии заносятся в память в виде отдельных файлов, что позволяет сопоставлять на экране компьютера варианты решений при оптимизации параметров системы автоматического управления током пушки.

**Анализ процесса автоматического управления током пушки на ЭВМ.** Цель моделирования заключалась в исследовании влияния параметров элементов и звеньев канала управления на переходные характеристики процесса управления током ГРЭП и выборе значений коэффициентов уравнений движения системы и параметров настройки электронного регулятора, обеспечивающих требуемые характеристики управления.

Выбор значений коэффициентов уравнений движения производили для условий работы системы автоматического управления током с ГРЭП мощностью до 7 кВт, установленной на промышленной вакуумной установке для напыления тонких пленок УРМ027. Значения задаваемых коэффициентов определяли из паспортных данных на оборудование, а неизвестных — расчетным путем.

Расчет коэффициентов производили следующим образом. Из семейства вольт-амперных характеристик пушки  $I_{п} = f(U_{п}, p_{п})$  выбирали требуемый режим работы пушки  $I_{п} = 0,4$  А,  $U_{п} = 10$  кВ, определяли давление в пушке для данного режима работы  $p_{п} = 1,3$  Па. Постоянные коэффициенты  $a$  и  $m$  из зависимости (1) для данного режима работы пушки вычисляли методом наименьших квадратов. Затем определяли режимы течения газа через лучепровод пушки и вакуум-провод, соединяющий вакуумную камеру с вакуумным насосом, а также значения проводимостей  $S_{д}$  и  $S_{в}$ . Для заданной конструкции до-

зирующего узла натекателя установили проводимость натекателя  $S_{д}$ .

Начальные значения постоянных коэффициентов  $R_{п}$ ,  $L_{к}$ ,  $m_{п}$ ,  $C_{э}$ ,  $C_{п}$ ,  $C_{к}$ , характеризующих динамику натекателя, определяли по формулам для расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов, приведенных в работах [7] и др., а затем в процессе моделирования корректировали для получения желаемой формы переходной характеристики управления.

Выбранный аналоговый режим работы натекателя обеспечивали согласованием крутизны тяговой характеристики электромагнита и жесткости пружины на рабочем участке натекателя.

Влияние параметров элементов и звеньев системы на характеристики управления определяли по реакции системы на ступенчатое входное воздействие при различных значениях коэффициентов уравнений. Исследования проводили при замкнутом контуре регулирования с ПИД-регулятором.

На рис. 3 приведены переходные характеристики процесса автоматического управления током пушки в моменты ее включения при различных значениях параметров натекателя.

Путем уменьшения индуктивности катушки  $L_{к}$ , массы якоря электромагнита  $m_{п}$  (рис. 3, а, б), увеличения жесткости пружины  $C_{п}$  и крутизны его тяговой характеристики  $C_{э}$  повышали скорость реакции системы управления на возмущающее воздействие. При разработке механической части натекателя очень важно правильно подобрать соотношение параметров  $m_{п}$ ,  $C_{э}$ ,  $C_{п}$ ,  $C_{к}$ . Увеличение массы якоря до некоторого значения переводит электромагнит в режим автоколебаний (рис. 3, б), т. е. в данном случае масса подвижной части натекателя  $m_{п}$  является раскачивающим фактором, а коэффициент силы трения  $C_{к}$  — полезным демпфирующим фактором, успокаивающим колебания.

Установлено также, что с уменьшением объема разрядной камеры пушки  $V_{п}$  и увеличением газовой проводимости лучепровода  $S_{д}$  (рис. 3, в), уменьшается постоянная времени напуска и откачки газа из пушки, что улучшает динамические характеристики регулирования. Однако с увеличением проводимости  $S_{д}$  увеличивается расход рабочего газа в пушке и повышается давление в вакуумной камере электронно-лучевой установки  $p_{к}$  при заданном режиме работы пушки. Уменьшение проводимости вакуумпровода между вакуумной камерой и вакуумным насосом оказывает демпфирующее действие на процесс регулирования, однако при этом уменьшается быстрота откачки вакуумной камеры установки. Резкое ухудшение устойчивости системы и качества регулирования вызывает увеличение времени запаздывания  $\tau_3$  в канале напуска газа, соединяющем натекатель с пушкой (рис. 3, г). Влияние запаздывания на качество регулирования увеличивается с уменьшением объема  $V_{п}$  и проводимости  $S_{д}$ .

В результате проведенного моделирования на ПЭВМ установлено, что в случае применения ма-

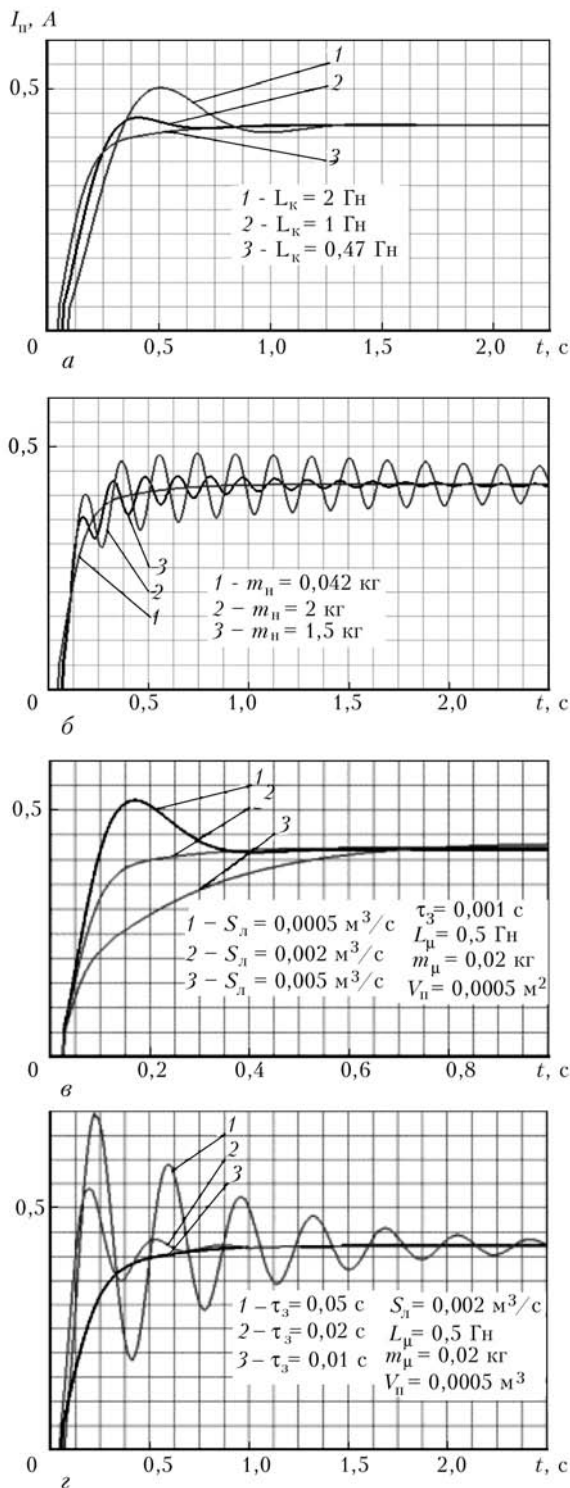


Рис. 3. Расчетные переходные характеристики, иллюстрирующие влияние параметров газодинамической системы пушки на переходные характеристики регулирования: *a* — индуктивность катушки электромагнита натекаателя  $L_k$ ; *б* — масса якоря электромагнита натекаателя  $m_n$ ; *в* — газовая проводимость лучепровода  $S_n$ ; *г* — время запаздывания  $\tau_3$  в канале напуска газа

лоинерционного электромагнитного натекаателя характеристики процесса управления током ГРЭП определяются газодинамическими характеристиками пушки, систем откачки и напуска газа. При этом минимальное время регулирования может составлять десятки и сотни миллисекунд.

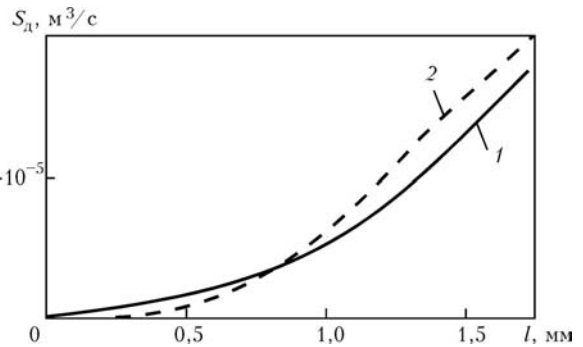


Рис. 4. Зависимость пропускной способности дозирующего узла натекаателя от хода штока: 1 — расчет; 2 — эксперимент

**Экспериментальное исследование системы автоматического управления током пушки.** По результатам исследований разработана система автоматического управления током напылительной ГРЭП с малоинерционным электромагнитным натекаателем. Проведено экспериментальное исследование характеристик натекаателя и переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной пушки в реальных условиях, что позволило произвести верификацию результатов моделирования с полученными экспериментальными данными.

Установлено, что графики зависимости пропускной способности натекаателя от положения штока дозирующей пары, полученные экспериментально и расчетным путем (рис. 4), не имеют существенно нелинейных участков. Незначительное расхождение кривых объясняется погрешностями определения давления газа на участках газового канала дозирующей пары натекаателя и эмпирических значений коэффициента  $k$ , зависящего от соотношения характерных геометрических размеров вакуум-провода, а также влиянием упругой деформации уплотнителя из фторопласта, не учтенной при составлении математической модели и заметно сказывающейся на начальном участке кривых. Кроме того, в разработанном натекаателе основные статические параметры практически не зависят от изменения его температуры, что позволяет эффективно использовать натекаатель в качестве исполнительного устройства в системах управления током ГРЭП в автоматическом и ручном режимах работы.

На рис. 5 приведены экспериментальные переходные характеристики процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП в моменты ее включения при различных значениях пропускной способности лучепровода пушки, через который производится ее откачка. В случае оптимизации параметров натекаателя для работы с напылительной пушкой, проводимость лучепровода в которой составляла  $0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ , время выхода пушки на номинальный режим достигало примерно 300 мс при аperiodическом характере переходного процесса. При уменьшении пропускной способности лучепровода до  $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$ , что обеспечивает более эффективную развязку пушки и технологической камеры по давлению, переходная характеристика процесса управления током пушки имела колебательный харак-

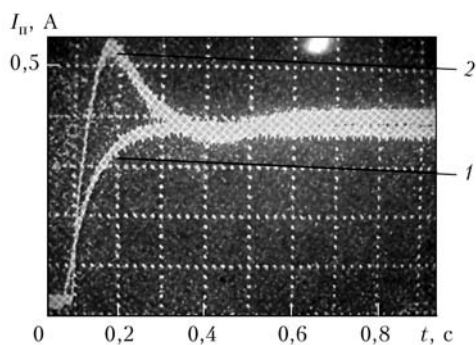


Рис. 5. Осциллограммы переходных характеристик процесса автоматического управления током напылительной ГРЭП при  $S_{д.}$ , м<sup>3</sup>/с: 1 — 0,002; 2 — 0,005

тер с затуханием. При этом перерегулирование равнялось не более 25 %, а время регулирования — около 500 мс. Увеличение аperiodичности переходной характеристики в этом случае при неизменных других параметрах достигалось экспериментально путем выбора оптимальных значений интегральной и дифференциальной составляющих передаточной характеристики электронного регулятора. При этом уменьшить время выхода пушки на рабочий режим не удавалось. Необходимая аperiodичность переходной характеристики процесса управления током пушки и малое время регулирования достигались при выборе расчетным путем с последующей экспериментальной доводкой оптимальных значений параметров натекателя и газодинамических характеристик пушки и системы откачки.

Сравнение экспериментальных переходных характеристик с расчетными (рис. 3, в, рис. 5) показали, что их отличие по уровню перерегулирования и времени выхода на рабочий режим составляет 15... 20 %, что объясняется влиянием погрешностей при определении газодинамических характеристик системы откачки и напуска газов, параметров электромагнитного натекателя и др.

## Выводы

1. Показано, что предложенная математическая модель процесса газодинамического управления током пушки и реализация ее решения на ПЭВМ позволяют применять компьютерное моделирование при проектировании систем автоматического управления током ГРЭП с холодным катодом, а также других газоразрядных источников заряженных частиц, работающих в условиях непрерывной откачки газа.

2. Установлено, что переходные характеристики, полученные расчетным путем и экспериментально, хорошо коррелируются и это подтверждает корректность данной модели процесса автоматического управления током ГРЭП газодинамическим способом.

3. Определено, что минимальное время регулирования тока газоразрядных пушек путем изменения давления в разрядном промежутке, ограниченное инерционностью газодинамических процессов в пушке, системах откачки и напуска газов, для реальных систем может составлять десятки и сотни миллисекунд, что позволяет эффективно управлять током пушек, а также осуществлять программное управление мощностью электронного пучка во времени в соответствии с требованиями конкретного технологического процесса.

4. С применением компьютерного моделирования разработаны малоинерционные электромагнитные натекатели и системы автоматического управления током разряда путем изменением давления, обеспечивающие эффективную работу ГРЭП различного назначения в условиях проводимых технологических процессов. При этом минимальное время регулирования тока зависит от газодинамических характеристик пушки и вакуумной установки и составляет сотни миллисекунд, а погрешность регулирования не превышает 2...3 %.

1. Денбовецкий С. В., Мельник В. И., Новиков А. А. Технологические возможности источников электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой // Междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям (Варна, Болгария, 1985). — Варна, 1985. — С. 169–164.
2. Плазменные процессы в технологических пушках / М. А. Завьялов, Ю. Е. Крейндель, А. А. Новиков, Л. П. Шантурин. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 250 с.
3. Моделирование процесса управления током газоразрядной электронной пушки / С. В. Денбовецкий, А. И. Кубрак, В. И. Мельник, Б. А. Тугай // Электроника и связь. — 1997. — Вып. № 2, ч. II. — С. 266–270.
4. Вакуумная техника: Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова и др. — М.: Машиностроение, 1985. — 360 с.
5. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. — М.: Машиностроение, 1978. — 4-е изд. — 736 с.
6. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. Учеб. пособие для вузов. — М.: Наука, 1989. — 43 с.
7. Электромеханические аппараты автоматики / Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа. — М.: Высш. шк., 1988. — 303 с.

Нац. техн. ун-т «Киевский политехнический институт»

Поступила 07.02.2008