

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Метод установившегося режима электрической системы // Изв. вузов. Энергетика. - 1989. - №5. - С. 12-18.
2. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество. - 1991. - №1. - С. 6-13.
3. Тамразян М.Г. Об одном Y-Z-методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1996. - Т. 49, № 3. - С. 138-142.

ГИУА

22.04.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 3, 1998, с. 307 - 314.

УДК 621.039.51

ЭНЕРГЕТИКА

С.В. ШАХВЕРДЯН, А.С. ШАХВЕРДЯН

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ НЕЙТРОНОВ КСЕНОНОМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

Օպտիմալ կառավարման տեսության հիման վրա ստացվել են ռեակտորների աշխատանքային երկարացման խնդրի օպտիմալության անհրաժեշտ պայմանները: Բերված են բնական փորձարկումների արդյունքները:

На основе теории оптимального управления получены новые необходимые условия оптимальности для задачи выбора продолжительности продления кампании и режима работы энергетического реактора. Приведены результаты численных экспериментов, показывающие значительный эффект оптимизации режима реактора, достигающий 5...6%. Сравнение режимов проведено при постоянной выработке электроэнергии.

Ил. 2. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

New optimal conditions necessary for the choice of a campaign extension durability problem and nuclear power reactor mode of operation are obtained on the basis of the optimal control theory. The results of numerical experiments showing a considerable effect of reactor modes running into 5...6% are given. Mode comparison is performed at constant electric power production.

Ил. 2. Tables 2. Ref. 6.

Проблема продления кампании водо-водяных реакторов АЭС за счет уменьшения влияния ксенона является многогранной, весьма сложной и вместе с тем исключительно актуальной. Несмотря на это, в настоящее время проблема в целом (комплексно) не решена. Существующие работы, как правило, посвящены отдельным ее аспектам [1-4].

Исходя из анализа задачи и существующих работ оказалось целесообразным использовать методы теории оптимального управления для получения необходимых условий оптимальности и на их основе построить вычислительные алгоритмы, позволяющие дать ответ на вопросы: насколько снизить мощность реактора, по какому

закону снизить, на каком интервале времени снизить, по какому закону поднять, насколько поднять мощность, в течение какого периода создать такой режим и т.д.

Постановка и решение задач. Целью настоящей работы является выбор такого режима работы реактора, при котором достигается минимальное поглощение нейтронов ксеноном при заданной выработке электроэнергии с обеспечением всех технологических ограничений. Математически эту задачу можно сформулировать так: найти функцию $c(t)$, которая минимизирует интеграл

$$J = \int_0^T \sigma c(t) U x_2 dt \quad (1)$$

при дифференциальных связях

$$\dot{x}_1 = \gamma_1 c U - \lambda_1 x_1 = f_1(x_1, c), \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = \gamma_2 c U + \lambda_1 x_1 - (\sigma c U + \lambda_2) x_2 = f_2(x_1, x_2, c)$$

и ограничениях

$$\int_0^T c U dt = A, \quad (3)$$

$$c_0 \leq c \leq 1, \quad (4)$$

$$x_2 \leq X, \quad (5)$$

где $c = u/U$; c - управляющий параметр; u - тепловая мощность реактора, либо средняя плотность потока нейтронов в реакторе; U - номинальная тепловая мощность реактора; x_1, x_2 - концентрации йода (^{129}I) и ксенона (^{135}Xe), нормированные на макроскопическое сечение деления топлива $\sum \Gamma$; γ_1, γ_2 - выходы ^{135}I и ^{135}Xe ; λ_1, λ_2 - постоянные распада ^{135}I и ^{135}Xe ; σ - эффективное микроскопическое сечение захвата нейтронов ксеноном; A - заданное количество тепловой энергии, которое нужно выработать за период управления; X - максимально допустимое значение ксенона по условиям баланса реактивности; c_0 - минимально допустимое значение относительной тепловой мощности реактора; T - период управления, $T=24$ ч.

Для системы (2) начальными условиями x_1 и x_2 являются стационарные значения, определяемые по выражениям

$$x_1(0) = \gamma_1 c U / \lambda_1, \quad x_2(0) = (\gamma_2 + \gamma_1) c U / (\sigma c U + \lambda_2) \quad (6)$$

при $c=1$.

Сформулированная задача относится к классу задач оптимального управления, поэтому для ее решения естественно применять аппарат принципа максимума. С этой целью составим функцию Гамильтона

$$H = \langle \psi, f \rangle = \sum_{i=0}^n \psi_i f_i, \quad (7)$$

где $\vec{f} = \{f_0, f_1, f_2\}$; $\psi = \{\psi_0, \psi_1, \psi_2\}$; $f_0 = cU(\sigma x_1 + 1)$; μ - постоянный по времени множитель Лагранжа. Вектор ψ определяется из системы

$$\psi_0 = \text{const}, \quad \dot{\psi}_i = -\partial H / \partial x_i, \quad \psi_i(T) = 0, \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

Нетрудно заметить, что гамильтониан (7) линеен по управлению c , и задача (1) - (5) обладает признаками особенности [5]. При этом в уравнении $\partial H / \partial c = 0$, вытекающим из обычного принципа максимума, не содержится параметра c , поэтому для его вычисления обычно используется уравнение

$$\frac{d^r}{dt^r} \left(\frac{\partial H}{\partial c} \right) = 0, \quad (9)$$

где r - наименьшее число, при котором в (9) появляется c . В задаче (1)-(5) $r=2$, следовательно, особое управление находится из уравнения

$$\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial c} \right) = 0. \quad (10)$$

Однако, чтобы убедиться в том, что полученное из уравнения (10) особое управление оптимально, необходимо в первую очередь проверить условие Келли [5]:

$$\frac{\partial}{\partial c} \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial c} \right) \right] \geq 0. \quad (11)$$

Докажем, что для задачи (1) - (5) условие (11) не выполняется.

В рассматриваемой задаче система уравнений (8) имеет вид

$$\dot{\psi}_0 = -1, \quad \dot{\psi}_1 = \lambda_1(\psi_1 - \psi_2), \quad \dot{\psi}_2 = cU\sigma + \psi_2(cU\sigma + \lambda_2). \quad (12)$$

Взяв последовательно производные $\partial H / \partial c$ по t , затем вычислив левую часть уравнения (11), после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial c} \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial c} \right) \right] = & \sigma U^2 \lambda_1 x_1 (\psi_0 - \psi_2) + 2\sigma U^2 \lambda_1 \gamma_1 (\psi_0 - \psi_2) - \\ & - \sigma U^2 \lambda_2 \gamma_2 (2\psi_0 - \psi_2) + \sigma^2 U^2 \lambda_2 x_2 \psi_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Постоянные коэффициенты системы (2), которые входят в выражение (13), равны [6]:

$$\lambda_1 = 0,28525 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_2 = 0,21088 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}, \quad (14)$$

$$\gamma_1 = 0,061, \quad \gamma_2 = 0,002, \quad \sigma = 2,7 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$$

Проанализировав последнее уравнение системы (12), можно заметить, что $\psi_1(t) \leq 0$, $\forall t \in [0, T]$, в противном случае условие $\psi_1(T) = 0$ не может быть выполнено. С другой стороны, $\psi_2 > -1$, поскольку при $\psi_2 < -1$, $\dot{\psi}_2 \leq 0$, и условие $\psi_2(T) = 0$ также не может быть обеспечено, следовательно, $-1 < \psi_2 \leq 0$.

При $\psi_0 = -1$, $-1 < \psi_2 \leq 0$ и коэффициентах (14) имеем

$$\frac{\partial}{\partial c} \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial c} \right) \right] \leq 0,$$

т.е. условие Келли (11) не выполняется.

Следовательно, оптимальным является граничное управление, т.е. параметр c попеременно должен принимать значения c_0 и 1, причем

$$c = \begin{cases} c_0, & \text{когда } \frac{\partial H}{\partial c} < 0, \\ 1, & \text{когда } \frac{\partial H}{\partial c} > 0. \end{cases}$$

Согласно (7), $H = \psi_0 \sigma U c x_1 + \psi_1 (\gamma_1 c U - \lambda_1 x_1) + \psi_2 [\gamma_2 c U + \lambda_2 x_1 - (\sigma c U - \lambda_2) x_2] + \mu c U$, а при $\psi_0 = -1$:

$$\frac{\partial H}{\partial c} = -\sigma U x_1 + \psi_1 \gamma_1 U + \psi_2 \gamma_2 U - \psi_2 \sigma U x_2 + \mu U. \quad (15)$$

Из второго уравнения (12), учитывая, что $\psi_2 \in (-1, 0]$ и $\psi_1(T) = 0$, следует $\psi_1 \in (-1, 0]$, $\psi_1 \geq \psi_2$. Следовательно, в зависимости от u правая часть выражения (15) не более одного раза будет менять знак, иначе говоря, в задаче (1)-(5) $\partial H / \partial c < 0$ на $\{0, \tau\}$, $\partial H / \partial c > 0$ на $\{\tau, T\}$ и оптимальное управление равно

$$c = \begin{cases} c_0 & \text{на } [0, \tau), \\ 1 & \text{на } (\tau, T]. \end{cases} \quad (16)$$

где τ - момент переключения управления c_0 на 1. В процессе решения подбирается такое значение для μ , при котором с управлением (16) выполняется условие (3) и, как следствие, однозначно определяется момент переключения τ .

Неравенство (5) является следствием уравнения баланса реактивности, которое в форме приращений имеет вид [3]

$$\Delta \rho_{\text{xe}}(\tau) + \Delta \rho_{\text{w}}(\tau) + \Delta \rho_0(\tau) + \Delta \rho_T(\tau) + \Delta \rho_{\text{H}}(\tau) + \Delta \rho_{\text{B}}(\tau) = 0, \quad (17)$$

где $\Delta \rho_{\text{xe}} = \Delta \rho_{\text{w}} = d_{\text{w}}(N_{\text{xe}} - N_{\text{xe}0})$, $\Delta \rho_0(\tau) = d_0(Q_T(\tau) - Q_{T0})$,

$$\Delta \rho_{\text{H}}(\tau) = d_{\text{H}}(C_{\text{H}}(\tau) - C_{\text{H}0}), \quad \Delta \rho_T(\tau) = d_T(T_1(\tau) - T_{10}), \quad \Delta \rho_{\text{B}}(\tau) = d_{\text{B}} \int_0^{\tau} Q_T dt -$$

изменение реактивности с помощью стержней, в результате отравления ксеноном, в результате мощностного эффекта; вследствие изменения концентрации борной кислоты, в результате температурного эффекта замедлителя, в результате выгорания соответственно: N_{xe} - концентрация ядер ксенона; Q_T - тепловая мощность реактора; T - температура замедлителя; d_i - коэффициент реактивности по $i = \text{xe}, 0, 3, \text{B}, \text{Б}$; индекс "0" отвечает моменту времени работы реактора на номинальной мощности; C_{B} - концентрация борной кислоты.

В конце кампании $\Delta p_{ст} = 0$. Так как запас реактивности исчерпан, следовательно, уравнение баланса реактивности может быть переписано в виде

$$\Delta p_{\alpha}(t) + \Delta p_{\beta}(t) + \Delta p_{\gamma}(t) + \Delta p_{\delta}(t) + \Delta p_{\epsilon}(t) = 0 \quad (18)$$

Уравнение (17) получено линеаризацией уравнения баланса реактивности в 6-мерной точке, соответствующей номинальной мощности. Следовательно, оно справедливо для диапазонов изменения мощности, на котором $\beta(t) = \text{const}$. Однако реально нельзя принять $\beta(t) = \text{const}$, так как диапазон изменения мощности в режимах продления кампании может достигать значительных величин. Например, если реактор работал на номинальной мощности P , затем в течение времени t мощность снижена до $\sigma(t)P$ ($\sigma < 1$), тогда концентрация ксенона $N_{\text{кс}}$ до какого-то момента увеличивается, достигая максимума, затем - уменьшается. В силу этого $\beta_{\text{кс}}$ не только не остается постоянным, но и меняет знак. Коэффициенты d_i в зависимости от $\sigma(t)P$ меняются и по другим компонентам.

Для решения проблемы вычисления коэффициентов реактивности d_i , используемых в уравнении (17), необходимо провести специальные исследования. Но эта проблема в данной работе выделена в отдельную, и задача (1) - (5) решается в предположении, что d_i известны. Тогда величина X , входящая в ограничение (5), определяется из уравнения (18) при $\Delta p_{\alpha}(t) = 0$.

Численные эксперименты. На основе структуры оптимального управления (16) выполнены численные эксперименты с целью количественной оценки эффекта оптимизации режима реакторной установки в конце кампании. Все эксперименты были проведены при $\beta = 3 \cdot 10^{-4}$ нейтр./с.м.² с., $\lambda_1(0) = 0.6415 \cdot 10^{-4}$ с.г.,

$$\lambda_2(0) = 0.1851 \cdot 10^{-4} \text{ с.м.}^{-1}; \quad c_{\text{оп}} = \text{пс.}, \quad n = \overline{1,4}, \quad c_1 = 0.2, \quad \tau_{\text{оп}} = m\tau_{\text{оп}}, \\ m = \overline{1,2}, \quad \tau_{\text{п}} = 2 \cdot 3600 \text{ с.}, \quad T = 2 \cdot 3600 \text{ с.}$$

Из постановки задачи (1) - (5) видно, что период управления T принят равным одним суткам. Очевидно, такая постановка корректна, если выполняется условие цикличности

$$x(iT) = x\{(i+1)T\}, \quad x = \{\lambda_1, \lambda_2\}, \quad (19)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, q$ - число рассматриваемых суток.

Для проверки условия (19) и обоснования допустимости постановки задачи с периодом, равным T , выполнены специальные эксперименты с произвольной комбинацией $c_{\text{оп}}$ и $\tau_{\text{оп}}$. Результаты расчетов показали, что при $i=0$ условие (19) не выполняется, однако, начиная с $i>1$, правые концы x по суткам стабилизируются и условие (19) выполняется.

Ниже приводятся результаты экспериментов для $c_{\text{оп}} = \text{пс.}$, $n = \overline{1,4}$, и $\tau_{\text{п}} = m\tau_{\text{оп}}$ при $m=3$ и 4, т.е. $\tau = 6 \cdot 3600$ с и $\tau = 8 \cdot 3600$ с, как наиболее приемлемые варианты с точки зрения практической реализации, поскольку при этом предполагается, что в ночное время в течение 6 или 8 часов мощность снижается на величину $1 - c_{\text{оп}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Значения поглощения нейтронов ксеноном поинтервально за период T

с	$\tau = 6 \cdot 3600$ с			$\tau = 8 \cdot 3600$ с		
	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$	$\int_0^1 F dt, 10^{17}$
	см ⁻²	см ⁻²	см ⁻²	см ⁻²	см ⁻²	см ⁻²
1,0	0,3239	0,9717	1,2956	0,43188	0,86376	1,2956
0,8	0,27825	0,9484	1,2266	0,37194	0,83333	1,20527
0,6	0,2258	0,9295	1,1553	0,30368	0,8078	1,11148
0,4	0,16437	0,9165	1,0809	0,22328	0,78964	1,01292
0,2	0,09057	0,91183	1,0024	0,12497	0,78263	0,9076

где F - подынтегральное значение выражения (1).

Определим относительное уменьшение поглощения нейтронов

$$\Delta J = 1 - \frac{\int_0^T F(c) dt}{\int_0^T F(c=1) dt}.$$

и построим зависимость ΔJ от c (рис.1). Как видно, чем меньше c , тем больше ΔJ и тем больше недовыработка электроэнергии $\Delta \mathcal{E} = U\tau(1-c)$ (табл. 2, рис. 1).

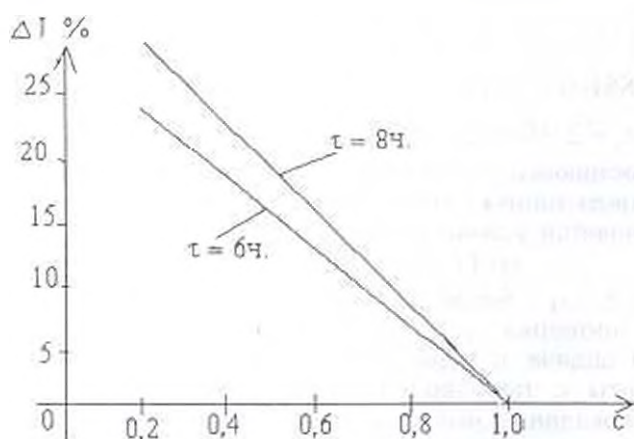


Рис. 1. Выигрыш в поглощении нейтронов при различной выработке энергии

Представлены значения $\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E} / \mathcal{E}_{\text{ном}} = U\tau(1-c) / 24U = \tau(1-c) / 24\%$, при различных c и τ , где $\mathcal{E}_{\text{ном}} = TU$ - выработка электроэнергии при работе реактора на номинальной мощности U (табл.2).

Таблица 2

Значения относительной недовыработки энергии $\Delta\mathcal{E}$, %

ϵ	$\Delta\mathcal{E}$, % при $\tau=6$ ч	$\Delta\mathcal{E}$, % при $\tau=8$ ч
1,0	0	0
0,8	5	6,66
0,6	10	13,32
0,4	15	20,0
0,2	20	26,66

Как видно, с уменьшением параметра ϵ относительная недовыработка электроэнергии увеличивается, достигая 20% ($\tau=6$ ч) и 26,66% ($\tau=8$ ч). Увеличение ΔJ следует объяснить главным образом уменьшением выработки электроэнергии.

Для оценки эффекта оптимизации режима реакторной установки необходимо провести сравнение уменьшения поглощения нейтронов при заданной выработке электроэнергии. Например, рассмотрим два режима.

Первый режим: $\epsilon=0,2$ на $[0,8]$, $\epsilon=1$ на $(8,24]$

Выработка электроэнергии, отнесенная к U , составляет $\mathcal{E}_1/U=17,6$.

Поглощение нейтронов, согласно табл.1, $J_1=0,9076 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Второй режим: $\epsilon=1$ на $[0,17,6]$,

$\mathcal{E}_2/U=17,6$, $J_2=1,2956 \cdot 17,6 / 24 = 0,95 \text{ см}^{-2}$.

$\Delta J=J_2-J_1=0,043 \text{ см}^{-2}$, $\Delta J/J_1=0,045$ или 4,5%, т.е. в данном случае эффект оптимизации составляет 4,5% в сутки. Аналогичным образом вычислены эффекты оптимизации при различных ϵ и τ (рис. 2), откуда видно, что с уменьшением ϵ и увеличением τ эффект оптимизации режима значителен.

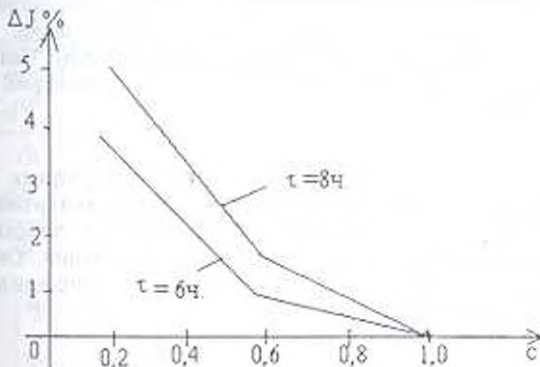


Рис. 2. Выигрыш в поглощении нейтронов при постоянной выработке энергии

В силу этого, если управление реактором вести оптимально в течение всей кампании, то в среднем можно добиться до 3—4% экономии ядерного топлива с выработкой заданного количества электроэнергии за кампанию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал М.В., Семенов В.В. Оценка экономически целесообразного времени продления кампании водо-водяных реакторов АЭС // Атомные электрические станции. - 1980. - Вып. 3. - С. 157-162.
2. Хрусталеv В.А. К вопросу об оптимальном продлении кампании мощных блоков АЭС с ВВЭР в энергосистемах // Изв. вузов. Энергетика. - 1987. - № 8. - С. 81-84.
3. Аккерман Г., Хампель Р. Эксплуатация АЭС с водо-водяным реактором во время удлинения кампании при работе на мощностном эффекте // Теплоэнергетика. - 1982. - № 7. - С. 71-73.
4. Пат. Д8818935, США HMSO. Xenon suppression in a nuclear fueled electric power generation system. G.W. Mark, R.F. Barry. Открытия. Изобретения. 1984. - № 7102.
5. Габасов Р., Кириллова Ф.М. Особые оптимальные управления. - М.: Наука. 1973. - 256 с.
6. Рудик А.П. Оптимизация физических характеристик ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1979. - 280 с.

Арматом, МАИ

14.08.1997

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 3, 1998, с. 314-322

УДК 621.313.33.01

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Л. АРЕШЯН

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Ասինխրոն շարժիչներում անցումային գործընթացների հետազոտման առաջարկվող նոր մեթոդը կիսվելով ուսուրի արագության և շարժիչի հոսանքների լուծումների՝ ժամանակային ծախսերի մեջ անալիտիկ կառուցման վրա՝ հաշվի առնելով լարման հաճախականության և դիֆազորային մասնիկի փոփոխությունները: Առաջարկված մեթոդը հայտնի մեթոդներից առաջնորդում է, նրանով, որ չի պահանջում բնութագրական հավաքարկների սրմանների որոշում:

Предлагается новый метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе, основанный на построении аналитических решений скорости ротора и токов двигателя во временной плоскости с учетом изменения напряжения, частоты и момента сопротивления. Он отличается от известных методов тем, что не требует определения корней характеристических уравнений.

Библиогр.: 4 назв.

The new method proposed for computation of transition processes in asynchronous engine is based on construction of analytical solutions for rotor velocity and engine currents in the time plane, taking into account voltages, frequencies and moment of resistance. The proposed method is different from the known ones in that it does not require the determination of roots of the characteristic equations.

Ref. 4.