

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Курс «Системы автоматизации экспериментов на термоядерных установках»

**Методическое указание к лабораторной работе №1 (Занятие 1)**

Тема работы:

**Система управления тороидальным магнитным полем  
установки ТОКАМАК**

Томск – 2016

## Введение

Токамаки являются импульсными установками, режим и порядок работы которых определяется сценарием разряда. Термин сценарий [1, стр. 73] часто используется в физике плазмы [2]. Под сценарием обычно понимают заданную последовательность (ряд) рабочих точек для конкретного токамака и плазмы, через которые установка должна пройти во время разряда. В определение рабочих точек обычно включают эволюцию тока плазмы и ее формы, кроме того, могут быть включены и другие параметры, такие как бета, внутренняя индуктивность плазмы и др., а также, траектории движения исполнительных и регулирующих органов – токов в обмотках, систем доп. нагрева, газонапуска, неиндукционного поддержания тока плазмы и др.

Разряд плазмы в токамаке может быть разделен на несколько разных фаз (см. рисунок 1) [3–5]:

- *I – «Зарядка».* В обмотки TF вводится ток, который создает тороидальное магнитное поле в вакуумной камере токамака нужной величины, тороидальное поле должно быть стабилизировано в течение длительности всего эксперимента. Обмотки CS и PF «заряжаются» токами до своих желаемых предпробойных значений.
- *II – Пробой.* Формирование плазмы происходит за счет ионизации молекул водорода вихревым электрическим полем, индуцированным резким изменением токов в обмотках CS и (в меньшей степени) PF.
- *III – Подъем тока.* В течение данной фазы ток плазмы поднимается от нуля до своего желаемого постоянного значения. Обычно ток плазмы растет со временем по линейному закону. Вместе с током своих желаемых значений достигают другие величины, описывающие плазму.
- *IV – Плато.* В течение этой фазы, все величины, которые описывают плазму, должны быть стабилизированы около своих желаемых значений. Это наиболее важная и длительная фаза во всем разряде, к управлению плазмой в данной фазе ставят наиболее жесткие требования.

- V – *Гашение*. Ток плазмы и другие величины устремляют к нулю, происходит гашение плазмы и остановка токамака.

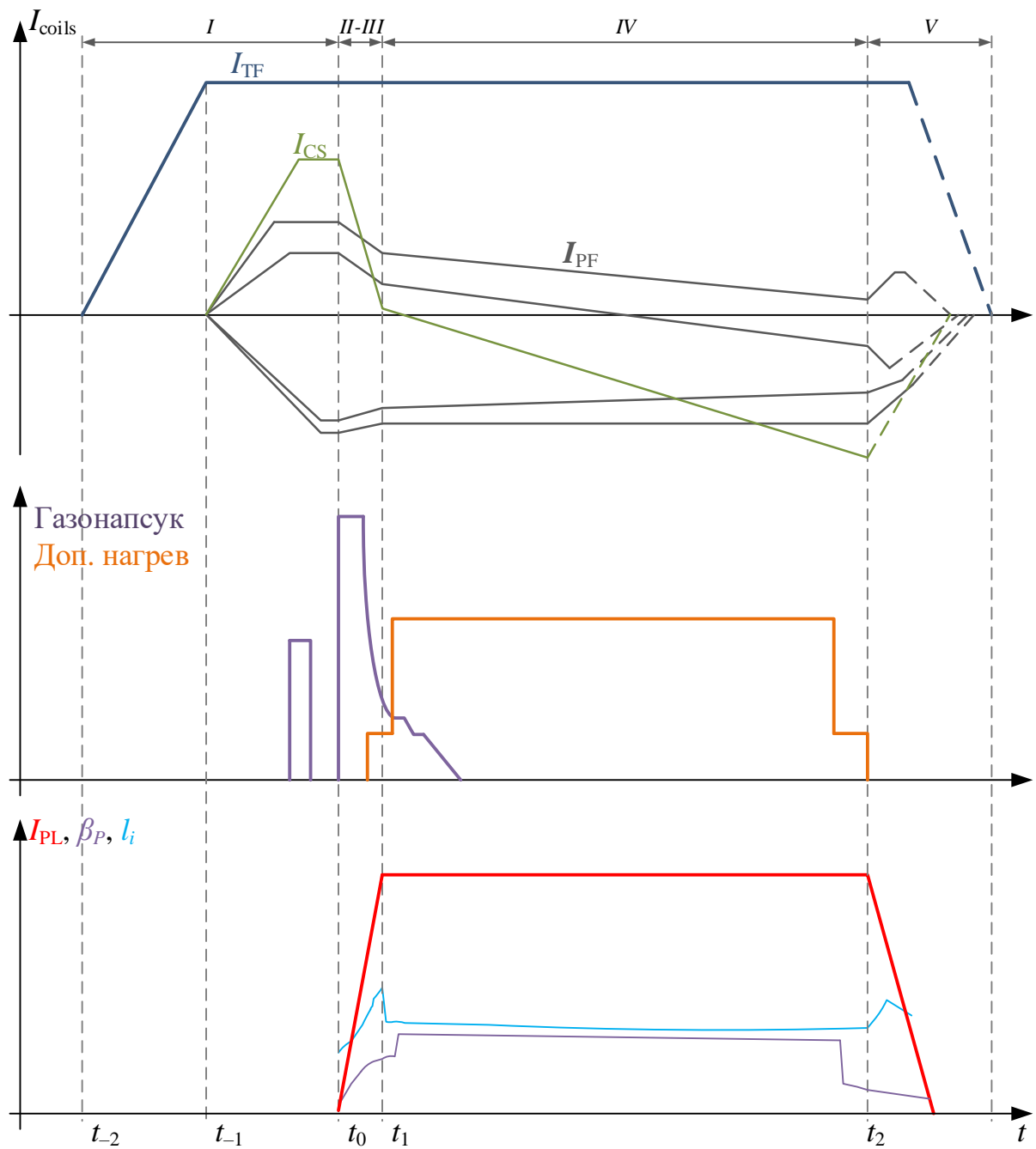


Рисунок 1 – Типовой сценарий разряда в токамаке

## 1 Теоретическая часть

Тороидальное магнитное поле в токамаке является основным удерживающим горячую плазму магнитным полем. Величина тороидального магнитного поля определяется электрическим током  $I_{TF}$ , протекающим в обмотках тороидального поля TF:

$$B_{\varphi}(r) \sim \frac{I_{TF}}{r},$$

стабилизация тока в обмотках TF должна обеспечить стабильное тороидальное магнитное поле нужной величины в течение всего эксперимента.

Обмотки TF питаются от регулируемого источника постоянного напряжения  $U_{ИП}$  (см. рисунок 2).

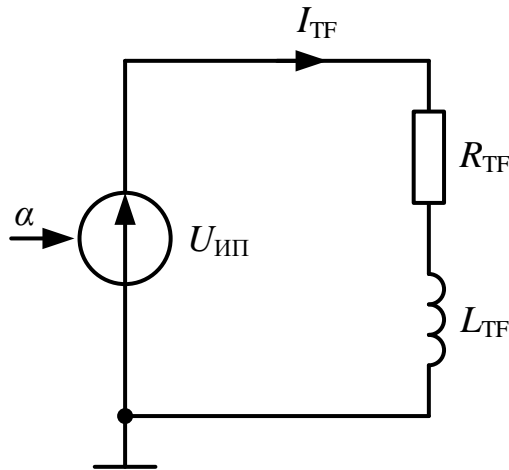


Рисунок 2 – Упрощенная схема электропитания обмоток TF

В качестве источника питания используется 6-пульсный тиристорный преобразователь, который питается от 3-фазной сети переменного тока. Если пренебречь падением напряжения в тиристорном преобразователе, то средневыврямленное напряжение преобразователя  $U_{ИП}$  зависит от действующего значения линейного (или фазного) переменного напряжения  $U_{rms}$ , от которого запитывается тиристорный преобразователь, а также угла открытия тиристор  $\alpha$ :

$$U_{ИП}(\alpha) \sim U_{rms} f(\alpha),$$

здесь следует отметить, что зависимость  $f(\alpha)$  не является линейной, что нужно учитывать при синтезе управления тиристорным источником питания (Лабораторная работа №2). В данной работе будем считать, что источник питания имеет линейную характеристику, точнее – линеаризованную некоторым образом, в виде:

$$U_{\text{ип}} \approx U_{\alpha} \sim U_{\text{rms}},$$

здесь  $U_{\alpha}$  – входная координата для источника.

Обмотки тороидального поля ТФ будем рассматривать как активно-индуктивную нагрузку с суммарным сопротивлением  $R_{\text{ТФ}}$  и суммарной индуктивностью  $L_{\text{ТФ}}$ .

Закон изменения тока в активно-индуктивной нагрузке описывается дифференциальным уравнением:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t), \quad (1)$$

При нулевом начальном условии:  $i(0) = 0$ , и  $u = \text{Const}$ , решением уравнения (1) будет:

$$i(t) = \frac{u}{R} \left( 1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \right).$$

Нетрудно заметить, что при малых временах ( $t \ll L/R$ ) падением напряжения на активном сопротивлении можно пренебречь  $Ri \ll Ldi/dt$ , а закон изменения тока приблизительно описать дифференциальным уравнением:

$$L \frac{di(t)}{dt} \approx u, \quad i(0) = 0, \quad t \ll L/R. \quad (2)$$

В рамках данной лабораторной работы необходимо обеспечить максимально быстрый ввод тока в обмотки ТФ до желаемого значения  $I_{\text{ref}}$ , после чего стабилизировать ток в течение эксперимента, как показано на рисунке 3.

Зная параметры источника питания обмоток ТФ, индуктивности  $L_{\text{ТФ}}$  и сопротивления  $R_{\text{ТФ}}$ , нетрудно определить максимально возможную скорость роста тока и, затем, момент времени  $t_1$  когда ток достигнет желаемого значе-

ния  $I_{\text{ref}}$ . Полученную диаграмму тока  $I_{\text{TF,ref}}(t)$  будем использовать в качестве уставки для системы управления током.

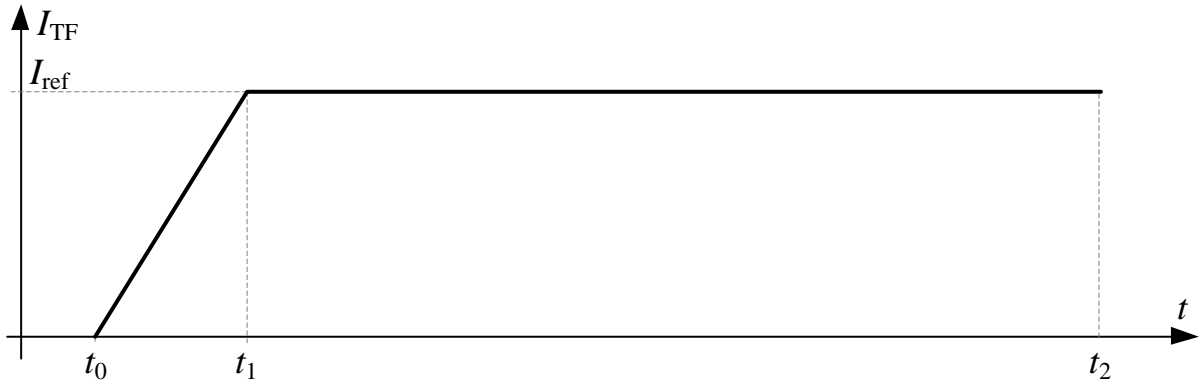


Рисунок 3 – Сценарий изменения тока в обмотках ТФ

Диаграмму напряжения  $U_{\text{ref}}^{\text{ff}}(t)$ , которая при подстановке вместе с  $I_{\text{TF,ref}}(t)$  в уравнение (1) обратит его в тождество, будем называть программной. За основу системы управления током в ТФ выберем двухконтурную схему, показанную на рисунке 4, в которой регулируется как ток в нагрузке, так и напряжение источника питания. Уставку для контура регулирования напряжением будем складывать из двух составляющих:

$$U_{\text{ref}} = U_{\text{ref}}^{\text{ff}} + U_{\text{ref}}^{\text{fb}},$$

где  $U_{\text{ref}}^{\text{ff}}(t)$  обеспечивает изменение тока в обмотках ТФ вдоль заданной диаграммы тока  $I_{\text{TF,ref}}(t)$ , а  $U_{\text{ref}}^{\text{fb}}(t)$  формируется регулятором тока по сигналу рассогласования  $\varepsilon_I$ , что позволит скомпенсировать неточности модели (1) и возмущения действующие на объект.

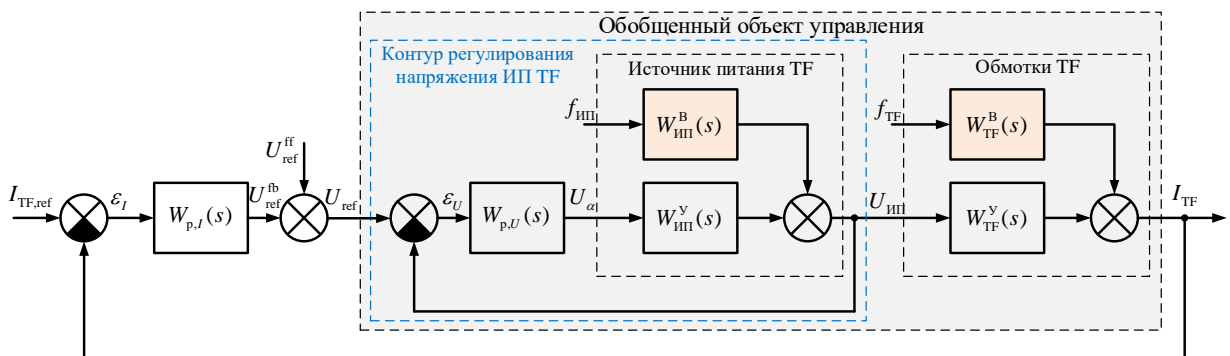


Рисунок 4 – Структурная схема системы управления тороидальным полем токамака

На структурной схеме (рисунок 4) используются следующие обозначения:

- $W_{TF}^Y(s)$  – передаточная функция объекта по управлению;
- $W_{TF}^B(s)$  – передаточная функция объекта по возмущению;
- $W_{ИП}^Y(s)$  – передаточная функция источника питания по управлению;
- $W_{ИП}^B(s)$  – передаточная функция источника питания по возмущению;
- $W_{p,U}(s)$  – передаточная функция регулятора напряжения на выходе источника питания;
- $W_{p,I}(s)$  – передаточная функция регулятора тока в ТФ.

## 2 Варианты заданий

| Вариант | $R_{TF}$ , МОм | $L_{TF}$ , мГн | $f_c$ , Гц | $ U_{ИП,max} $ , В | $I_{ref}$ , кА | $\eta_R$ , % | $\eta_U$ , % |
|---------|----------------|----------------|------------|--------------------|----------------|--------------|--------------|
| 1       | 1,5761         | 1,7119         | 50         | 700                | 20             | 15           | +15          |
| 2       | 9,7059         | 7,0605         | 60         | 750                | 30             | 20           | +10          |
| 3       | 9,5717         | 0,3183         | 50         | 800                | 20             | 15           | -15          |
| 4       | 4,8538         | 2,7692         | 60         | 850                | 30             | 20           | -10          |
| 5       | 8,0028         | 0,4617         | 50         | 900                | 20             | 15           | +15          |
| 6       | 1,4189         | 1,9713         | 60         | 950                | 40             | 20           | +10          |
| 7       | 4,2176         | 8,2346         | 50         | 1000               | 20             | 15           | -15          |
| 8       | 9,1574         | 6,9483         | 60         | 1050               | 20             | 20           | -10          |
| 9       | 7,9221         | 3,1710         | 50         | 1100               | 20             | 15           | +15          |
| 10      | 9,5949         | 9,5022         | 60         | 1150               | 20             | 20           | +10          |
| 11      | 6,5574         | 6,3445         | 50         | 1200               | 30             | 15           | -15          |
| 12      | 4,3571         | 4,3874         | 60         | 1250               | 40             | 20           | -10          |
| 13      | 8,4913         | 3,8156         | 50         | 1300               | 20             | 15           | +15          |
| 14      | 9,3399         | 7,6552         | 60         | 1350               | 20             | 20           | +10          |
| 15      | 6,7874         | 7,9520         | 50         | 1400               | 30             | 15           | -15          |
| 16      | 7,5774         | 1,8687         | 60         | 1450               | 30             | 20           | -10          |
| 17      | 7,4313         | 4,8976         | 50         | 1500               | 30             | 15           | +15          |
| 18      | 3,9223         | 4,4559         | 60         | 1550               | 30             | 20           | +10          |
| 19      | 6,5548         | 6,4631         | 50         | 1600               | 30             | 15           | -15          |
| 20      | 9,5            | 10,11          | 60         | 1650               | 40             | 15           | +10          |
| 21      | 10,5           | 12,153         | 50         | 1700               | 50             | 20           | -15          |
| 22      | 11,4           | 11,4           | 60         | 1750               | 60             | 15           | +10          |
| 23      | 11,1           | 15,6           | 50         | 1800               | 50             | 20           | -15          |
| 24      | 10,5           | 20,8           | 60         | 1850               | 60             | 15           | +10          |
| 25      | 7,5            | 15,1           | 50         | 1900               | 50             | 20           | -15          |



|    |       |       |    |      |    |    |     |
|----|-------|-------|----|------|----|----|-----|
| 26 | 13,0  | 12,9  | 60 | 1950 | 60 | 15 | +10 |
| 27 | 15,1  | 18,12 | 50 | 2000 | 50 | 20 | −15 |
| 28 | 11,4  | 17,23 | 60 | 2050 | 60 | 15 | +10 |
| 29 | 15,0  | 16,4  | 50 | 2100 | 50 | 20 | −15 |
| 30 | 17,0  | 16,9  | 60 | 2150 | 60 | 15 | +10 |
| 31 | 19,56 | 21,1  | 50 | 2200 | 70 | 20 | −15 |
| 32 | 11,3  | 9,4   | 60 | 1950 | 40 | 15 | +10 |
| 33 | 9,45  | 11,89 | 50 | 1850 | 50 | 20 | −15 |
| 34 | 8,4   | 12,89 | 60 | 2000 | 40 | 15 | +10 |
| 35 | 11,5  | 13,45 | 50 | 2150 | 50 | 20 | −15 |

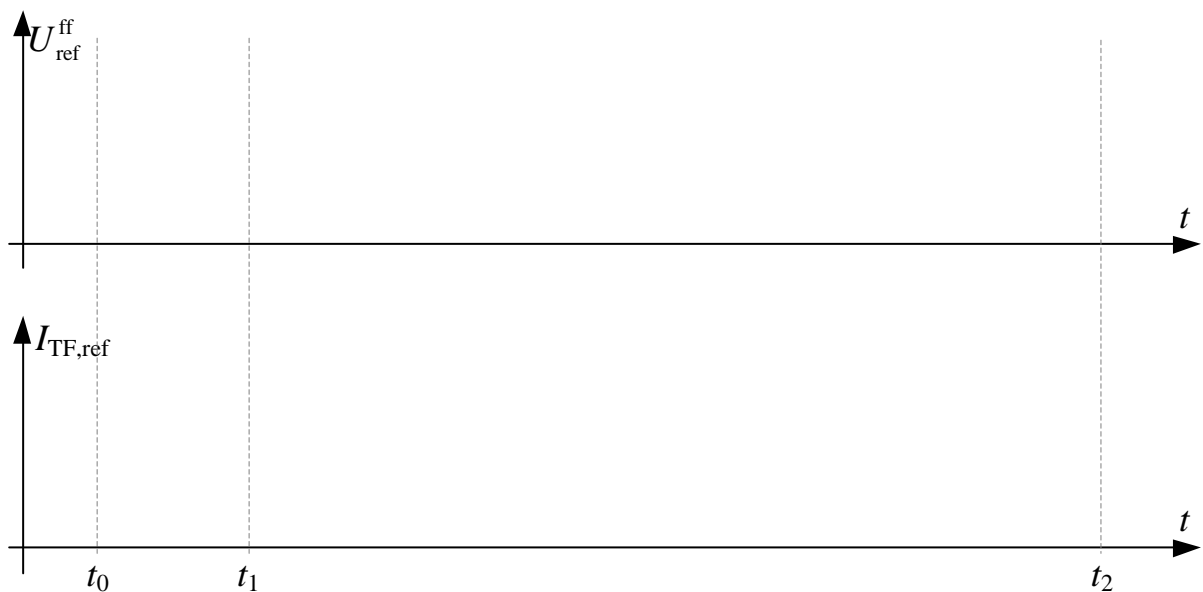
### 3 Порядок работы

- 1 Согласуйте вариант задания с преподавателем и выпишите исходные данные, приведенные в таблице выше.
- 2 Исходя из условия, что ток в ТФ необходимо ввести максимально быстро, а также, учитывая ограничения источника питания, синтезируйте программные диаграммы (траектории) тока  $I_{\text{TF,ref}}(t)$  в ТФ (см. рисунок 3) и напряжения  $U_{\text{ref}}^{\text{ff}}(t)$ . Представьте полученные функции тока и напряжения в виде:

$$I_{\text{TF,ref}} = \begin{cases} i_{01}(t), & t_0 \leq t < t_1, \\ i_{12}(t), & t_1 \leq t < t_2, \end{cases}$$

$$U_{\text{ref}}^{\text{ff}} = \begin{cases} u_{01}(t), & t_0 \leq t < t_1, \\ u_{12}(t), & t_1 \leq t < t_2. \end{cases}$$

Постройте графики тока и напряжения и представьте их в виде:



*Указание. Используйте уравнение (1), для интервала времени  $t_0 \leq t < t_1$  воспользуйтесь приближением (2). Для построения графиков используйте инструменты MATLAB, рекомендуется использовать режим 'Edit Plot'. Все оси должны быть подписаны.*

- 3 Постройте передаточную функцию источника питания по управлению  $W_{\text{TF}}^y(s)$ . Выше было сказано, что  $U_{\text{ИП}}/U_{\alpha} \approx 1$ , однако более точной аппроксимаций будет использование апериодического звена первого порядка с запаздыванием:

$$W_{\text{ИП}}^y(s) = \frac{1}{T_{\text{ИП}}s + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{ИП}}s},$$

где  $T_{\text{ИП}} = 1/(2f_c p)$ ,  $f_c$  – частота питающей сети,  $p$  – пульсность выпрямителя;  $\tau_{\text{ИП}} = T_{\text{ц}}/2$ ,  $T_{\text{ц}} = 1/(f_c p)$  – время цикла управления,  $T_{\text{ц}}$  также используется для измерения средних значений напряжения источника питания и тока в ТФ.

- 4 Исходя из малости постоянной времени  $T_{\text{ИП}}$ , и требования отсутствия статической ошибки регулирования, выберите закон регулирования для контура управления напряжением источника питания. Рекомендуется выполнить расчет параметров настройки регулятора в программе Sar\_Sintez методом оптимального модуля.
- 5 Соберите в Simulink замкнутую систему стабилизации напряжения ИП ТФ (см. рисунок 4). Подайте на вход модели тестовые ступенчатые воздействия, добейтесь отсутствия перерегулирования в переходных процессах замкнутого контура управления ИП.

*Выполните настройку решателя (Solver). В меню Simulation выберите Model Configuration Parameters → Solver. На панели Solver options выберите min: Variable-step method: ode23t (mod. stiff/Trapezoidal).*

- 6 Передаточную функцию ИП по каналу возмущения выберите в виде:

$$W_{\text{ИП}}^B(s) = \frac{k_{\text{ИП}}^B}{T_{\text{ИП}}s + 1}.$$

Определите величину коэффициента передачи  $k_{\text{ИП}}^B$  из условия, что действующее значение переменного напряжения (линейного или фазного) скачком изменилась на  $\eta_U$  %.

- 7 Добавьте в модель контура управления ИП в Simulink канал по возмущению.

- 8 Постройте передаточную функцию объекта по каналу управления  $W_{TF}^y(s)$ .  
Используйте апериодическое звено первого порядка с запаздыванием:

$$W_{TF}^y(s) = \frac{k_{TF}}{T_{TF}s + 1} \cdot e^{-\tau_{TF}s},$$

здесь  $\tau_{TF} = T_{ц}/2$  (см. выше).

- 9 Определите структуру и параметры передаточной функции объекта по каналу возмущения из условия, что сопротивление обмотки скачком увеличилось на  $\eta_R$  %.
- 10 В качестве закона регулирования тока в ТФ использовать ПИД регулятор. При расчете параметров настройки регулятора тока, в виду малости  $T_{инп}$  ( $T_{инп} \ll T_{TF}$ ) принять, что передаточная функция замкнутой системы стабилизации напряжения ИП ТФ равна  $\exp(-\tau_{инп}s)$ . Расчет параметров настройки регулятора тока рекомендуется выполнить в программе Sar\_Sintez методом оптимального модуля.
- 11 Соберите в Simulink модель замкнутой системы управления током в ТФ. Обеспечьте в модели возможность отключения контура стабилизации (используйте блок Manual Switch).
- 12 При настройке регуляторов в Simulink необходимо учесть ограничения управляющих воздействий по амплитуде (примите во внимание положение рабочего органа на интервале стабилизации тока в ТФ).
- 13 Используя программные диаграммы тока и напряжения, полученные в п. 2, смоделируйте ввод тока в ТФ и его стабилизацию. Моделирование проведите без возмущений. Отключите регулятор напряжения и проведите моделирование снова. Сравните результаты.
- 14 Повторите действия предыдущего пункта, последовательно подавая возмущения для контура управления напряжением и током (по отдельности!). Сравните результаты, сделайте выводы.
- 15 Оформите отчет по результатам работы.

#### 4 Список литературы

1. Ariola M., Pironti A. Plasma shape control for the JET tokamak: an optimal output regulation approach // IEEE Control Syst. 2005. Vol. 25, № 5. P. 65–75.
2. Чен Ф.Ф. Введение в физику плазмы. Москва: Мир, 1987. 398 p.
3. Pillsbury, R.D. J., Hakkarainen S.P. Plasma start-up modelling for Alcator C-MOD // IEEE Thirteen. Symp. Fusion Eng. 1989 Proc. 1989. P. 642–645 vol.1.
4. Pillsbury, R.D. J., Schultz J.H. Modelling of plasma start-up in ITER // IEEE Trans. Magn. 1992. Vol. 28, № 2. P. 1462–1465.
5. Ariola M., Pironti A. Magnetic Control of Tokamak Plasmas. Springer, 2008. 170 p.