

ренции. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. С. 226 – 232.

10. И в у ш к и н К.А., Г р а ч е в В.В., М ы ш л я е в Л.П., Ц и р я п к и н а А.В., К и с е л е в С.Ф. Современная система автоматизации управления углеобогащательной фабрики. – В кн.: Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. статей / Под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 203 – 211.

© 2016 г. Л.П. Мышляев, О.Н. Лысенко, В.В. Грачев, Н.Л. Лысенко, М.В. Шипунов, С.В. Прокофьев
Поступила 26 августа 2016 г.

© 2016 г. Л.П. Мышляев, О.Н. Лысенко, В.В. Грачев, Н.Л. Лысенко, М.В. Шипунов, С.В. Прокофьев
Поступила 26 августа 2016 г.

УДК 681.51

Л.П. Мышляев¹, В.Ф. Евтушенко¹, В.Н. Бурков², К.А. Ивушкин³, Г.В. Макаров¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

³ОК «Сибшахтострой»

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ ФИЗИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ¹

Одним из эффективных вариантов систем управления, функционирующих в условиях неопределенности, вызванной отсутствием математической модели внутренних механизмов процессов и наличием действующих неконтролируемых возмущений, являются системы с прогнозирующими физическими моделями. Физические модели в этих системах могут быть представлены, в частности, действующими установками с протекающими в них технологическими процессами преобразования энергии и вещества. Прогнозирующий режим функционирования таких физических моделей, которые являются, как правило, малоразмерными, обеспечивается ускоренным временем протекания технологического процесса [1]. Физической моделью можно считать также и коллектив специалистов – экспертов, участвующих в деловой игре и имитирующих соответствующие процессы в социальных или социально-экономических системах.

Несмотря на возможные различия физической природы объектов и моделей, решаемых задач управления и других общей их структурной особенностью является наличие взаимодействующих друг с другом модельной и натурной систем управления. Причем для

успешного функционирования системы управления в целом они должны быть подобны [2].

Необходимость подобия натурной и модельной систем при разработке, исследовании и сопровождении систем управления с прогнозирующей физической моделью в доступных нам публикациях, в том числе и в работе [1], не отмечается. Кроме того, результаты проведенного анализа этих публикаций [2] показали, что практически отсутствуют и общие разработки по проблеме подобия систем управления в целом и их отдельных элементов. В последнее время в этом направлении начаты работы по оцениванию, исследованию и управлению подобием систем управления [2 – 8]. Полученные здесь предварительные результаты, в частности, связанные с основными утверждениями, условиями и показателями подобия систем управления в целом, совместным подобием объектов управления и внешних воздействий, управлением подобием систем, позволяют надеяться на их дальнейшее развитие, в том числе и в области практических приложений.

Типы систем управления с прогнозирующей физической моделью

Рассмотрим два возможных типа систем управления с использованием физической модели управляемого объекта [3]. В системах первого типа (рис. 1) натурная и модельная системы управления функционируют парал-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 15-07-02231.

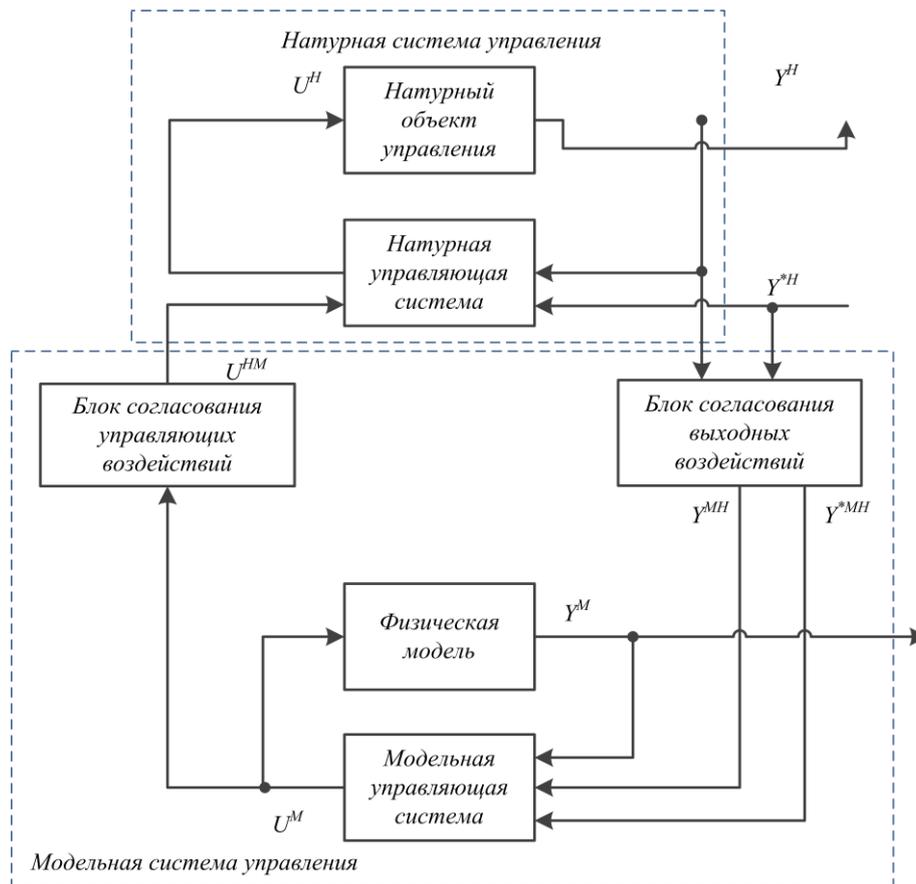


Рис. 1. Структура системы первого типа

тельно, а результаты выработки модельных управляющих воздействий после их соответствующего пересчета передаются в управляющую часть натурной системы, например, в виде советов. На рис. 1 приняты обозначения: U и Y – векторы управляющих и выходных воздействий; надстрочные индексы обозначают: «н» – натурное, «м» – модельное, * – задающее воздействия; «нм» – пересчитанное для натурального объекта модельное управляющее воздействие; «мн» – пересчитанное для физической модели натурное выходное воздействие. Такая схема взаимодействия натурной и модельной систем управления имеет место при решении различного рода исследовательских задач, требующих использования физических моделей.

Ко второму типу относятся системы управления с физической прогнозирующей моделью, отличительной особенностью которых является то, что модельная система представляет собой составную часть натурной системы управления, непосредственно встроенную в ее управляющую систему (рис. 2). В общем виде условие подобия такой системы может быть записано в виде следующего соотношения:

$$\varphi^H \cup f^H \equiv \phi(\varphi^M \cup f^M), \quad (1)$$

где φ^H , φ^M – математические модели возмущенного движения – каналов преобразования отклонений относительно опорных уровней входных в соответствующие отклонения выходных воздействий объекта управления и его физической модели; f – алгоритм управления; ϕ – функция согласования по времени и координатам; \cup – символ объединения; \equiv – равенство по определению.

При выполнении условия (1) алгоритм управления f^H равен

$$\varphi^H = \phi \frac{\varphi^M f^M}{1 + \varphi^M f^M}. \quad (2)$$

Тогда выражение (1) можно записать

$$\varphi^H \cup \phi \frac{\varphi^M f^M}{1 + \varphi^M f^M} = \phi(\varphi^M \cup f^M). \quad (3)$$

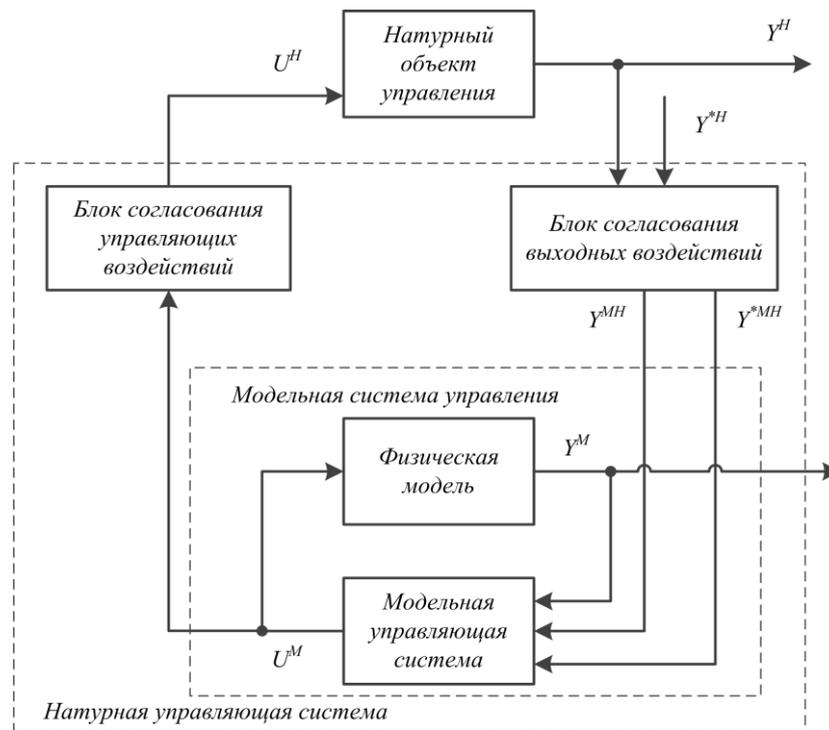


Рис. 2. Структура системы второго типа

Конкретизируя в соответствии с рис. 2 объединение \cup , получим

$$\frac{\varphi^i \phi \frac{\varphi^m f^m}{1 + \varphi^m f^m}}{1 + \varphi^m \phi \frac{\varphi^m f^m}{1 + \varphi^m f^m}} = \phi \frac{\varphi^m f^m}{1 + \varphi^m f^m}. \quad (4)$$

Из условия (4) с учетом ограничений на устойчивость натуральных и модельных систем можно получить аналитические выражения для пересчета модельных значений воздействий в их натурные значения и наоборот.

Структура системы управления с прогнозирующей физической моделью

Учитывая результаты отмеченных исследований, применительно к системам второго класса развита структура системы управления с прогнозирующей физической моделью, представленная на рис. 3. В ней приняты следующие обозначения: \square – элементы натурной системы управления; \rightarrow – информационные воздействия; \cup – измерительные блоки, включая неполноту контроля и ошибки измерения; \ominus – исполнительные блоки, включая ошибки реализации управляющих сигналов; \square – элементы модельной системы управления; \Rightarrow – материальные и энергетические воздействия натурального объекта; \Rightarrow – материальные и энергетические воздействия физической модели; \square – расчетные блоки обра-

ботки данных; $Z = \{U; W; Y; S\}$ – управляющие, внешние, выходные воздействия и переменные состояния; t и i – непрерывное и дискретное время соответственно; δ – приращения, отклонения воздействий; $(i_{0j}; i_{0j} + H_j)$ – интервал прогнозирования на j -м цикле управления; надстрочные индексы «D», «O», «ф», «к», «оф» означают принадлежность, соответственно, к действительным значениям воздействий, натурному объекту управления, его физической модели, корректирующим воздействиям, значениям воздействий натурального объекта, пересчитанных в масштаб воздействий его физической модели; подстрочные индексы «к», «пр», «l» означают принадлежность к контролируемым, приведенным к выходу воздействиям и к началу цикла технологического процесса, соответственно.

При формировании структуры системы управления ориентировались на следующие положения.

1. Натурная и модельная системы управления являются подобными, т.е. удовлетворяют требуемым показателям и условиям подобия [3].

2. Приведенные к выходу объекта возмущающие воздействия $\delta Y_{пр}(i)$, являющиеся интегральной оценкой неконтролируемых возмущений, выраженные в масштабе изменения выходных воздействий [9], содержат низкочастотные составляющие, что позволяет экстраполировать их на конечный интервал времени.

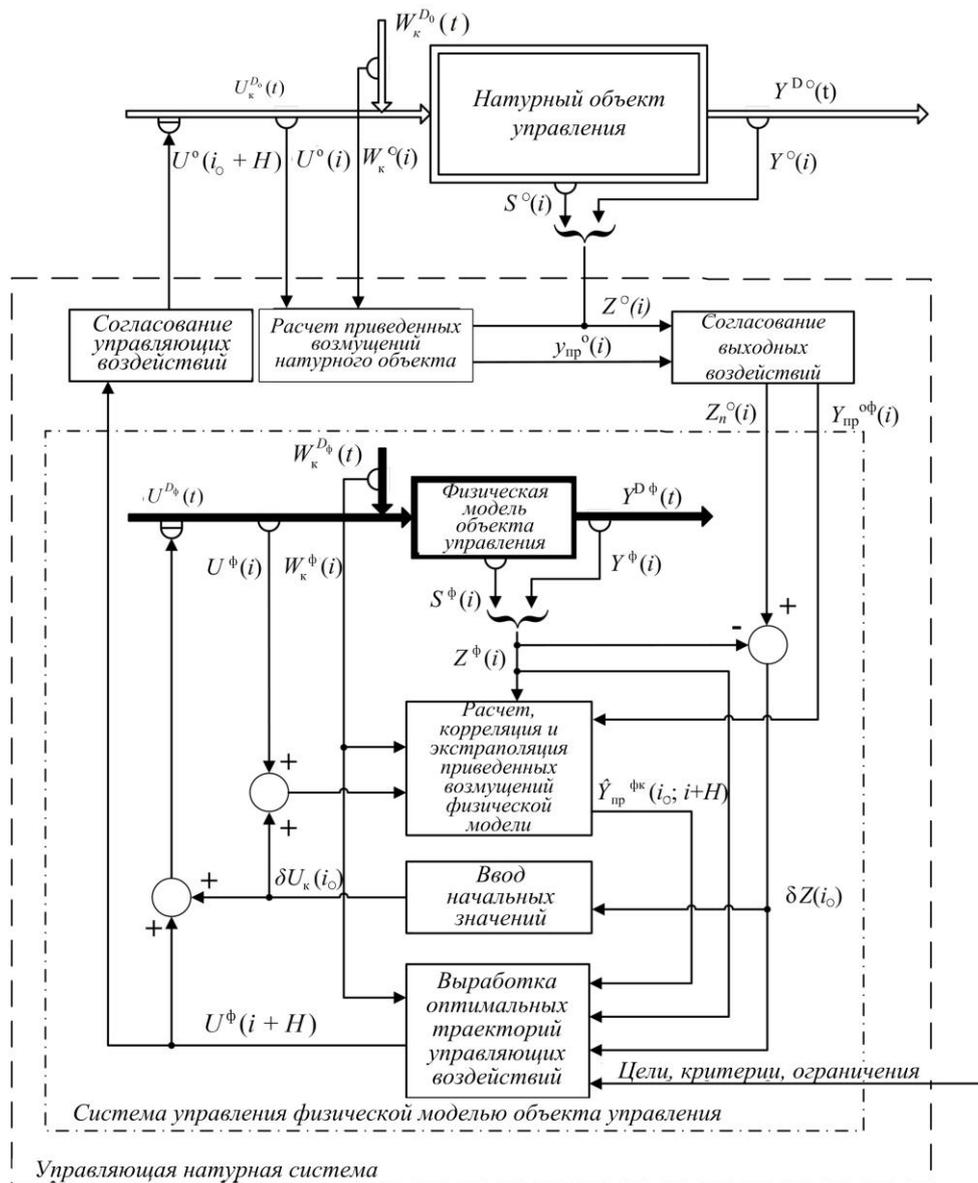


Рис. 3. Система управления с физической прогнозирующей моделью

3. Процесс управления объектом разбит на циклы управления, длительность каждого из которых ΔT_j ($j=1, J$) ограничивается сверху допустимой дискретностью управления, а снизу – допустимым коэффициентом ускорения времени для физической модели с учетом длительности интервала оптимизации. Число циклов управления J определяется на интервале времени, соответствующем длительности управляемого процесса для циклического, либо пропорциональном памяти системы для непрерывного объекта управления.

В состав системы управления входят как натуральный объект управления, так и его физическая модель, воспроизводящая в ускоренном масштабе времени управляемый процесс, подобный процессу натурального объекта, и совокупность программно-технических средств для реализации требуемых функций управления, в

том числе и для установления соответствия между воздействиями и состояниями натурального объекта и его физической модели.

Функционирование системы

Описание функционирования системы управления с прогнозирующей физической моделью выполним с использованием укрупненной структурной схемы алгоритма, представленной на рис. 4. Логика функционирования алгоритма соответствует схеме системы управления, приведенной на рис. 3. В алгоритме для каждого j -го цикла управления предусматривается реализация следующих основных функций.

1. *Ввод и проверка достоверности исходных данных.* Состояние натурального объекта управления и его физической модели на каждом j -м цикле управления оценивается соответ-

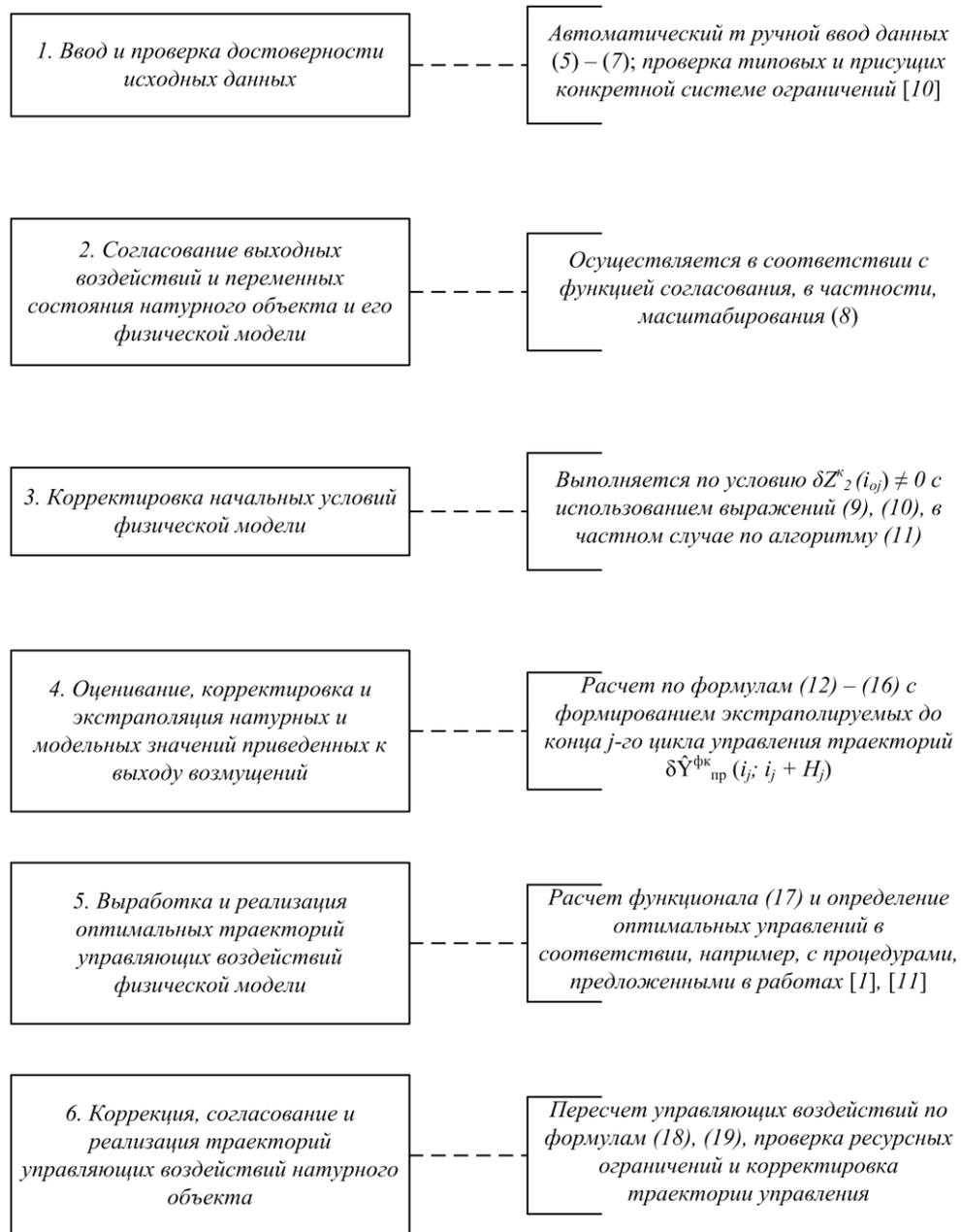


Рис. 4. Укрупненная схема алгоритма управления с прогнозирующей физической моделью

ственно на основе данных об изменении входных значений $Z_1^o(i_j); Z_1^\Phi(i_j)$

$$Z_1^o(i_j) = \{U^o(i_j); W_k^o(i_j)\}; Z_1^\Phi(i_j) = U^\Phi(i_j); W_k^\Phi(i_j), i_{0j} \leq i_j \leq i_{mj}, \quad (5)$$

выходных воздействий и переменных состояний $Z_2^o(i_j); Z_2^\Phi(i_j)$

$$Z_2^o(i_j) = \{Y^o(i); S^o(i)\}; Z_2^\Phi(i_j) = \{Y^\Phi(i); S^\Phi(i)\}, i_{0j} \leq i_j \leq i_{mj}, \quad (6)$$

$$Z^o(i_j) = \{Z_1^o(i_j); Z_2^o(i_j)\}; Z^\Phi(i_j) = \{Z_1^\Phi(i_j); Z_2^\Phi(i_j)\}, i_{0j} \leq i_j \leq i_{mj}, \quad (7)$$

где подстрочный индекс «т» означает конец цикла управления.

При вводе этих данных в процессе функционирования системы управления целесообразно предусмотреть автоматический и ручной режимы. Проверка достоверности должна включать как типовые операции, так и учитывающие особенности объекта управления и конкретику реализуемых функций [10].

2. *Согласование значений выходных воздействий и переменных состояния натурального объекта и его физической модели.* Натурный

объект управления и его физическая модель функционируют в различных координатных и временных масштабах. Поэтому для эффективного функционирования системы необходимо наряду с подобием натурной и модельной систем управления согласовать между собой траектории изменения выходных воздействий и переменных состояния натурального объекта и его физической модели. Такое согласование можно обеспечить за счет преобразования значений $Z_2^o(i_j)$, в частности с помощью функции масштабирования $F_m^z\{\cdot\}$, в масштаб изменения значений выходных воздействий физической модели $Z_2^{o\phi}(i_j)$:

$$Z_2^{o\phi}(i_j) = F_m^z\{Z_2^o(i_j)\}, i_{0j} \leq i_j \leq i_{mj}. \quad (8)$$

Полученные в результате преобразования (8) значения $Z_2^{o\phi}(i_j)$ изменяются в одном и том же диапазоне значений и масштабе времени, что и значения $Z_2^\phi(i_j)$ физической модели.

3. *Корректировка начальных условий физической модели.* В начале каждого цикла управления значения $Z_2^{o\phi}(i_j)$ и $Z_2^\phi(i_j)$ сравниваются и рассчитывается их отклонение

$$\delta Z_2^k(i_{0j}) = Z_2^{o\phi}(i_{0j}) - Z_2^\phi(i_{0j}). \quad (9)$$

Если $\delta Z_2^k(i_{0j}) \neq 0$, то осуществляется расчет и реализация корректирующих управляющих воздействий $\delta U^{\phi k}(i_{0j})$:

$$\delta U^{\phi k}(i_{0j}) = f^k\{\delta Z_2^k(i_{0j})\}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (10)$$

где $f^k\{\cdot\}$ – алгоритм корректирующего управления начальными условиями физической модели (для j -го цикла управления) с целью приведения значений ее выходных воздействий и переменных состояния $Z_2^{\phi k}(i_{0j})$ до уровня, соответствующего (с точностью до погрешностей контроля и исполнения управляющих команд) значениям натурального объекта.

В частности, корректировка начальных условий j -го цикла управления физической модели может осуществляться также путем изменения длительности цикла управления, например в соответствии с алгоритмом

$$\Delta\tau(i_{0j}) = \begin{cases} k_1 \delta Z(i_{0j}) & \text{при } \delta Z(i_{0j}) \leq 0; \\ k_2 \delta Z(i_{0j}) & \text{при } \delta Z(i_{0j}) \geq 0, \end{cases} \quad (11)$$

где $\Delta\tau(i_{0j})$ – корректировка длительности j -го цикла управления физической модели; k_1 и k_2 – пересчетные коэффициенты, выбираемые эмпирически.

4. *Оценивание, корректировка и экстраполяция натуральных и модельных значений приведенных к выходу возмущений.* После корректировки начальных условий и приведения физической модели в состояние, эквивалентное (с учетом масштабных преобразований) состоянию натурального объекта, физическая модель функционирует в ускоренном по отношению к реальному объекту масштабе времени на j -м цикле управления. Выработка траекторий управляющих воздействий $U^\phi(i_j; i_j + h_j)$ осуществляется на j -м цикле управления с использованием предварительно согласованных в блоке 2 данных об изменении $Y^\phi(i_j)$, $S^\phi(i_j)$, $W_k^\phi(i_j)$, а также с учетом приведенных к выходу физической модели возмущений $\delta Y_{np}^\phi(i_j)$. Оценивание, корректировка и экстраполяция последних осуществляется по следующей схеме.

Первоначально в блоке расчета приведенных возмущений физической модели на основе значений о ее воздействиях $Y^\phi(i_j)$, $S^\phi(i_j)$, $W_k^\phi(i_j)$, $U^\phi(i_j)$, а также сигнала $\delta U^k(i_{0j})$, осуществляется расчет значений $\delta Y_{np}^\phi(i_j)$ в соответствии со следующим выражением:

$$\delta Y_{np}^\phi(i_j) = Y^\phi(i_j) - Y_0^\phi(i_j) - \varphi_s^\phi\{\delta S^\phi(i_j)\} - \varphi_u^\phi\{\delta U^\phi(i_j)\} - \varphi_w^\phi\{\delta W_k^\phi(i_j)\} - \varphi_u^{\phi k}\{\delta U^{\phi k}(i_{0j})\}, \quad (12)$$

где $Y_0^\phi(i_j)$ – опорный уровень выходных воздействий физической модели; $\varphi_s^\phi\{\cdot\}$; $\varphi_u^\phi\{\cdot\}$; $\varphi_w^\phi\{\cdot\}$ – математические модели каналов преобразования физической модели, отражающие влияние отклонений состояний $\delta S^\phi(i_j) = S^\phi(i_j) - S_0^\phi(i_j)$, управляющих воздействий, в том числе и корректирующих $\delta U^\phi(i_j) = U^\phi(i_j) - U_0^\phi(i_j)$, контролируемых возмущений $\delta W_k^\phi(i_j) = W_k^\phi(i_j) - W_{k0}^\phi(i_j)$ (относительно их соответствующих опорных уровней $S_0^\phi(i_j)$, $U_0^\phi(i_j)$, $W_{k0}^\phi(i_j)$) в соответствующие отклонения выходных воздействий физиче-

ской модели $\delta Y_s^\Phi(i_j)$; $\delta Y_u^\Phi(i_j)$; $\delta Y_w^\Phi(i_j)$. При этом предполагается, что $Y^\Phi(i_j) = Y_0^\Phi(i_j) + \delta Y_s^\Phi(i_j) + \delta Y_u^\Phi(i_j) + \delta Y_w^\Phi(i_j)$, а $\delta Y^\Phi(i_j) = \Phi_u^\Phi \{ \delta U^\Phi(i_j) + \delta U^{\Phi\kappa}(i_{0j}) \}$.

Аналогичным образом при расчете приведенных к выходу натурального объекта возмущений на основе данных о $Y^\circ(i_j)$, $S^\circ(i_j)$, $W_\kappa^\circ(i_j)$, $U^\circ(i_j)$ и математических моделей $\Phi_s^\circ \{ \cdot \}$; $\Phi_u^\circ \{ \cdot \}$; $\Phi_w^\circ \{ \cdot \}$, каналов преобразования отклонений переменных состояния $\delta S^\circ(i_j)$, управляющих воздействий $\delta U^\circ(i_j)$ и контролируемых возмущений $\delta W_\kappa^\circ(i_j)$, в отклонения выходных воздействий рассчитываются приведенные к выходу натурального объекта возмущения $\delta Y_{\text{пр}}^\circ(i_j)$ по следующему выражению:

$$\delta Y_{\text{пр}}^\circ(i_j) = Y^\circ(i_j) - Y_0^\circ(i_j) - \Phi_s^\circ \{ \delta S^\circ(i_j) \} - \Phi_u^\circ \{ \delta U^\circ(i_j) \} - \Phi_w^\circ \{ \delta W_\kappa^\circ(i_j) \}. \quad (13)$$

Эти значения преобразуются с помощью функции масштабирования $F_M^y \{ \cdot \}$ в значения $\delta Y_{\text{пр}}^{\circ\Phi}(i_j)$, которые отражают изменение приведенного возмущения натурального объекта в масштабе выходного воздействия физической модели:

$$\delta Y_{\text{пр}}^{\circ\Phi}(i_j) = F_M^y \{ \delta Y_{\text{пр}}^\circ(i_j) \}. \quad (14)$$

Полученные значения корректируются с учетом предварительно рассчитанных по выражению (12) значений сигнала $\delta Y_{\text{пр}}^\Phi(i_j)$, формируя тем самым скорректированные значения приведенных к выходу физической модели возмущений

$$\delta Y_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j) = F_\kappa^{\Phi\kappa} \{ \delta Y_{\text{пр}}^\Phi(i_j); \delta Y_{\text{пр}}^{\circ\Phi}(i_j) \}, \quad (15)$$

где $F_\kappa^{\Phi\kappa} \{ \cdot \}$ – корректирующий оператор.

Скорректированные значения отражают характер изменения приведенных к выходу натурального объекта возмущений в масштабе изменения выходных воздействий физической модели, в том числе и с учетом изменений начальных условий j -го цикла управления. Они экстраполируются на предстоящий цикл управления $\delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + h_j)$, $0 \leq h_j \leq H_j = i_{jk} - i_j$, с одновременным их представлением в виде

траектории $\delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + h_j)$, $0 \leq h_j \leq H_j = i_{jk} - i_j$, приведенных возмущений на будущем интервале от текущего момента i_j до конца j -го цикла управления i_{jk} .

Экстраполяция траектории $\delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + H_j)$ может быть, в частности, осуществлена с использованием алгоритма релейно-экспоненциального сглаживания первого порядка [10]:

$$\begin{aligned} \delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + h_j) &= \delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + h_j - 1) + \\ + \alpha_h &\begin{cases} [\delta Y_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j) - \delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j - 1; i_j + h_j - 1)] \text{при} [\cdot] \leq \beta_h; \\ \beta_h \text{sign} [\cdot] \text{при} [\cdot] > \beta_h; \end{cases} \\ &h_j = 1, \dots, H_j, \end{aligned} \quad (16)$$

где α_h и β_h – значения коэффициента сглаживания и величины ограничения.

5. *Выработка и реализация оптимальных траекторий управляющих воздействий физической модели.* В этом блоке с использованием текущих значений $Y^\Phi(i_j)$; $S^\Phi(i_j)$; $W_\kappa^\Phi(i_j)$, $i_{0j} \leq i_j \leq i_{kj}$, и экстраполированной траектории $\delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + H_j)$ осуществляется расчет функционала вида

$$q(i_j) = F_q^* \{ Y(i_j); S(i_j); W_\kappa(i_j); \delta \hat{Y}_{\text{пр}}^{\Phi\kappa}(i_j; i_j + h_j) \}, \quad i_{0j} \leq i_j \leq i_{kj}; h = \overline{1, H_j}, \quad (17)$$

где $H_j = i_{kj} - i_{0j}$ – интервал прогнозирования для j -го цикла управления; $F_q^* \{ \cdot \}$ – заданная функция конечного состояния.

Здесь также осуществляется численное дифференцирование функционала (17) при вариации начальных условий и функционировании физической модели в ускоренном масштабе времени, что позволяет определить оптимальное управляющее воздействие на предстоящий цикл управления, например, в соответствии со схемой, изложенной в работе [1], или в зависимости от свойств и условий функционирования системы управления с прогнозирующей физической моделью, а также уровня неопределенности в соответствии с процедурой [11].

6. *Коррекция, согласование и реализация траекторий управляющих воздействий натурального объекта.* Реализация управляющего воздействия $U^\Phi(i_j + h_j)$ с помощью исполнительного устройства физической модели позволяет осуществить в ускоренном масштабе времени ее требуемый технологический ре-

жим. Одновременно с этим в блоке коррекции и согласования управляющих воздействий происходит пересчет величины модельных управляющих воздействий $U^\Phi(i_j + h_j)$ в величину рабочих управляющих воздействий натурального объекта в соответствии с выражением

$$U^o(i_j + h_j) = F_m^u \{U^\Phi(i_j + h_j)\};$$

$$h = \overline{1, H_j}, i_{0j} \leq i_j \leq i_{kj} \quad (18)$$

где $F_m^u \{\cdot\}$ – функция масштабирования управляющих воздействий физической модели, которая в частном случае может быть представлена с помощью коэффициента масштабирования k_m^u , выбираемого опытным путем.

Значение $U^o(i_j + h_j)$ запоминается в порядке возрастания h_j , формируя траекторию управляющих воздействий $U^o(i_j; i_j + H_j)$ на интервале времени $(i_{0j}; i_{kj})$ j -го цикла управления. Эти траектории пересчитываются в масштаб времени функционирования натурального объекта, в частности путем изменения шага дискретизации Δ в соответствии с выражением

$$\Delta^o = k_i \Delta^\Phi, \quad (19)$$

где k_i – масштабный коэффициент дискретного времени.

Сформированные траектории управляющих воздействий $U^o(i_j; i_j + H_j)$ проверяются на возможность их практической реализации, в частности исходя из ресурсных ограничений на управления натурального объекта. И в случае их невыполнения осуществляется корректировка значений $U^o(i_j; i_j + H_j)$, удовлетворяющая ресурсным ограничениям. Скорректированная траектория реализуется в дальнейшем с помощью исполнительного устройства натурального объекта, обеспечивая оптимальный по функционалу (17) режим его технологического процесса на интервале времени $(i_{0j}; i_{kj})$ j -го цикла управления.

На следующем $(j+1)$ -ом цикле управления работа системы управления циклическим процессом осуществляется аналогичным образом, вплоть до конца циклического процесса, если объект управления является циклическим, либо до конца интервала памяти системы управления непрерывным объектом.

Выводы. Систему управления с прогнозирующей физической моделью в зависимости от ее цели, назначения и характера решаемых задач целесообразно представлять в виде параллельно взаимодействующих друг с другом натурной и модельной систем управления, либо в виде модельной системы, непосредственно встроенной в управляющую часть натурной системы управления. Эффективное функционирование систем управления с прогнозирующей физической моделью второго класса может быть обеспечено при наличии подобия модельной и натурной систем управления, согласования входных, выходных воздействий и переменных состояния натурального объекта управления и его физической модели, что позволяет оптимальные управляющие воздействия, выработанные в модельной системе управления в ускоренном масштабе времени, перенести на натурную систему.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красовский А.А. Оптимальное управление посредством физической прогнозирующей модели // Автоматика и телемеханика. 1979. № 2. С. 156 – 162.
2. Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Березин Д.Г., Макаров Г.В., Ивускин К.А. Понятия и условия подобия систем управления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 56 – 58.
3. Евтушенко В.Ф., Старовацкая С.Н., Мышляев Л.П., Ивускин К.А. Подобие систем управления с прогнозирующими физическими моделями. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Тр. IX Всерос. науч.-практ. конф.; Под ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2013. С. 32 – 38.
4. M u s h l y a e v L.P., E v t u s h e n k o V.F., B e r e s i n D.G., M a k a r o v G.V., I v u s h k i n K.A. Simulation of Control Systems // Steel in Translation. 2012. Vol. 42. № 12.
5. Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Зельцер С.Р., Венгер К.Г., Чичиндаев М.Г. Применение физических моделей в схемах натурно-математического моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 65 – 67.
6. Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Ивускин К.А., Макаров Г.В. О подобии натурной и модельной

- систем при управлении с физической прогнозирующей моделью // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 40 – 42.
- 7.** Е в т у ш е н к о В.Ф., М ы ш л я е в Л.П., Д м и т р и е в В.О., М а к а р о в Г.В. О подобии систем в задачах управления нестационарными объектами. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Тр. IX Всерос. науч.-практ. конф.; Под ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2013. С. 58 – 62.
- 8.** М а к а р о в Г.В., Е в т у ш е н к о В.Ф. Численные исследования подобия систем регулирования по контролируемым возмущениям // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 65, 66.
- 9.** Р о т а ч В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 439 с.
- 10.** Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово, М.:Издат. объединение «Российские университеты»:Кузбассвузиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
- 11.** М ы ш л я е в Л.П., С т а р о в а ц к а я С.Н. Развитие метода динамического программирования для условий неопределенности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 40 – 42.
- © 2016 г. Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, В.Н. Бурков, К.А. Ивушкин, Г.В. Макаров.
Поступила 22 сентября 2016 г.