

**ВОПРОСЫ СТАТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ,  
СОДЕРЖАЩЕЙ ИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ,  
РАБОТАЮЩИЙ НА ЕМКОСТЬ**

В. А. КОЧЕГУРОВ, А. А. ТЕРЕЩЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В большинстве установок, предназначенных для получения импульсных магнитных полей высокой напряженности, источником тока служат батареи электрических конденсаторов, заряжаемые от выпрямителей. Так как сопротивление нагрузки конденсаторов в переходном режиме (при зарядке) меняется в пределах от нуля до бесконечности, то для ограничения тока заряда обычно применяются балластные сопротивления. Однако это приводит к снижению к. п. д. установки. Экономичность процесса заряда, долговечность силового оборудования импульсного генератора тока возрастают, если ограничение тока заряда осуществлять соответствующим изменением угла управления выпрямителем в процессе заряда путем введения обратных связей с таким расчетом, чтобы ток заряда оставался постоянным. С точки зрения эксперимента в большинстве случаев предъявляются также требования и к стабильности предзарядного напряжения на емкостном накопителе. Решение вопроса создания наиболее совершенной системы автоматического регулирования тока заряда со стабилизацией предзарядного напряжения на емкостном накопителе связано с определенными трудностями. Прежде всего необходимо определить параметры системы, управление по которым обеспечит минимальную статическую ошибку регулирования при заданной чувствительности измерительных устройств. Кроме того, при заданной точности регулирования необходимо установить соответствующую структуру и коэффициенты передачи регулятора. Структурная схема импульсного генератора тока в общем случае может быть представлена в виде последовательно включенных элементов: системы сеточного управления, шестифазного выпрямителя, емкостного накопителя энергии и формирующего устройства (рис. 1). Рассматриваемая система является нелинейной, поэтому аналитическое выражение для определения статической точности регулирования в общем случае может быть получено при допущении, что действующие в системе возмущения невелики и изменения регулируемых величин протекают в ограниченном диапазоне.

Возмущениями, вызывающими отклонение тока и напряжения на конденсаторах от заданного значения, являются колебания напряжения питающей сети, напряжения управления, изменения остаточного напряжения на конденсаторах в процессе работы и другие дестабилизирующие факторы. Исходные уравнения электрического равновесия, определяющие работу системы, имеют вид:

$$i_c Z + u_c(t) + 2E_b = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_m \sin v$$

$$v = (f u_{упр})$$

$$u_{упр} = f [i_c, u_c(t), E_m, v, t];$$

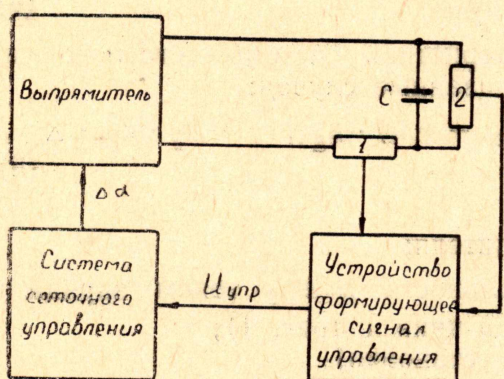


Рис. 1.

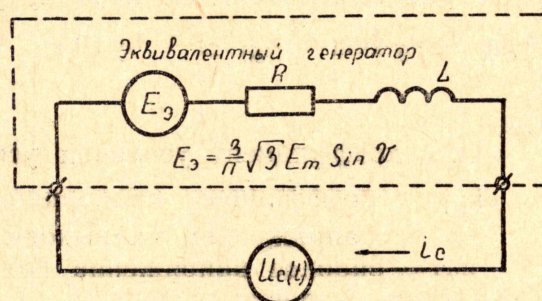


Рис. 2.

Запишем эти уравнения в приращениях, что позволяет линеаризовать отдельные зависимости. Уравнение статики схемы замещения преобразователя (рис. 2) запишется

$$i_{co} Z + \Delta i_c Z + u_{co} + \frac{i_{co} \Delta t}{C} + \frac{\Delta i_c \Delta t}{C} + 2E_b =$$

$$= \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{3} (E_{mo} + \Delta E_m) \sin (v_o + \Delta v),$$

где

$$i_c = i_{co} + \Delta i_c;$$

$$u_c = u_{co} + \Delta u_c(t) = u_{co} + \frac{i_{co} \Delta t}{C} = u_{co} + \frac{i_{co} \cdot \Delta t}{C} + \frac{\Delta i_c \cdot \Delta t}{C};$$

$\Delta i_c$  — приращение тока в цепи заряда;

$\Delta u_c(t)$  — приращение напряжения на емкостном накопителе;

$\Delta E_m$  — приращение напряжения питающей сети;

$\Delta v$  — приращение угла зажигания ионного преобразователя;

$Z$  — комплексное сопротивление, учитывающее все активные и индуктивные сопротивления схемы замещения.

Преобразуем уравнение (2) и разрешим относительно тока приращения:

$$i_c Z + \Delta i_c Z + u_{co} + \frac{i_{co} \Delta t}{C} + \frac{\Delta i_c \Delta t}{C} + 2E_b = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} (E_{mo} + \Delta E_m) \cdot$$

$$\cdot (\sin v_o \cdot \cos \Delta v + \cos v_o \sin \Delta v).$$

При малых

$$\Delta v; \cos \Delta v = 1; \sin \Delta v = \Delta v;$$

$$\Delta i_c = \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{mo} \sin v_o \left[ \left( 1 + \frac{\Delta E_m}{E_{mo}} \right) \operatorname{Ctg} v_o \Delta v + \frac{\Delta E_m}{E_{mo}} \right] - \frac{i_{co} \Delta t}{C}}{Z + \frac{\Delta t}{C}}.$$

Из уравнения (3) видно, что регулирование должно быть программным, поскольку  $\Delta i_c$  является функцией не только  $\Delta E_m$  и  $\Delta v$ , но также

и времени. Рассмотрим статическую точность регулирования тока для трех случаев: управление ионным преобразователем осуществляется только по току заряда, напряжению на ёмкости или совместно по току и напряжению. Уравнение устройства сеточного регулирования, которое для всех трех случаев будет одинаковым, запишется

$$\Delta v = f(u_{упр}) = k_1 u_{упр}, \quad (4)$$

где  $k_1$  — определяет крутизну характеристики системы сеточного управления. Рассмотрим по порядку указанные случаи:

$$u_{упр} = k_y (u_{oi} - k_{gi} i_c) = k_y [u_{oi} - (i_{co} + \Delta i_c) \cdot k_{gi}] = -k_y \cdot k_{gi} \cdot \Delta i_c, \quad (5)$$

где

$k_y$  — коэффициент усиления усилителя;

$k_{gi}$  — коэффициент пропорциональности между током заряда и напряжением на выходе датчика 1 (рис. 1);

$u_{oi}$  — опорное напряжение (ток установки).

Совместное решение уравнений (3, 4 и 5) дает статическую точность регулирования тока для первого случая

$$\Delta i_c = \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} \sin v_o \Delta E_m - \frac{i_{co} \Delta t}{C}}{Z + \frac{\Delta t}{C} + \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{mo} \cos v_o \left( 1 + \frac{\Delta E_m}{E_{mo}} \right) k_1 k_y k_{gi}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что статическая точность регулирования тока зависит от времени  $\Delta t$ , а равно и от изменения напряжения на конденсаторах  $u_c(t) = \frac{i_{co} \Delta t}{C}$ . С увеличением последних статическая ошибка увеличивается.

Поскольку в выражении (6) величина статической ошибки является линейной функцией времени, то сигнал управления может быть представлен в виде

$$u_{упр} = k_t \Delta t \quad (7)$$

Разрешив совместно уравнения (7, 4 и 3), получим

$$\Delta i_c = \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} \sin v_o \Delta E_m + \Delta t \left[ \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{mo} \cos v_o \left( 1 + \frac{\Delta E_m}{E_{mo}} \right) k_1 k_y k_t - \frac{i_{co}}{C} \right]}{Z + \frac{\Delta t}{C}}. \quad (8)$$

Если

$$\frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{mo} \cdot \cos v_o \left( 1 + \frac{\Delta E_m}{E_{mo}} \right) k_1 k_y k_t - \frac{i_{co}}{C} = 0, \quad (9)$$

то

$$\Delta i_c = \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} \sin v_o \Delta E_m}{Z + \frac{\Delta t}{C}}, \quad (10)$$

т. е. введение в закон регулирования линейной функции времени уменьшает статическую ошибку пропорционально времени  $\Delta t$ .

$$u_{упр} = -k_{gi} \Delta i_c + k_t \Delta t. \quad (11)$$

Разрешив уравнения (11, 4 и 3) относительно приращения тока, получим

$$\begin{aligned} \Delta i_c = & \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} \sin v_0 \Delta E_m}{Z + \frac{\Delta t}{C} + \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right) k_1 k_y k_{gi}} + \\ & + \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right) k_1 k_y k_{gi} - \frac{i_{c0}}{C}}{Z + \frac{\Delta t}{C} + \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right) k_1 k_y k_{gi}} \end{aligned} \quad (12)$$

При выполнении условия

$$\frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right) k_1 k_y k_t = \frac{i}{C} \quad (13)$$

$$\Delta i_c = \frac{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} \sin v_0 \Delta E_m}{Z + \frac{\Delta t}{C} + \frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right) k_1 k_y k_{gi}} \quad (14)$$

Коэффициенты могут быть определены из условия (13)

$$k_1 k_y k_t = \frac{i_{c0}}{\frac{3}{\pi} \sqrt{3} E_{m0} \cos v_0 \left(1 + \frac{\Delta E_m}{E_{m0}}\right)} \quad (15)$$

Из выражения (14) следует, что при выполнении условия (13) статическая точность регулирования повышается пропорционально времени  $\Delta t$ . Поскольку  $u_c(t)$  изменяется пропорционально времени (при условии  $i_c = \text{const}$ ), то связь  $\Delta t$  с  $u_c(t)$  может быть выражена

$$\Delta t = \frac{t_3}{\Delta u_{cм0}} \cdot \Delta u_c(t) \quad (16)$$

Уравнение (11) с учетом (16) запишется

$$u_{упр} = -k_{gi} \Delta i_c + \frac{k_t t_3}{\Delta u_{cм0}} \Delta u_c(t) \quad (17)$$

Таким образом, анализ уравнений (6, 8, 12) показывает, что для обеспечения максимальной статической точности регулирования при заданной чувствительности измерительных устройств управлять ионным преобразователем необходимо по току заряда и напряжению на емкостном накопителе. При этом коэффициенты передачи цепи обратной связи системы регулирования определяются из выражения (15).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Гуткин. Ионный привод постоянного тока. Энергия, 1965.