

## ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ В ТОКАМАКЕ

А.М. Ли, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [alee@tpu.ru](mailto:alee@tpu.ru)

Экспериментальные установки типа токамак [1] являются импульсными установками, порядок работы которых определяется так называемым сценарием разряда. Сценарий разряда определяет программные траектории изменения напряжений и токов в обмотках, которые обеспечивают желаемую эволюцию электромагнитного поля в токамаке, а следовательно, желаемую эволюцию равновесия плазмы, таким образом, сценарий определяет программное магнитное управление на всех стадиях [2, 3] разряда.

На основной стадии разряда – плато тока, совместно с программным управлением действует замкнутая система магнитного управления плазмой, предназначенная для стабилизации тока, положения и формы плазмы [4]. Для синтеза замкнутых систем магнитного управления плазмой в токамаке широко используют линейные модели поведения плазмы в токамаке, полученные путем линеаризации исходной нелинейной модели. Синтез линейных моделей производится с использованием уравнения МГД равновесия (уравнение Грэда-Шафранова) плазмы в токамаке. Равновесие плазмы можно описать, задав значения тороидального тока плазмы  $I_{pl}$ , полоидальной беты  $\beta_{pol}$  и внутренней индуктивности  $l_i$  [1]. Решение уравнения равновесия в каждый момент времени описывает временную эволюцию электромагнитного поля в токамаке и границы плазмы:

$$\begin{aligned} L\dot{I} + RI + \Psi_{pl}'(I, I_{pl}, \omega) &= U, \\ y &= h(I, I_{pl}, \omega). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Psi_{pl}$  – вектор потокосцеплений между плазмой и обмотками,  $I$  и  $U$  – вектор токов и напряжений,  $L$  и  $R$  – матрица индуктивностей и сопротивлений,  $\omega = (\beta_{pol} \quad l_i)^T$  – вектор возмущений;  $y$  – вектор зазоров – расстояний между границей плазмы и лимитером в заданных точках.

Линеаризация (1) производится стандартным методом, путем разложения в ряд Тейлора около точки номинального равновесия  $(I_0, U_0, I_{pl,0}, y_0, \omega_0)$ , задавая приращения  $\delta I, \delta U, \delta I_{pl}, \delta y, \delta \omega$ :

$$\begin{aligned} L^* \delta \dot{x} + R \delta x + B \delta \dot{\omega} &= C \delta u, \\ \delta y &= D \delta x + F \delta \omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x = (I \quad I_{pl})^T$ , структуру матриц  $L^*, B, C, D$  и  $F$  см. в [2].

Линейная модель (2) будет использована для синтеза регуляторов магнитного управления током, положением и формой плазмы токамака КТМ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wesson J. Tokamaks. – Oxford: Clarendon Press, 2004. – 749 p.
2. Ariola M., Pironti A. Magnetic control of tokamak plasmas. – Springer, 2008. – P. 162
3. Albanese R., Ambrosino G., Martone R., Pironti A. PF Coil Voltage Optimization for Start-up Scenarios in Air Core Tokamaks // IEEE Trans. on Magnetics. – 1994. – V.30. – № 5. – P. 3423-3426.
4. Ambrosino G., Albanese R. Magnetic Control of Plasma Current, Position, and Shape in Tokamaks // IEEE Control Syst. Mag. – 2005. – V. 25. – № 5. – P. 76–92.