$$\gamma_k = [R_1 + B_k^T T_{k+1}^1 B_k]^{-1} B_k^T, \tag{4.4}$$
$$T_k^1 = Q + A_k T_{k+1}^1 [A_k - B_k K_k^1],$$

$$T_k^2 = T_{k+1}^2 + [\Gamma_k - B_k K_k^2]^T T_{k+1}^1 [\Gamma_k - B_k K_k^2] + \\ + [K_k^2]^T R K_k^2 + 2[\Gamma_k - B_k K_k^2] T_k^3, \tag{4.5}$$

$$T_k^3 = [A_k - B_k K_k^1]^T [T_{k+1}^1 \Gamma_k + T_{k+1}^3], \tag{4.6}$$

$$T_k^4 = -Q M_k + [A_k - B_k K_k^1]^T T_{k+1}^1 \times \\ \times (c_k - B_k k_k^3 - M_{k+1}) + [K_k^1]^T R k_k^3 + T_{k+1}^4, \tag{4.7}$$

$$T_k^5 = [K_k^2]^T R k_k^3 + [\Gamma_k - B_k K_k^2] T_{k+1}^3 \times \\ \times (c_k - B_k k_k^3 - M_{k+1}) + (c_k - M_{k+1}) T_{k+1}^3 + T_{k+1}^5, \tag{4.8}$$

$$T_k^6 = M_k^T Q M_k + [k_k^3]^T R k_k^3 + \\ + [c_k - B_k k_k^3 - M_{k+1}]^T T_{k+1}^1 (c_k - B_k k_k^3 - M_{k+1}) + T_{k+1}^6 \tag{4.9}$$

с краевыми условиями для матриц:

$$T_N^1 = S, \quad T_N^i = 0, \quad i = 2, 3, \ldots, 6. \tag{4.10}$$

Вид оптимального управления (4.2) обусловлен использованием для его построения метода динамического программирования [11]. Точка $x_k^* = z^*$, $w_k^* = \Phi^*$ является решением задачи

$$\max_{\substack{x \in \bar{X}_k,\\ w \in W_k}} \Delta_k(x, z^*, w, \Phi^*) = \min_{z,\Phi} \max_{\substack{x \in \bar{X}_k,\\ w \in W_k}} \Delta_k(x, z, w, \Phi), \tag{4.11}$$

$$\Delta_k(x, z, w, \Phi) = [F_k(x, w) - F_k(z, \Phi)]^2,$$

где $F_k(x, w) = x^T T_k^1 x + w^T T_k^2 w + 2x^T T_k^3 w + 2T_k^4 x + 2T_k^5 w + T_k^6$.

Для решения экстремальной задачи (4.11) необходимо построить по получению текущего измерения y_k информационное множество $\bar{X}_k$ [11, 19]

$$\bar{X}_k = X_{k/k-1} \cap X[y_k], \quad k = 1, 2, \ldots, N, \tag{4.12}$$

где

$$X_{k/k-1} = A_{k-1}\bar{X}_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + \\ + \Gamma_{k-1}W_{k-1} + c_{k-1} \tag{4.13}$$

множество прогнозов, а сумма множеств в (4.13) понимается в смысле Минковского [19]. Произведения $A_{k-1}\bar{X}_{k-1}$ и $\Gamma_{k-1}W_{k-1}$ в (4.13) понимаются как произведения всех элементов множеств $\bar{X}_{k-1}$ и W_{k-1} на соответствующие матрицы A_{k-1} и Γ_{k-1} [11, 19]. Множество $X[y_k] = \{x: x + v = y_k, v \in V_k\}$ называется совместимым с результатами измерений y_k [19]. Алгоритмы построения информационного множества $\bar{X}_k$, множества $X[y_k]$ рассмотрены, например, в [19–21].

Рассмотрим решение задачи (4.11) считая, что оптимальное управление имеет вид (4.2). Пусть

$$f_k^1 = \min\{F_k(x, w) | x \in \bar{X}_k, w \in W_k\}; \\ f_k^2 = \max\{F_k(x, w) | x \in \bar{X}_k, w \in W_k\}, \tag{4.14}$$

тогда в точке x_k^*, w_k^*, являющейся решением (4.11), выполняется условие

$$\frac{1}{2}(f_k^1 + f_k^2) = F_k(x, w) = F_k(x_k^*, w_k^*). \tag{4.15}$$

Таким образом, значения x_k^*, w_k^* находим как решение уравнения (4.15). Условие (4.15) в общем случае определяет множество решений

$$\Omega_k^* = \\ = \{(x, w)^T | F_k(x, w) = \frac{1}{2}(f_k^1 + f_k^2), x \in \bar{X}_k, w \in W_k\}. \tag{4.16}$$

Использование численных методов оптимизации для квадратичной функции (4.14) позволит получить вектор $(x_k^*, w_k^*) \in \Omega_k^*$ в k-й момент времени. В уравнениях (4.3)–(4.9), решаемых в обратном времени, участвуют матрицы A_k, B_k, Γ_k и вектор c_k, значения которых находятся в результате линеаризации (1.1) с использованием частных производных, вычисленных в соответствующей точке [18]

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k, p_k, w_k)}{dx_k}, \quad B_k = \frac{\partial f(x_k, u_k, p_k, w_k)}{du_k},$$
$$c_k = f(x_k, u_k, p_k, w_k) - A_k x_k - B_k u_k.$$

Применив описанный алгоритм к задаче поиска управления поведением предприятия на конкурентном рынке, можно говорить о решении задачи управления поведением. В реальном времени на основании вышеизложенного алгоритма синтеза, с учетом текущего точного состояния рынка и множества неопределенностей производится расчет управляющих воздействий. Таким образом, алгоритмическое обеспечение становится чувствительным к изменению условий функционирования предприятия вследствие действия различных факторов, главным из которых являются действия конкурентов, а также к неточностям в имеющейся информации о состоянии рынка.

5. Реализация алгоритма поиска оптимального управления. Задача синтеза управления поведением предприятия на конкурентном рынке заключается в определении закона управления, зависящего от текущего состояния рынка, доставляющего минимум функционалу (1.2). Допустим, что один оператор представлен обособленно, а остальные со-