

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ И ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

Л.А. Денисова (ОмГТУ)

Рассмотрена адаптивная система управления с прогнозирующей моделью, синтезированной в виде оптимального предсказателя обобщенного выходного сигнала системы управления. Предлагается подход к обеспечению устойчивой работы системы, основанный на включении блока анализа устойчивости в механизм адаптации для изменения структуры системы при неустойчивости замкнутого контура и оценивании объекта управления как неминимально-фазового. Представлены результаты модельных исследований адаптивной системы, полученные средствами MATLAB / Simulink.

Ключевые слова: адаптивная система управления; идентификация, прогнозирующая модель, устойчивость, неминимально-фазовость, перестраиваемая структура.

Введение

Системы автоматического управления (САУ) объектов энергетики (агрегатов энергоблоков, автономных энергетических установок) функционируют в условиях зашумленности данных измерений и значительной априорной неопределенности. При наличии внешних и внутренних возмущающих воздействий на объекты управления меняются их динамические и статические характеристики [1, 2], что влечет за собой трудности при оценивании их текущих состояний. Поэтому современные САУ должны быть способны обеспечить цель управления в условиях неполноты априорной информации об объекте управления и воздействиях окружающей среды.

Таковыми свойствами обладают адаптивные системы управления, в основу которых положены принципы получения и обработки наблюдений за параметрами объекта в процессе функционирования с целью синтеза оптимальных управляющих воздействий. Известно, что в зависимости от принципа построения механизма адаптации различаются адаптивные системы с идентификацией, содержащие настраиваемую модель объекта управления, и системы с прямой адаптацией, непосредственно настраивающие параметры закона управления [3, 4]. Если в адаптивной системе с идентификацией настраиваемая модель синтезируется в виде оптимального предсказателя выходного сигнала объекта управления или обобщенного выходного сигнала системы управления то система относится к классу адаптивных САУ с прогнозирующей моделью [5]. При этом процессы управления и идентификации (оценивания параметров) являются взаимосвязанными через ошибку прогноза.

В статье представлены результаты разработки и модельных испытаний адаптивной САУ, основанной на применении настраиваемой прогнозирующей модели, синтезированной в виде оптимального предсказателя обобщенного выходного сигнала системы управления. С целью обеспечения устойчивого функционирования в различных режимах работы в механизм адаптации включен блок анализа устойчивости, служащий для изменения структуры САУ. Если по результатам идентификации система неустойчива и объект оценивается как неминимально-фазовый, изменяется стратегия управления. Выполняется пе-

реход от стратегии управления с прямой адаптацией (выбранной в качестве базовой) к управлению с идентификацией параметров объекта с факторизацией неустойчивого полинома числителя оценки его передаточной функции. В качестве типового технологического объекта рассмотрен канал регулирования уровня жидкости в резервуаре, включающий исполнительный механизм с регулирующим клапаном и представленный передаточной функцией второго порядка.

Разработанная адаптивная САУ предназначена для реализации на микропроцессорных регуляторах ВЛР-2, созданных в ЗАО "Автоматика-Э" (г. Омск) для работы на объектах тепловой и атомной энергетики [1, 2, 6], где в настоящее время проводится модернизация средств автоматизации. Для моделирования адаптивной САУ использована интерактивная среда MATLAB с пакетом расширения Simulink [7], позволяющая исследовать динамические системы и выполнять матричные вычисления.

Постановка задачи

Для решения задачи управления в условиях изменения характеристик объекта управления реализовано построение адаптивной системы с настраиваемой прогнозирующей моделью. С этой целью в механизм адаптации включена модель объекта управления.

Условия функционирования объекта описываются в виде разностного стохастического уравнения [4, 5]

$$A(z^{-1})P_t = z^{-1}B(z^{-1})u_t + \xi_t, \quad (1)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}, \quad B(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i z^{-i}, \quad (2)$$

где u_t и P_t — значения управляющего воздействия и выхода объекта в дискретные моменты времени соответственно, ξ_t — последовательность независимых случайных величин с нулевым средним и конечной дисперсией σ_{ξ}^2 , z^{-1} — оператор запаздывания во временной области. Шумовой составляющей представляется влияние на выход объекта случайных воздействий, неучтенных в уравнениях (1) и (2).

Задача управления ставится как задача обеспечения минимума критерия качества управления (минимальной обобщенной дисперсии ошибки управления), представленного в виде:

$$I(u_t) = M \left\{ (P_{t+1} - P_t^S)^2 + [L(z^{-1})u_t]^2 \right\}, \quad (3)$$

где M — символ математического ожидания, P_t^S — заданное значение регулируемого параметра в t -момент времени, $L(z^{-1})$ — полином весовых коэффициентов. Для предотвращения значительных изменений управляющего воздействия полином $L(z^{-1}) = \lambda^{1/2} - \lambda^{1/2}z^{-1}$, где λ — весовой коэффициент.

Текущее управляющее воздействие определяется из условия:

$$u_t^* = \arg \min_{u_t \in \Omega_u} I(u_t),$$

$$\Omega_u = \{u_t : u_{\min} \leq u_t \leq u_{\max}, (u_{t+1} - u_t) \leq \delta_u\}, \quad (4)$$

где Ω_u — область допустимых управляющих воздействий; u_{\min} , u_{\max} — допустимые пределы изменения управляющего воздействия и δ_u — ограничение на скорость его введения.

Закон управления и структура реализующего его регулятора синтезированы с помощью метода прямой адаптации с прогнозирующей моделью [8]. Для этого критерий качества (3) представляется в следующем виде:

$$I(u_t) = M \left\{ (P_{t+1}^* - P_t^S)^2 + [L(z^{-1})u_t]^2 \right\} + \sigma_\xi^2, \quad (5)$$

где оптимальный прогноз выхода объекта на шаг вперед определяется по формуле $P_{t+1}^* = F(z^{-1})P_t + B(z^{-1})u_t$, и полином $F(z^{-1})$ находится из соотношения $1 = A(z^{-1}) + z^{-1}F(z^{-1})$, $F(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_u} f_i z^{-i}$, причем $\sigma_\xi^2 = M \{(\xi_{t+1})^2\}$, $\xi_{t+1} = P_{t+1} - P_{t+1}^*$.

С целью упрощения вычислений при определении оптимального управляющего воздействия вводится функция обобщенного выхода системы управления Φ , [8, 9], прогноз которой на шаг вперед определяется по выражению, минимизирующему критерий (5), следующим образом:

$$\Phi_{t+1}^* = \frac{\partial I(u_t)}{\partial u_t} = P_{t+1}^* + Q(z^{-1})u_t - P_t^S = 0, \quad Q(z^{-1}) = l_0 L(z^{-1}) / b_0.$$

Соответственно функция обобщенного выхода системы управления имеет вид:

$$\Phi_{t+1} = P_{t+1} + Q(z^{-1})u_t - P_t^S.$$

Оптимальный закон управления, минимизирующий критерий

$$J(u_t) = M \{ \Phi_{t+1}^2 \} = M \left\{ \left(\Phi_{t+1}^* + \xi_{t+1} \right)^2 \right\} = \left(\Phi_{t+1}^* \right)^2 + \sigma_\xi^2,$$

совпадает с законом управления при минимизации критерия (5) $I(u_t)$. При минимизации критерия $J(u_t)$ прогноз, полученный по рекуррентному соотношению:

$$\Phi_{t+1}^* = F(z^{-1})P_t + G(z^{-1})u_t - P_t^S, \quad (6)$$

где $G(z^{-1}) = B(z^{-1}) + Q(z^{-1})$, устанавливается в нуль на каждом шаге и сводит обобщенный выход

$$\Phi_{t+1} = \Phi_{t+1}^* + e_{t+1} = x_t^T \theta_t + \xi_{t+1}, \quad (7)$$

к белому шуму. В выражении (7) $x_t^T = \{P_t, P_{t-1}, \dots; u_t, u_{t-1}, \dots; P_t^S\}$ — вектор измерений, $\theta_t^T = \{f_0, f_1, \dots; g_0, g_1, \dots; -1\}$ — вектор неизвестных параметров, T — знак транспонирования.

Получаемый при этом оптимальный закон управления

$$u_t = -G^{-1}(z^{-1}) [F(z^{-1})P_t - P_t^S]. \quad (8)$$

Параметры закона управления зависят от параметров объекта, которые являются априори неизвестными и, кроме того, могут меняться в процессе эксплуатации. Вместо истинных параметров θ_t используются их текущие оценки $\hat{\theta}_t$, определяемые в процессе идентификации, базирующейся на минимизации ошибки прогноза функции обобщенного выхода.

$$\hat{\theta}_t = \arg \min_{\hat{\theta}_t} I_E(\hat{\theta}_t), \quad I_E(\hat{\theta}_t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t e_s^2, \quad (9)$$

где ошибка прогноза функции обобщенного выхода на шаг вперед

$$e_{t+1} = \Phi_{t+1} - x_t^T \hat{\theta}_t. \quad (10)$$

Такой подход к проектированию, называемый схемой прямого адаптивного управления, позволяет оценивать параметры собственно регулятора, а не объекта управления, что упрощает вычисление управляющего сигнала [8, 9]. Этот управляющий алгоритм имеет сходство с алгоритмом управления с минимальной дисперсией и идентификацией параметров объекта [3, 4, 5] в том, что он минимизирует дисперсию $M \{ \Phi_{t+1}^2 \}$ путем установки прогнозируемого будущего значения Φ в ноль на каждом шаге (так же закон управления с минимальной дисперсией минимизирует бесконечную ступенчатую дисперсию выхода объекта).

Недостаток метода в том, что он применим только к минимально-фазовым системам. Объект управления может оцениваться как неминимально-фазовый при значительных управляющих воздействиях ввиду несоответствия объекту его линейной модели, встроенной в механизм адаптации. Процесс становится нестационарным, в замкнутой системе возникают ненаблюдаемые неустойчивые режимы, проявляющиеся в динамике управляющего сигнала.

Введение в контур адаптации блока анализа устойчивости, служащего для изменения структуры САУ, позволяет решить эту проблему. При выявлении неустойчивости системы осуществляется переход от управления с прямой адаптацией к управлению, реализующему идентификацию параметров объекта управления, что дает возможность для неминимально-фазового объекта выполнить факторизацию числителя оценки передаточной функции.

Синтез алгоритма управления, пригодного для управления неминимально-фазовым объектом, выполнен с применением метода факторизации [4]. Полином $B(z^{-1})$, имеющий корни как вне, так и внутри единичного круга $|z^{-1}| \leq 1$ разлагается на множители:

$$B(z^{-1}) = B_+(z^{-1})B_-(z^{-1}), \quad (11)$$

где $B_+(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b^+} b_i^+ z^{-i}$ полиномы (имеет корни вне единичного круга) и $B_-(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_b^-} b_i^- z^{-i}$ (имеет корни внутри единичного круга или на его границе).

При исключении из критерия качества (3) (обеспечение минимальной обобщенной дисперсии ошибки управления), затрат на управление (полином $L(z^{-1}) = 0$) он заменяется на $I(u_t) = M \{P_{t+1} - P_t^S\}^2$ (обеспечение минимальной дисперсии ошибки управления), и управление с прямой адаптацией заменяется управлением с идентификацией параметров объекта управления. В этом случае прогноз обобщенного выхода (6) заменится выражением

$$\Phi_{t+1|t}^* = \tilde{B}_-^{-1}(z^{-1}) [B(z^{-1})\bar{E}(z^{-1})u_t + B_-(z^{-1})\bar{F}(z^{-1})P_t] - P_t^S = 0, \quad (12)$$

а уравнение закона управления (8) уравнением

$$u_t = -\bar{E}^{-1}(z^{-1}) [B_+^{-1}(z^{-1})\bar{F}(z^{-1})P_t - B^{-1}(z^{-1})\tilde{B}_-(z^{-1})P_t^S]. \quad (13)$$

В выражениях (12), (13) полиномы и удовлетворяют соотношению

$$\begin{aligned} \tilde{B}_-(z^{-1}) &= A(z^{-1})\bar{E}(z^{-1}) + z^{-1}B_-(z^{-1})\bar{F}(z^{-1}), \\ \tilde{B}_-(z^{-1}) &= \sum_{i=0}^{n_b^-} b_{n-i}^- z^{-i}. \end{aligned} \quad (14)$$

Так как прогноз $\Phi_{t+1|t}^*$ устанавливается в нуль на каждом шаге, то сводит обобщенный выход $\Phi_{t+1} = \Phi_{t+1|t}^* + e_{t+1} = P_{t+1} - P_{t+1}^S$ к шумовой составляющей, в данном случае отличной от белого шума: $e_{t+1} = \frac{\bar{E}(z^{-1})}{\tilde{B}_-(z^{-1})} \xi_{t+1}$. В отличие от оптимальной системы управления минимально-фазовым объектом, сводящей сигнал обобщенного выхода к белому шуму (в соответствии с (7)), полученный алгоритм дает ухудшение качества управления, что является платой за устранение неминимально-фазовости.

Ошибка прогноза функции обобщенного выхода на шаг вперед (10), используемая в алгоритмах идентификации, заменится выражением

$$e_{t+1} = \Phi_{t+1} - x_t^T \hat{\alpha}_t, \quad (15)$$

где $\hat{\alpha}_t^T = \{r_0, r_1, \dots; s_0, s_1, \dots; h_0, h_1, \dots\}$ — вектор коэффициентов полиномов

$$\begin{aligned} R(z^{-1}) &= \bar{F}(z^{-1})B_-(z^{-1}), \\ S(z^{-1}) &= \bar{E}(z^{-1})B(z^{-1}), \\ H(z^{-1}) &= -\tilde{B}_-(z^{-1}). \end{aligned} \quad (16)$$

вычисляемый на основе оценки вектора параметров объекта $\hat{\theta}_t^T = \{a_0, a_1, \dots; b_0, b_1, \dots\}$ и факторизации $B(z^{-1})$.

Организация переключений алгоритмов управления на основе анализа устойчивости системы

Переход от управления с прямой адаптацией к управлению с идентификацией параметров объек-

та управления и факторизацией неустойчивого полинома осуществляется на основании анализа устойчивости системы. С этой целью находится оценка передаточной функции замкнутого контура системы управления с прямой адаптацией, выбранной в качестве базовой, обеспечивающей управление при небольших управляющих воздействиях. Проверка устойчивости осуществляется путем исследования условий, при которых все корни знаменателя передаточной функции — характеристического уравнения $D(z^{-1}) = A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B(z^{-1}) = 0$, расположены вне единичного круга. По теореме о критерии устойчивости Джюри [4] для этого необходимо выполнение следующих условий:

$$d_0^2 = 1 - d_3^2 > 0; \quad d_0^1 = 1 - d_3^2 \frac{(d_2 - d_1 d_3)^2}{1 - d_3^2} > 0;$$

$$d_0^0 = 1 - d_3^2 - \frac{(d_2 - d_1 d_3)^2}{1 - d_3^2} - \frac{(d_1 - d_2 d_3)^2 (1 - d_3^2 - d_2 + d_1 d_3)}{(1 - d_3^2 + d_2 - d_1 d_3)(1 - d_3^2)} > 0,$$

$$\begin{aligned} \text{где корни } D(z^{-1}): \quad d_1 &= \frac{b_0 b_1 + a_1 \lambda - \lambda}{b_0^2 + \lambda}; \quad d_2 = \frac{b_0 b_2 - a_1 \lambda + a_2 \lambda}{b_0^2 + \lambda}; \\ d_3 &= \frac{-a_2 \lambda}{b_0^2 + \lambda}. \end{aligned}$$

При невыполнении этих условий система становится неустойчивой и количество отрицательных параметров d_k^k , $k = 0, n_d - 1$, равно количеству корней полинома $D(z^{-1})$ внутри единичного круга. В случае неустойчивости системы с регулятором прямой адаптации и оценивания системы как неминимально-фазовой осуществляется переход к адаптивному управлению с идентификацией параметров самого объекта управления и факторизацией неустойчивого полинома $B(z^{-1})$.

Так как устойчивость замкнутой системы управления зависит от места нахождения корней полиномиального уравнения $A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B(z^{-1}) = 0$, то при $Q(z^{-1}) = 0$ (регулятор с минимальной дисперсией с идентификацией параметров объекта управления) корни зависят непосредственно от параметров полинома $B(z^{-1})$, и для неминимально-фазовых систем замкнутый контур неустойчив. Если $Q(z^{-1}) \neq 0$, то корни в этом случае зависят и от $A(z^{-1})$. Если при этом разомкнутая система является устойчивой, то корни $A(z^{-1})$ находятся вне единичного круга, и замкнутая система устойчива при достаточно больших коэффициентах полинома $Q(z^{-1})$ (т.е. происходит перемещение корней полинома $D(z^{-1})$ вне единичного круга с помощью полинома $Q(z^{-1})$). Так как полиномы $Q(z^{-1}) = \lambda / b_0 - \lambda / b_0 z^{-1}$ и $G(z^{-1}) = B(z^{-1}) + Q(z^{-1})$, т.е. параметр настройки регулятора $g_0 = b_0 + \lambda / b_0$, и определяемый по нему параметр объекта $b_0 = g_0 / 2 \pm \sqrt{(g_0 / 2)^2 - \lambda}$, то на величину параметра λ налагается ограничение, обеспечивающее положительность подкоренного выражения $\lambda \leq (g_0 / 2)^2$. При малых значениях g_0 допустимые

значения λ также малы и не могут обеспечить перемещение корней характеристического полинома $D(z^{-1})$ вне единичного круга на z -плоскости.

Таким образом, в нашем случае (и вообще при малых значениях коэффициентов полинома $G(z^{-1})$) управление с прямой адаптацией неприменимо к неминимально-фазовым системам, так как при малых значениях коэффициента λ в полиноме $Q(z^{-1})$ происходит компенсация неустойчивых нулей полиномов $B(z^{-1})$ объекта и $G(z^{-1})$ регулятора. Система становится негрубой к возмущающим воздействиям, что приводит к неустойчивому режиму работы, проявляющемуся сначала в динамике управляющего сигнала, а затем и выхода объекта. Следует отметить, что включение в критерий (3) взвешенных затрат на управление при соответствующем выборе параметра λ , даже имеющего малое значение, позволяет увести неминимально-фазовую систему от границы устойчивости при незначительных управляющих воздействиях и тем самым улучшить качество ее функционирования.

Алгоритмы управления и формирования прогноза функции обобщенного выхода

Как было сказано выше, оптимальный закон управления определяется из условия (4). Система управления минимизирует дисперсию отклонений выходной величины от заданной траектории (управление с минимальной дисперсией) при $L(z^{-1}) = 0$ и осуществляет управление с минимальной обобщенной дисперсией (минимизирует взвешенную сумму выходной и управляющей величин) при $L(z^{-1}) > 0$ в критерии качества управления (3).

Закон управления, синтезируемый в системе, сводится к установлению прогноза функции обобщенного выхода Φ_t^* , связанной с показателем качества, в нуль на каждом шаге. В общем виде функция обобщенного выхода имеет вид:

$$\Phi_{t+|t}^* = R(z^{-1})P_t + S(z^{-1})u_t + H(z^{-1})P_t^s,$$

а оптимальное управление без учета ограничений

$$\tilde{u}_t = -S^{-1}(z^{-1})[R(z^{-1})P_t + H(z^{-1})P_t^s], \quad (17)$$

где полиномы $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$, $H(z^{-1})$ определяются по выражениям

$$R(z^{-1}) = \begin{cases} F(z^{-1}), & |z_i| > 1; \\ \bar{F}(z^{-1})B_-(z^{-1}), & |z_i| \leq 1; \end{cases}$$

$$S(z^{-1}) = \begin{cases} B(z^{-1}) + Q(z^{-1}), & |z_i| > 1; \\ \bar{E}(z^{-1})B(z^{-1}), & |z_i| \leq 1; \end{cases} \quad (18)$$

$$H(z^{-1}) = \begin{cases} -1, & |z_i| > 1; \\ -\tilde{B}_-(z^{-1}), & |z_i| \leq 1; \end{cases}$$

$$z_i : D(z^{-1}) = A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B(z^{-1}) = 0; i = 1, 2. \quad (19)$$

В выражениях (18), (19) переход с одной ветви вычислений значений полиномов на другую осуществляется в зависимости от расположения корней характеристического полинома $D(z^{-1})$ на z -плоскости, т.е. от устойчивости системы с прямой адаптацией, принятой в качестве базовой. Оптимальное управление с учетом ограничений в условиях (4) определяется из соотношений

$$u_t^* = \begin{cases} \min\{u_{max}, u_t^* + \delta_t, \tilde{u}_t\} & \text{при } \tilde{u}_t \geq u_{t-1}^*; \\ \max\{u_{min}, u_t^* - \delta_t, \tilde{u}_t\} & \text{при } \tilde{u}_t < u_{t-1}^*. \end{cases} \quad (20)$$

Для вычисления коэффициентов полиномов $\bar{E}(z^{-1})$ и $\bar{F}(z^{-1})$ в выражениях (18), (19) необходимо решить полиномиальное уравнение (14). С этой целью неустойчивый полином $B(z^{-1})$ (имеющий порядок $n_b=2$, что соответствует рассматриваемому объекту) разлагается на множители следующим образом. Если полином $B_-(z^{-1})$ имеет два корня (случай 1)

$$B_-(z^{-1}) = b_0/b_2 + b_1/b_2 z^{-1} + z^{-2}; B_+(z^{-1}) = b_2;$$

$$\tilde{B}_-(z^{-1}) = 1 + b_1/b_2 z^{-1} + b_0/b_2 z^{-2}.$$

Если полином $B_-(z^{-1})$ имеет один корень (случай 2)

$$B_-(z^{-1}) = 1/z_2 - z^{-1}; B_+(z^{-1}) = z_2 b_0 - z_1 z_2 b_0 z^{-1};$$

$$\tilde{B}_-(z^{-1}) = 1 - 1/z_2 z^{-1},$$

где z_1 — корень полинома $B_+(z^{-1})$, z_2 — корень полинома $B_-(z^{-1})$. Определение количества корней полинома, находящихся внутри единичного круга на z -плоскости, происходит после проверки системы на устойчивость (выявления неустойчивости системы).

Алгоритм идентификации

При малых управляющих воздействиях (если система оценивается как устойчивая) текущие оценки параметров $\hat{\theta}_t$, используемые вместо неизвестных параметров θ_t , являются параметрами самого алгоритма управления $\hat{\theta}_t^T = \{f_0, f_1, \dots; g_0, g_1, \dots, -1\}$. При значительных управляющих воздействиях в связи с необходимостью применения метода факторизации осуществляется идентификация параметров собственно объекта управления (1), (2) $\hat{\theta}_t^T = \{a_0, a_1, \dots; b_0, b_1, \dots\}$. Текущие оценки параметров $\hat{\theta}_t$ определяются в процессе идентификации из условия (9) на основе минимизации ошибки прогноза функции обобщенного выхода на шаг вперед $e_{t+1} = \Phi_{t+1} - \hat{\Phi}_{t+1|t}^*$. При этом вычисление прогноза обобщенного выхода зависит от устойчивости системы:

$$\hat{\Phi}_{t+|t}^* = \begin{cases} x_t^T \hat{\theta}_t, & |z_i| > 1; \hat{\theta}_t^T = \{f_0, f_1, \dots; g_0, g_1, \dots, -1\}; \\ x_t^T \hat{\alpha}_t, & |z_i| \leq 1, \hat{\alpha}_t^T = \{r_0, r_1, \dots; s_0, s_1, \dots; h_0, h_1, \dots\}, \end{cases} \quad (21)$$

где $z_i : D(z^{-1}) = A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B(z^{-1}) = 0; i = 1, 2$. Идентификация не выполняется при выявлении неустойчивости объекта (корни $A(z^{-1})$ внутри единичного круга: $|z_i^a| \leq 1; i = 1, 2$) и достижении заданной точности

управления ($|P_t - P_t^s| < \Delta$, где Δ — зона нечувствительности САУ).

Для получения текущих оценок параметров $\hat{\theta}_t$ используется рекуррентный метод наименьших квадратов с забыванием устаревшей информации, реализованный формулами:

$$\hat{\theta}_{t+1} = \hat{\theta}_t + K_{t+1} e_{t+1}; K_{t+1} = C_t W_{t+1} (1 + W_{t+1}^T W_{t+1})^{-1}; \quad (22)$$

$$C_{t+1} = C_t (I - \alpha \beta \gamma_t W_{t+1} W_{t+1}^T); W_{t+1} = C_t^T x_{t+1}; \quad (23)$$

$$\alpha = (1 + \gamma_t W_{t+1}^T W_{t+1})^{-1}; \beta = 1 / (1 + \sqrt{\alpha}); \zeta_t = W_{t+1}^T W_{t+1}, \quad (24)$$

где I — обозначение единичной матрицы размерности $n_\theta \times n_\theta$; n_θ — число неизвестных параметров; C_t — корень квадратный из матрицы P_t , пропорциональной ковариационной матрице оцениваемых параметров ($C_t C_t^T = P_t$). Вводимый для подавления устаревшей информации параметр $\gamma_t = \phi_{t+1} - (1 - \phi_{t+1}) \zeta_t^{-1}$; ϕ_{t+1} — фактор забывания [5].

Использование метода извлечения квадратных корней из матрицы $P_t = (P_{t-1}^{-1} + x_t x_t^T)^{-1}$, пропорциональной ковариационной матрице оцениваемых параметров в (22) — (24), выполнено с целью повышения численной устойчивости процесса идентификации. Для устранения ошибок округления (обусловленных

Единение оригинального и традиционного рождает современное.

Е. Ханкин

ограниченной длиной разрядной сетки контроллера и накапливающимися вследствие рекуррентности процедуры вычислений после многократных расчетов) вместо традиционного применения матрицы P_t [4] используется произведение некоторой матрицы C_t (нижней треугольной по Холецкому) на транспонированную к ней же C_t^T . Полученный алгоритм оценивания с неотрицательно определенными симметричными матрицами позволяет снизить ошибки вычислений и улучшить идентифицируемость процесса.

Структура адаптивного регулятора

На рис. 1 приведена функциональная схема разработанной адаптивной САУ с перестраиваемой структурой.

В основном контуре управления выделен блок регулирования, включающий в себя алгоритмы, реализующие стратегию управления с прямой адаптацией (регулятор минимальной обобщенной дисперсии) или управление с идентификацией параметров объекта, полиномов $A(z^{-1})$ и $B(z^{-1})$ (регулятор минимальной дисперсии), с применением факторизации к неустойчивому полиному $B(z^{-1})$.

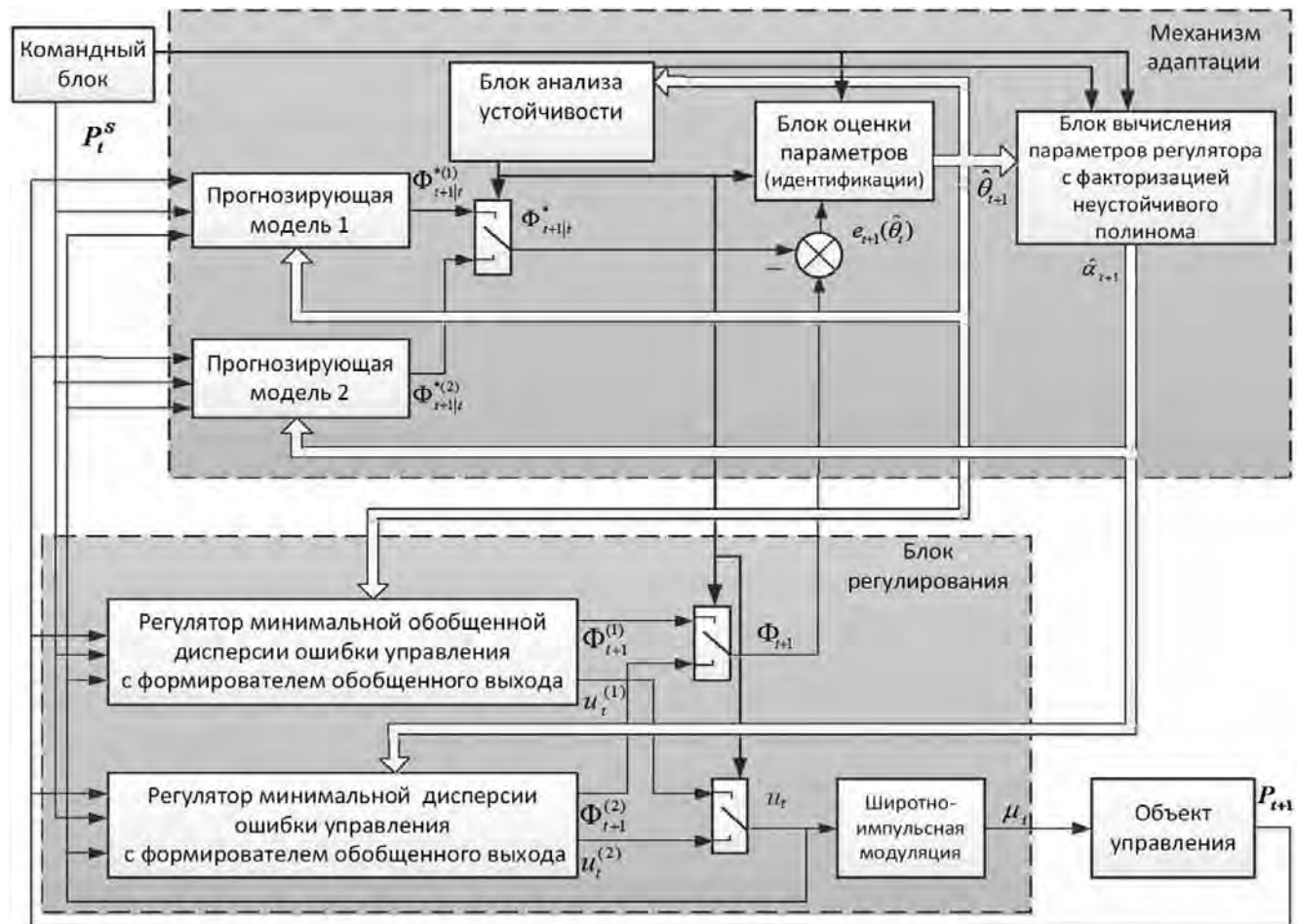


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной САУ с перестраиваемой структурой

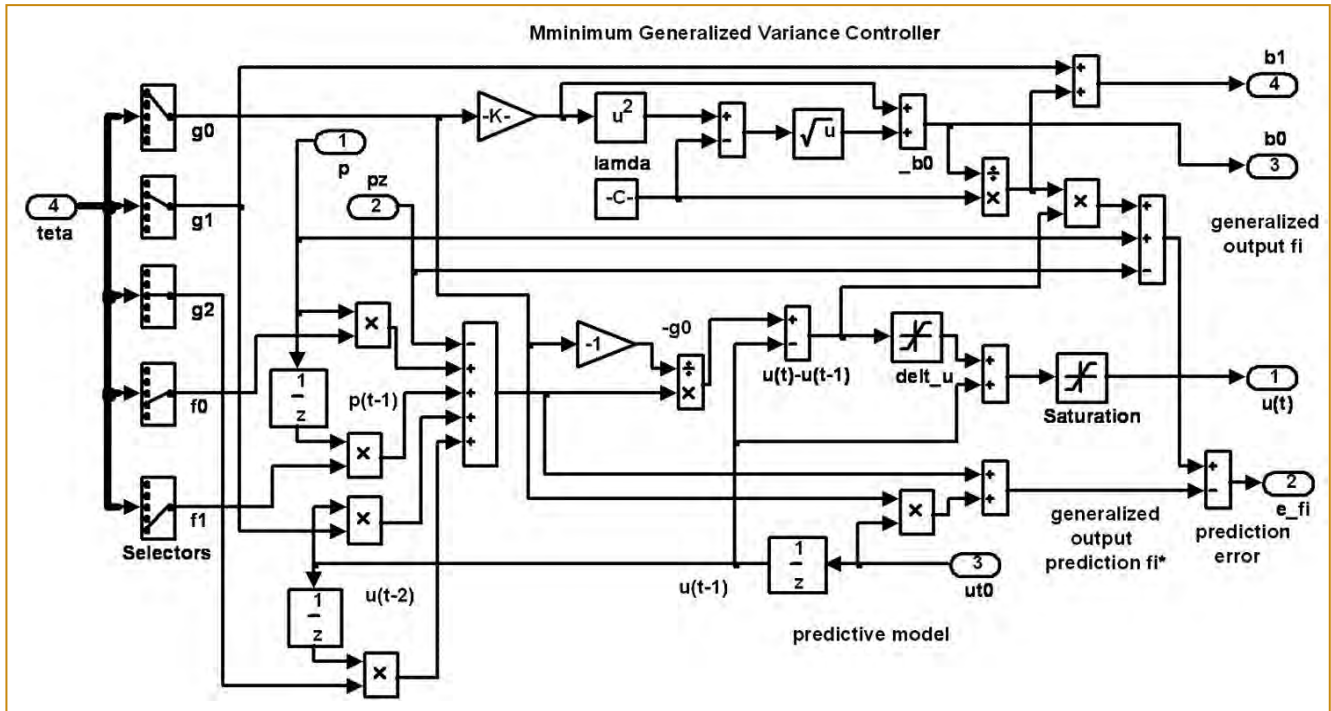


Рис. 3. Схема модели регулятора минимальной обобщенной дисперсии (ctr_mgv)

Регулятор минимальной дисперсии выполнен на двух подсистемах: ctr_mv1 и ctr_mv2, вызываемых на выполнение по сигналам от блока анализа устойчивости (stability analysis) в зависимости от количества корней полинома $B_-(z^{-1})$. Если по результатам идентификации объекта полином $B_-(z^{-1})$ имеет два корня (случай 1), то используется подсистема ctr_mv2, если один корень (случай 2) — подсистема ctr_mv1. Определение коэффициентов полиномов $\bar{E}(z^{-1})$ и $\bar{F}(z^{-1})$ в законе управления (13) осуществляется на базе решения полиномиального уравнения (14) в каждом случае в соответствии с количеством корней полинома $B_-(z^{-1})$. Также в подсистемах ctr_mv1 и ctr_mv2 выполняется вычисление функции Φ_{t+1} и ее прогноза Φ_{t+1}^* (в связи с наличием общих элементов регулятора (13) и прогнозирующей модели (12)).

Схемы Simulink-моделей регуляторов минимальной дисперсии для ctr_mv1 и ctr_mv2 аналогичны приведенной на рис. 3 схеме подсистемы ctr_mgv. Выполнение матричных операций, необходимых для получения параметров в законе управления (13): умножение, конкатенация, решение матричных уравнений, реализуется в подсистемах ctr_mv1 и ctr_mv2 с помощью соответствующих Simulink-блоков.

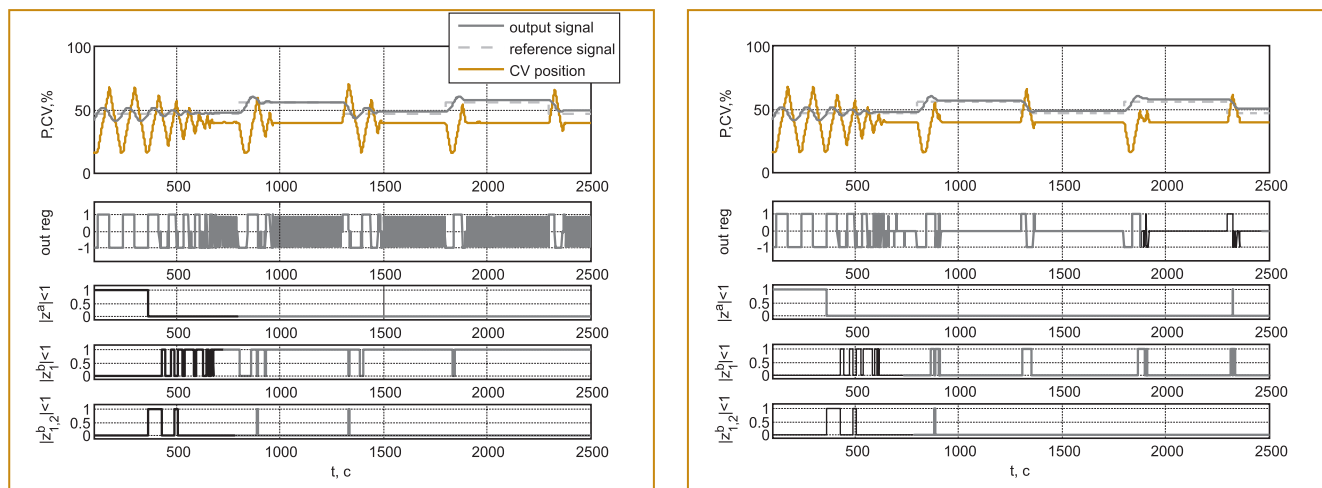
Выходные сигналы каждой подсистемы ctr_mgv, ctr_mv1 и ctr_mv2, управляющее воздействие u_t и ошибка прогноза обобщенного выхода e_{t+1} подаются на переключатели, командным сигналом которых является выход блока анализа устойчивости stability analysis. Широтно-импульсная модуляция управляющего воздействия u_t выполняется подсистемой pulse-width modulation. Оценки параметров $\hat{\theta}_t$ определяются подсистемой estimator.

В результате моделирования разработанной системы получены графики переходных про-

цессов, приведенные на рис. 4. Объект управления (канал регулирования уровня жидкости в резервуаре) представлялся передаточной функцией $W_o(z^{-1}) = A_o(z^{-1}) / B_o(z^{-1})$, где параметры полиномов $A_o(z^{-1}) = 1 + a_1^o z^{-1} + a_2^o z^{-2}$, $B_o(z^{-1}) = b_0^o + b_1^o z^{-1} + b_2^o z^{-2}$ рассчитывались на основе типовых характеристик оборудования энергоблока [1, 2]. В качестве исходных данных алгоритма идентификации (22) — (24) использовались следующие. Начальное значение матрицы $C_t^0 = \rho I$, $\rho = 1000$, I — единичная матрица. Оценки параметров $\hat{\theta}_t$ математической модели, встроенной в механизм адаптации, принимались равными параметрам передаточной функции объекта без учета характеристик исполнительного механизма и широтно-импульсной модуляции. Исследования проводились при скачкообразном изменении задающего воздействия P_t^S (reference signal) на $\pm 20\%$ от номинального значения. Шаг квантования $t_0 = 0,2с$ (соответствует среднему значению интервала дискретизации контроллера).

Процессы в системе при управлении с прямой адаптацией в соответствии с (8) и запрете перестройки структуры иллюстрирует рис. 4, а, с перестройкой структуры (при выявлении неустойчивости САУ и неминимально-фазовости объекта) согласно (17) — рис. 4, б. Траектории изменения параметров САУ с перестройкой структуры приведены на рис. 5, б.

На начальном этапе моделирования наблюдались колебания регулируемой величины P_t (output signal) и положения регулирующего клапана (CV position); объект управления оценивался как неустойчивый ($|z^a| < 1$). После разрешения работы блока идентификации (выдавалось командным блоком на 300 секунды) и настройки параметров САУ (на 650 секунды) процесс стабилизи-



а)

б)

Рис. 4. Переходные процессы в САУ: а) – управление с прямой адаптацией (запрет на перестройку структуры); б) – управление с перестройкой структуры

вался. Как видно из графиков, регулируемая величина P_i отслеживает заданную траекторию P_i^S с хорошей точностью ($P_i - P_i^S < 2\%$), положение регулирующего клапана (CV position) изменяется не более чем на $\pm 25\%$, оставаясь в рабочем диапазоне.

Однако в случае запрета перестройки структуры при выявлении неустойчивости САУ и неминимально-фазовости объекта (на рис. 4, а наличие $|z_1^b| < 1$ или $|z_{1,2}^b| < 1$) наблюдаются автоколебания управляющего сигнала u_t на выходе САУ (out reg), ограниченные в соответствии с (20). Причиной этого является компенсация неустойчивых нулей полиномов $B(z^{-1})$ объекта и $G(z^{-1})$ регулятора. Решение проблемы – в изменении стратегии управления: при выявлении неустойчивости САУ из-за

неминимально-фазовости объекта применяется метод факторизации согласно (11). Как видно из рис. 4, б, переключение алгоритмов управления в соответствии с (17) – (19) (при выявлении $|z_1^b| < 1$ или $|z_{1,2}^b| < 1$) позволяет устранить автоколебания управляющего сигнала u_t .

На рис. 5 приведены графики автоковариационных функций обобщенного выхода Φ , после 1000 шагов адаптивного управления при управлении с прямой адаптации согласно (8) и запрете перестройки структуры (кривая 1), и при работе САУ с перестройкой структуры (при выявлении неустойчивости САУ и неминимально-фазовости объекта) согласно (17) (кривая 2). Штрих-пунктиром показан уровень доверительного интервала для белого шума.

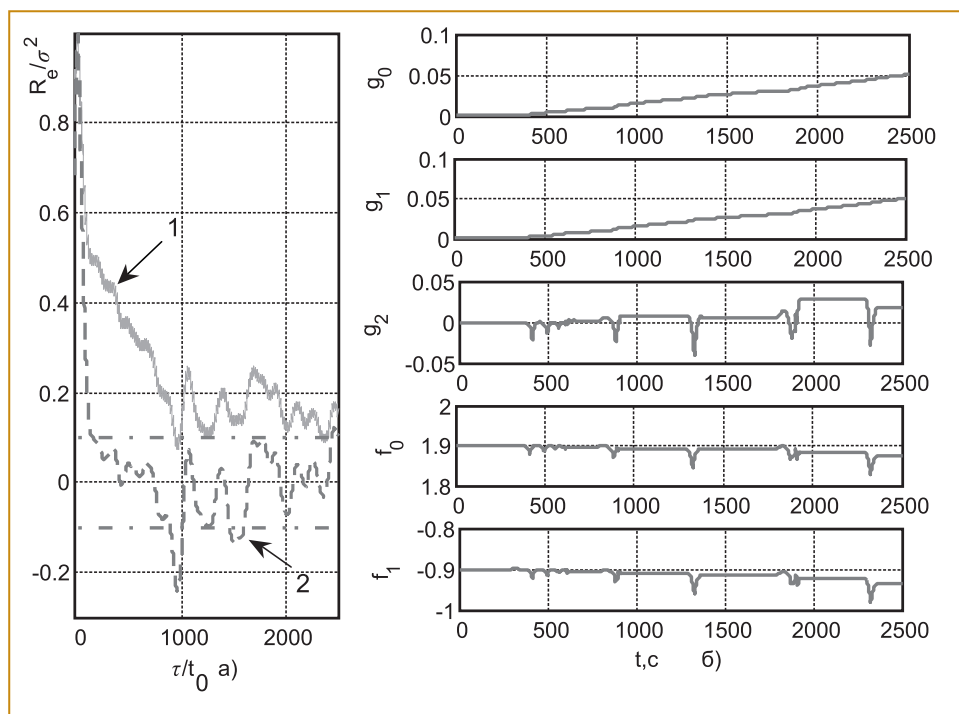


Рис. 5. Характеристики адаптивной САУ: а) – оценки автоковариационных функций при запрете перестройки структуры (кривая 1) и с перестройкой структуры (кривая 2), б) – траектории изменения параметров САУ с перестройкой структуры

С течением времени по мере сходимости алгоритма идентификации, функция обобщенного выхода САУ с перестройкой структуры Φ_t (а значит и ошибка управления) приближается к белому шуму, хотя отличается от него в связи с наличием нелинейностей в системе. Функция обобщенного выхода САУ с запретом перестройки структуры (управление с прямой адаптацией даже при выявлении неустойчивости системы) значительно отличается от белого шума. При этом графики переходных процессов (рис. 4) иллюстрируют, что перестройка структуры обеспечивает качество и устойчивость работы адаптивной САУ. Следует отметить, что использование стратегии управления с пря-

мой адаптацией в качестве базовой позволяет значительно уменьшить временные затраты на формирование управляющего воздействия в связи с тем, что сложные вычислительные операции метода факторизации выполняются только при выявлении неустойчивости.

Заключение

Проведенные исследования показали эффективность разработанной адаптивной системы управления с прогнозирующей моделью (оптимальным в смысле наименьшей среднеквадратичной ошибки предсказателем обобщенного выходного сигнала системы). САУ обеспечивает минимальные отклонения регулируемого параметра от заданной траектории с учетом ограничений на амплитуду и скорость изменения управляющего воздействия, а также применяемой широтно-импульсной модуляции управляющего сигнала (для управления исполнительным механизмом постоянной скорости).

В результате сделан вывод, что предлагаемый подход к обеспечению устойчивости адаптивной САУ за счет переключения стратегий управления с алгоритма прямой адаптации (непосредственная настройка параметров закона управления) на алгоритм управления с идентификацией параметров объекта управления (с факторизацией полинома числителя оценки передаточной функции) пригоден при управлении объектами, оцениваемыми как неминимально-фазовые.

Автоматизация настройки параметров регулятора позволяет повысить качество регулирования и суще-

ственно уменьшить временные затраты на предварительное изучение характеристик объекта управления и настройку разрабатываемых контроллеров. Положительные свойства разработанных алгоритмов, реализованных на базе программируемых контроллеров ВЛР-2 (ЗАО "Автоматика-Э"), делают возможным их применение в реальных условиях функционирования объектов энергетики.

Список литературы

1. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Сеницын В.П., Нестеров Ю.В. Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока // Автоматизация в промышленности. 2010. №7.
2. Денисова Л.А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2013. №7.
3. Деревицкий Д.П., Фрадков А.Л. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления. М.: Наука. 1981. 216 с.
4. Острем К., Вуттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ. М.: Мир, 1987. 480с.
5. Kaminskas V. Predictor-based self-tuning control // Power Engineering. No.3. 1997.
6. Раскин Е.М., Денисова Л.А. Программно-технический комплекс для регулирования давления в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС. // Автоматизация в промышленности. 2011. №2.
7. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ. 2003. 496 с.
8. Clarke D.W., Phil D., and Gawthrop P.J. Self-tuning controller // Proceeding of the IEE. Vol.122. No 9. 1975.
9. Kaminskas V., Denisova L. Investigation of algorithms for the adaptive control of the power of critical installations // Statistical Problems of Control. No. 92. Vilnius. 1991. (Russian).

Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э».

Контактный телефон (381-2) 65-20-84.

E-mail: ladenisova@mail333.com

Прогнозирование спроса на услуги

ClickSoftware Technologies Ltd., ведущий поставщик автоматизированных решений для управления мобильной рабочей силой в сфере обслуживания, объявил о выпуске приложения Saracity Planning App, помогающего компаниям выполнять условия соглашений о качестве предоставляемых услуг и соблюдать стандарты соответствия благодаря учету предполагаемого спроса и заблаговременной подготовке ресурсов. Заключается ли задача в контроле сверхурочного времени, подрядчиков или сезонного изменения численности персонала, качественное планирование ресурсов всегда позволит должным образом подготовиться к фактическому спросу.

Один из элементов современной стратегии развития ведущих предприятий заключается в более точном прогнозировании и планировании спроса на услуги. Организациям необходимо осуществлять качественный сбор, анализ и обработку доступной информации для планирования ресурсов и поддержания требуемой численности сотрудников. Это позволяет иметь необходимый штат сотрудников, чтобы выполнять условия контрактов, но при этом не нести излишние расходы из-за того, что численность персонала окажется завышенной.

ClickSoftware понимает часто встречающееся несоответствие между уровнем обслуживания и расходами. Решить проблему поможет приложение Saracity Planning App, которое моделирует реальную производственную ситуацию и полностью автоматизирует процесс планирования ресурсов. Программа использует следующие параметры: прогнозируемые значения, требуемые уровни обслуживания, фактический объем зарезервированных ресурсов и техническую информацию. Все это позволяет оценивать оптимальные величины в процентах. Результатом моделирования являются точные цифры, позволяющие подготовиться к спросу за несколько дней или недель.

Из прогноза можно получить рабочий план, учитывая требования заказчика: ввести необходимое число сотрудников в инструмент планирования, такой как ClickSchedule, или любое другое решение для резервирования сотрудников. Приложение также укажет на отсутствие необходимого числа инженеров, доступности сервисов и пробелы в расписании и предложит произвести автоматические корректировки.

<http://clicksoftware.com.ru>