

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»,
И. Г. КАЗАНЦЕВА, студентка НТУ «ХПИ»

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЯМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

У статті розглядається оптимізація прямих показників якості систем регулювання ядерного реактора типу ВВЕР-1000 атомної електростанції на підставі раніше побудованих лінійної і нелінійної моделей систем управління нейтронною потужністю ядерного реактора з шістьма групами запізнілих нейтронів. Досліджено вплив номера кампанії активної зони і її періоду на динамічні характеристики реактора.

В статье рассматривается оптимизация прямых показателей качества систем регулирования ядерного реактора типа ВВЭР-1000 атомной электростанции на основании ранее построенных линейной и нелинейной моделей систем управления нейтронной мощностью ядерного реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов. Исследовано влияние номера кампании активной зоны и ее периода на динамические характеристики реактора.

Optimization direct quality indexes of nuclear reactor WWER-1000 of nuclear power plant is examined in the article on the base of the before built linear and nonlinear models of control systems by neutron power of nuclear reactor with six groups of late neutrons. Influence of company number of active area and its period is probed on dynamic descriptions reactor.

Введение. В управлении энергоблоков атомных электростанций предусмотрен централизованный контроль и дистанционное управление технологическими процессами на основе систем автоматического регулирования (САР), осуществляемого автоматическими регуляторами.

Проблема оптимизации прямых динамических показателей качества ядерного реактора ВВЭР-1000 является актуальной проблемой. Значения прямых показателей качества – максимального отклонения, показателя колебательности и времени регулирования, определяют условия безопасной работы энергоблока, его надежность и быстродействие [1, 2].

В данной статье рассматривается оптимизация прямых показателей качества (ППК) САР ядерного реактора типа ВВЭР-1000 атомной электростанции на примере ранее построенных линейной и нелинейной моделей ядерного реактора, САР реактора и методики оптимизации ППК систем регулирования [3-5]. Так как результаты оптимизации ППК существенно зависят от модели нейтронной кинетики, целесообразно применять наиболее полную ее модель с шестью группами запаздывающих нейтронов.

Постановка задачи оптимизации. Для построения сравнимых по качеству переходных процессов нейтронной мощности подадим на вход САР ступенчатые изменения реактивности регулируемого стержня: $\rho_d = \alpha_v \cdot 1(t)$,

где α_v – коэффициент реактивности по мощности. При этом в соответствии с уравнением статики получим процессы с одинаковыми начальным и установившимся значениями мощности: $\nu(0) = 0$, $\nu(\infty) = 1$. Зададим значения ограничений задачи оптимизации ППК – допустимые значения перерегулирования и размаха колебаний $\sigma_m = 0$ и $\zeta_m = 0$, параметр зоны установившегося значения $\delta_y = 0.05$ и сформируем векторную целевую функцию [3]. Вычисляя эту функцию, при заданном значении числа шагов интегрирования $L = 200$, оптимизируем ее в случае одной переменной векторным методом адаптации шага, а в случае нескольких переменных – векторным методом Нелдера-Мида [5].

Результаты оптимизации регуляторов. В табл. 1 и 2 для различных типов регуляторов мощности и значения конечного времени интегрирования T_F представлены оптимальные значения параметров регуляторов K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , соответствующие им значения проекций векторной функции F_1^* , F_2^* и времени регулирования t_c^* для линейных и нелинейных моделей САР мощности реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов.

Таблица 1

Результаты оптимизации линейных САР

Тип регулятора	T_F , с	K_p^*	λ_I^* , с ⁻¹	λ_D^* , с ⁻¹	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	100	45,807	—	—	13	0,3605	36,050
И	1000	—	0,082750	—	14	0,3412	341,239
ПИ	100	100,00	2,594788	—	14	0,504	50,398
ПД	100	100,00	—	0,0435931	14	0,3607	36,066
ИД	1000	—	0,82734	100,00	13	0,6563	91,629
ПИД	100	100,00	2,594828	99,85286	15	0,5055	50,546

Таблица 2

Результаты оптимизации нелинейных САР

Тип регулятора	T_F , с	K_p^*	λ_I^* , с ⁻¹	λ_D^* , с ⁻¹	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	100	43,153	—	—	13	0,3716	37,159
И	1000	—	0,077317	—	14	0,3685	368,515
ПИ	100	100,00	2,318716	—	14	0,5311	53,114
ПД	100	100,00	—	0,549747	14	0,3718	37,177
ИД	1000	—	0,71670	17,4895	15	0,3693	369,294
ПИД	100	100,00	2,309897	96,1046	15	0,53	53,125

Данные приведенные в табл. 1 и 2 показывают, что при оптимальных значениях параметров П и ПД регуляторов статическая ошибка превосходит 10%, а И и ИД регуляторы приводят к большому значению времени регулирования. При одинаковой эффективности ПИ и ПИД регуляторов ПИ регулятор проще, он позволяет обеспечить высокое быстродействие САР. Поэтому для исследования влияния номера кампании активной зоны и ее периода на характеристики реактора был выбран ПИ регулятор.

На рис. 1 и 2 показаны графики оптимальных процессов в линейных и нелинейных САР. Эти графики подтверждают правильность выбора ПИ регулятора для дальнейших исследований.

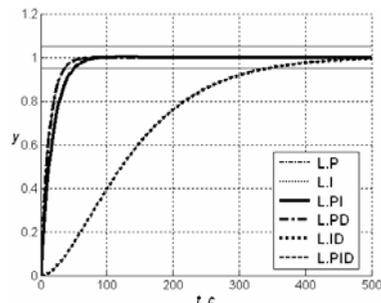


Рис. 1 – Оптимальные процессы в линейных моделях

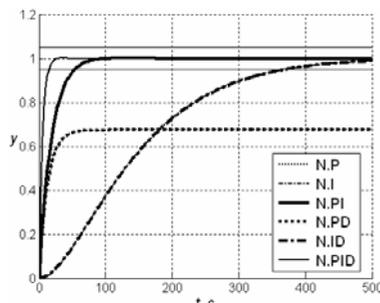


Рис. 2 – Оптимальные процессы в нелинейных моделях

По рис. 1 видно, что график процесса в САР с ПД регулятором совпадает с графиком, соответствующим П регулятору, ИД регулятора – с И регулятором, ПИД регулятора – с ПИ регулятором. Исходя из этого можно сделать вывод, что дифференциальная часть регулятора не улучшает показатели качества систем.

По рис. 2 также видно, что график процесса при ПД регуляторе совпадает с графиком при П регуляторе, ИД регулятора – с И регулятором. Следовательно для нелинейных моделей дифференциальная часть регуляторов также не улучшает показатели качества.

Исследование кампании реактора и ее периода. Для исследования влияния номера кампании активной зоны и ее периода на динамические характеристики реактора по его линейной модели из справочной литературы были взяты значения параметров реактора, зависящих от номера кампании активной зоны и от ее периода – начала, середины и конца кампании [2].

В табл. 3 для различных периодов кампании первой и стационарной загрузки ядерного топлива и линейной модели с ПИ регулятором представлены оптимальные значения параметров регулятора K_p^* , λ_I^* , соответствующие им значения проекции векторной функции F_2^* и времени

регулирования t_c^* . Переходные процессы в линейной модели с учетом периода кампании представлены на рис. 3–7.

Таблица 3

Результаты оптимизации линейной САР с ПИ регулятором

Загрузка	Период	K_p^*	λ_I^*, c^{-1}	F_2^*	t_c^*, c
Первая	начало	25	0,5934	0,2397	23,973
	середина	25	0,6962	0,5104	51,040
	конец	22,918	0,7688	0,6924	69,237
Стационарная	начало	25	0,6134	0,2354	23,5375
	середина	25	0,705	0,504	50,398
	конец	22,918	0,7688	0,6924	69,237

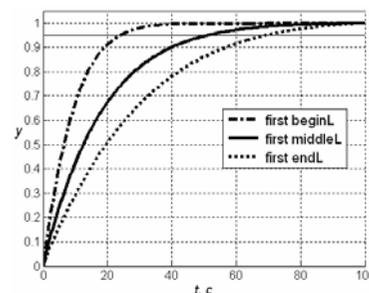


Рис. 3 – Процессы при первой загрузке

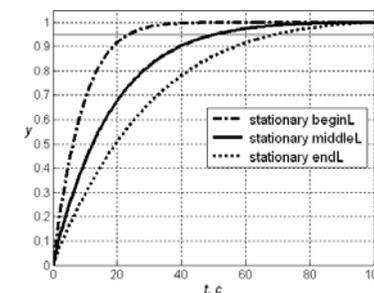


Рис. 4 – Процессы при стационарной загрузке

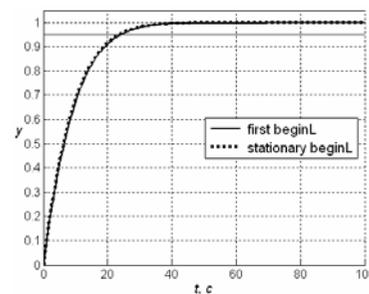


Рис. 5 – Процессы в начале кампании

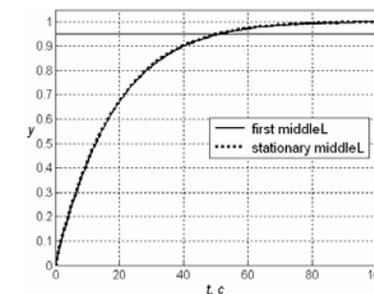


Рис. 6 – Процессы в середине кампании

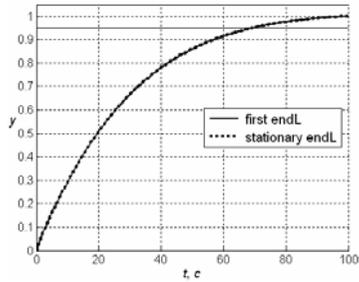


Рис. 7 – Процессы в конце кампании

В табл. 4 для различных периодов кампании первой и стационарной загрузок ядерного топлива и нелинейной модели ядерного реактора с ПИ регулятором представлены оптимальные значения параметров регулятора K_p^* , λ_I^* , соответствующие им значения проекции векторной функции F_2^* и времени регулирования t_c^* .

Переходные процессы в нелинейной модели с учетом периода кампании представлены на рис. 8–12. Рис. 3–12 показывают, что период кампании сильнее влияет на качество процессов в САУ, чем номер загрузки топлива. При этом с увеличением периода кампании время регулирования возрастает.

Таблица 4

Результаты оптимизации нелинейной САУ с ПИ регулятором

Загрузка	Период	K_p^*	λ_I^*, c^{-1}	F_2^*	t_c^*, c
Первая	начало	22,9216	0,487	0,3088	30,884
	середина	24,9982	0,6728	0,5346	53,456
	конец	25	0,7975	0,6798	67,982
Стационарная	начало	25	0,543	0,2764	27,638
	середина	25	0,6776	0,5311	53,114
	конец	25	0,7975	0,6798	67,982

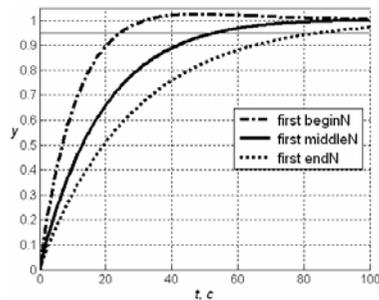


Рис. 8 – Процессы при первой загрузке

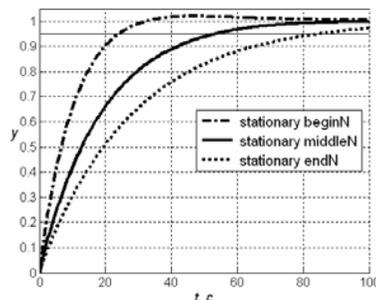


Рис. 9 – Процессы при стационарной загрузке

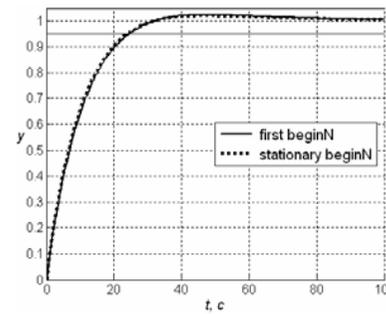


Рис. 10 – Процессы в начале кампании

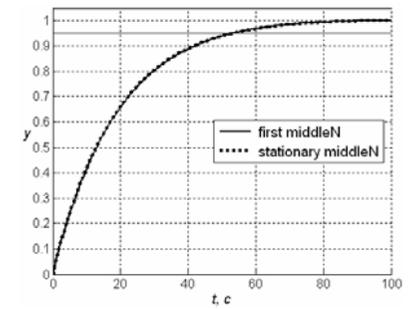


Рис. 11 – Процессы в середине кампании

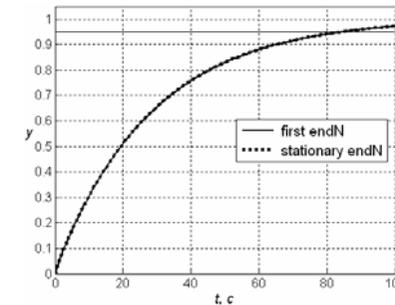


Рис. 12 – Процессы в конце кампании

Выводы. Результаты оптимизации прямых показателей качества систем регулирования нейтронной мощности реактора – перерегулирования, колебательности и времени регулирования показали, что период кампании сильнее влияет на качество процессов в системах автоматического регулирования, чем номер загрузки топлива. При этом с увеличением периода кампании время регулирования возрастает.

Список литературы: 1. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 311 с. 2. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. — М.: ИздАТ, 2002. — 480 с. 3. Северин В. П. Математическое моделирование и оптимизация показателей качества систем автоматического регулирования реакторной установки // Ядерная и радиационная безопасность. — 2007. — Том 10. — Вып. 2. — С. 66–77. 4. Северин В. П., Никулина Е. Н. Алгоритмы вычисления прямых показателей качества функций веса САУ // Радиоэлектроника и информатика. 2004. № 1. С. 52-59. 5. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 2. С. 52-61.

Поступила в редколлегию 25.11.08