

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ В БЕТАТРОНЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ МНОГОСВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В. М. РАЗИН

(Представлена научным семинаром кафедры вычислительной техники)

В [1, 2] рассмотрены разработанные нами системы стабилизации импульсного напряжения инжекции и тока эмиссии катода инжектора или средней величины тока электронов на проводящий слой вакуумной камеры бетатрона. Как уже отмечено, эти две системы образуют единую систему в данном случае двухсвязного регулирования, так как напряжение инжекции влияет на ток эмиссии, а ток эмиссии, являясь нагрузкой для импульсного напряжения инжекции, влияет в свою очередь на амплитуду этого напряжения. Увеличение тока инжектора приводит к соответствующему уменьшению амплитуды импульсного напряжения на инжекторе. Далее, как видно из схем в [1, 2], обе системы стабилизации находятся под действием внешнего возмущения в виде случайных изменений напряжения сети. Анализ физических процессов в этих схемах приводит, если соответствующие нелинейные зависимости подвергнуть линеаризации, к общей схеме, представленной на рис. 1.

На этой схеме цифрой 1 обозначен элемент управления величиной тока эмиссии, блок 3 отображает динамические свойства фильтра на входе измерительного элемента 1, блок 4 соответствует магнитному усилителю, блок 5 учитывает тепловую инерционность катода инжектора, блок 6 с соответствующим весом воспроизводит внешнее возмущение U_c . Элемент управления напряжением инжекции обозначен цифрой 2, динамические свойства цепей фильтрации и усиления здесь изображены блоками 7 и 8, динамические свойства магнитного усилителя соответствуют блоку 9, действие внешнего возмущения U_c с весовым коэффициентом K_8 представлено блоком 10. Влияние напряжения инжекции U на ток эмиссии I_e в линейном приближении представлено соотношением

$$I_e = I_{e0} + K_{10} \Delta U_i + K' \Delta T, \quad (1)$$

где

I_{e0} — начальное значение тока эмиссии;

ΔU_i — приращение напряжения инжекции;

ΔT — приращение температуры катода;

K_{10} и K' — постоянные коэффициенты.

Уравнение (1) моделируется суммирующим звеном 11 и блоком 13.

Обратное влияние тока эмиссии инжектора на напряжение инжекции представим в виде уравнения

$$U_i = U_{i0} + K'' \Delta U - K_9 \Delta I_e, \quad (2)$$

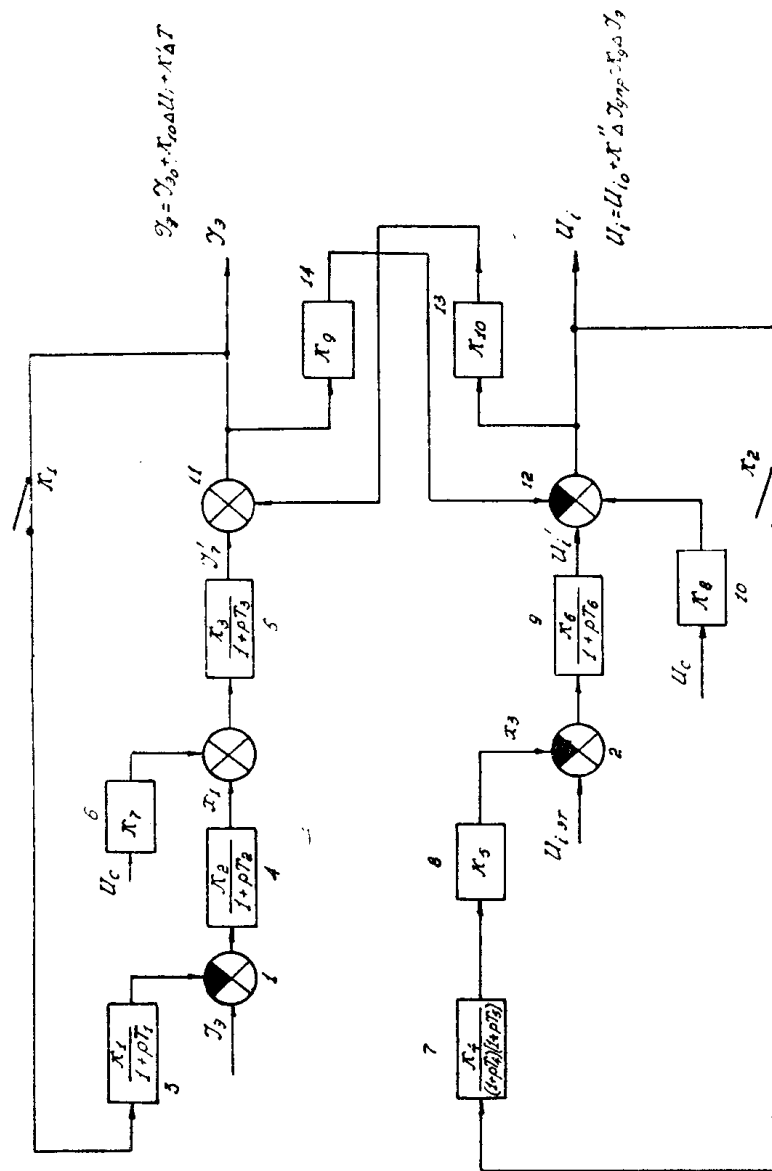


Рис. 1. Схема двухсвязного регулирования системы инжекции электронов.

где U_{i0} — начальное значение напряжения инъекции;
 ΔI_3 — приращение тока эмиссии;
 ΔU — приращение напряжения на выходе магнитного усилителя;
 K'' и K_9 — постоянные коэффициенты.

Уравнение (2) моделируется блоком 14 и суммирующим звеном 12.

Для целей анализа свойств схемы на рис. 1 и оптимизации ее параметров используем теорию систем многосвязного регулирования [3].

Применяя широко известные методы составления уравнений динамики систем автоматического управления и регулирования в операторной форме [3] с учетом обозначений схемы рис. 1, получим:

$$\begin{aligned} I_3(p) \left[\prod_{i=1}^3 K_i + \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \right] - U_i(p) K_{10} \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) = \\ = K_2 K_3 (1 + pT_1) I_{3T}(p) + (1 + pT_1)(1 + pT_2) K_3 K_7 U_c(p), \quad (3) \\ U_i(p) \left[\prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) \right] + I_3(p) K_9 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) = \\ = K_6 (1 + pT_4)(1 + pT_5) U_{i3T}(p) + K_8 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) U_c(p). \end{aligned}$$

Используя обозначения, принятые в работе [3], запишем систему уравнений (3) в матричной форме

$$AY = K_{05} Y_{3T} + DF, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} A = \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^3 K_i + \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i), & -K_{10} \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \\ K_9 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i), & \prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) \end{bmatrix} \quad (5) \\ Y = \begin{bmatrix} I_3(p) \\ U_i(p) \end{bmatrix}; \quad K_{05} Y_{3T} = \begin{bmatrix} K_2 K_3 (1 + pT_1) I_{3T}(p) \\ K_6 (1 + pT_4)(1 + pT_5) U_{i3T}(p) \end{bmatrix}; \\ DF = \begin{bmatrix} (1 + pT_1)(1 + pT_2) K_3 K_7 U_c(p) \\ K_8 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) U_c(p) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Система уравнений относительно регулируемых величин в матричной форме имеет вид

$$Y = A^{-1} [K_{05} Y_{3T} + DF], \quad (6)$$

где вычисленная известными методами [4] обратная (инверсная) по отношению к матрице A матрица

$$A^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i), & K_{10} \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \\ K_9 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i), & \prod_{i=1}^3 K_i + \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \end{bmatrix}$$

Здесь определитель системы уравнений (3)

$$\Delta = \begin{vmatrix} \prod_{i=1}^3 K_i + \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i), & K_{10} \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \\ K_9 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i), & \prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) \end{vmatrix}.$$

Подставляя (8) в (7), а (7) в (6) с учетом обозначений для $\dot{Y}$, $K_{об}$, $\dot{Y}_{эт}$ и DF , получаем уравнения относительно регулируемых величин в виде

$$I_3(p) = \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) \right] [K_2 K_3 (1 + pT_1) I_{эт}(p) + \right. \\ \left. + (1 + pT_1)(1 + pT_2) K_3 K_7 U_c(p) + K_{10} \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \left[K_6 (1 + pT_4)(1 + \right. \right. \\ \left. \left. + pT_5) U_{iэт}(p) + K_8 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) U_c(p) \right] \right\}, \quad (9)$$

$$U_i(p) = \frac{1}{\Delta} \left\{ K_9 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) [K_2 K_3 (1 + pT_1) I_{эт}(p) + \right. \\ \left. + (1 + pT_1)(1 + pT_2) K_3 K_7 U_c(p) + \left[\prod_{i=1}^3 K_i + \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) \right] \left[K_6 (1 + pT_4)(1 + \right. \right. \\ \left. \left. + pT_5) U_{iэт}(p) + K_8 \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) U_c(p) \right] \right\}. \quad (10)$$

Характеристическое уравнение рассматриваемой двухсвязной системы регулирования будет

$$\Delta = \left[\prod_{i=4}^3 K_i + \prod_{i=4}^3 (1 + pT_i) \right] \left[\prod_{i=4}^6 K_i + \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) \right] + \\ + K_9 K_{10} \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) = \prod_{i=1}^6 K_i + \prod_{i=1}^3 K_i \prod_{i=4}^6 (1 + pT_i) + \\ + \prod_{i=4}^6 K_i \prod_{i=1}^3 (1 + pT_i) + (1 + K_9 K_{10}) \prod_{i=1}^6 (1 + pT_i). \quad (11)$$

Полученные соотношения позволяют: 1) в установившемся режиме найти обобщенную матрицу коэффициентов ошибок и минимизировать их величину; 2) исследовать систему на устойчивость и оценить качество процесса регулирования; 3) определить основные свойства систем автоматического регулирования из кривой D — разбиения и решить целый ряд других важных в практическом отношении задач.

Приведенные выше формулы получены в предположении непрерывности изменения всех величин. Фактически, в силу импульсного действия схемы инъекции, рассматриваемую систему двухсвязного регулирования следует считать импульсной, для чего необходимо в схеме рис. 1 предусмотреть импульсные элементы K_1 и K_2 , замыкающиеся синхронно с частотой, равной частоте питающей сети. Однако, учитывая, что постоянные времени инерционных элементов в данной системе регулирования

сказываются по величине значительно больше длительности периода замыкания импульсных элементов, к системе можно применить методы исследования, развитые применительно к системам непрерывного действия [5]. В этом случае входные фильтры следует рассматривать в первом приближении как запоминающие элементы нулевого порядка, т. е. полагать в полученных соотношениях $T_1 = T_4 = 0$. Что касается возмущающего воздействия напряжения сети $U_c(p)$, то Лапласово изображение этой величины следует составлять по отношению к огибающей амплитуде переменного напряжения.

Проведенные [1] теоретические исследования и сопоставление их с экспериментальными результатами показали наличие расхождений до 30—50% по таким параметрам, как: общий коэффициент усиления, время протекания переходного процесса, величина перерегулирования и т. п., что объясняется наличием существенных нелинейностей в рассматриваемой системе. На основании изложенного следует сделать вывод, что полученные соотношения можно использовать и получить при этом полезные практические результаты, однако необходимо при этом проявлять известную осторожность, так как вследствие наличия существенных нелинейностей в системе всегда имеется опасность получения качественно неверных результатов. В заключение отметим, что выполненный нами анализ системы инъекции бетатрона имеет и самостоятельное значение, так как подобного рода системы находят применение во многих типах ускорителей заряженных частиц и находят также самостоятельное применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Разин. Изв. ТПИ, т. 87, стр. 201, 1957.
 2. В. М. Разин. Изв. ТПИ, т. 87, стр. 216, 1957.
 3. М. В. Мееров. Системы многосвязного регулирования. М., «Наука», 1965.
 4. Ф. Р. Гантмахер. Теория матриц. М., «Наука», 1966.
 5. А. А. Красовский, Г. С. Поспелов. Основы автоматки и технической кибернетики. ГЭИ, М.—Л., 1962.
-