

Адаптивная коррекция задания регулятору тормозной позиции

ЖУКОВИЦКИЙ И.В. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. ак. В.Лазаряна

Рассмотрен алгоритм адаптивной коррекции задания регулятору тормозной позиции, который позволяет для стационарных систем с неизвестными (но постоянными) статистическими характеристиками ошибки регулирования вносить поправки в задание по измерениям фактических результатов регулирования. Метод расширен для нестационарных систем управления.

Розглянуто алгоритм адаптивної корекції завдання регулювальникові гальмівної позиції, який дозволяє для стаціонарних систем з невідомими (але постійними) статистичними характеристиками помилки регулювання вносити поправки до завдання по вимірах фактичних результатів регулювання. Метод розширений для нестаціонарних систем управління.

An algorithm is considered of adaptive correction of task to the regulator of brake position, which allows for the stationary systems with unknown (but permanent) statistical descriptions of adjusting error to bring in amendments in a task on measuring of actual results of adjusting. A method is extended for non-stationary control system.

Вступление и постановка задачи

Известно, что существующие регуляторы скорости скатывания отцепов в системах АРС отрабатывают задание (реализуют заданную скорость V_z выхода отцепов с тормозной позиции) с ошибкой

$$\varepsilon = V_\phi - V_z,$$

где V_ϕ – фактическое значение скорости выхода. Причём математическое ожидание ошибки $m_\varepsilon \neq 0$.

В работе [1] был предложен способ компенсации постоянной составляющей (математического ожидания) ошибки дифференцировано для отцепов разных типов. Согласно этому способу на цифровой модели получают математические ожидания ошибок $m_{\varepsilon j}$ для каждого j -го типа отцепов. Полученные значения $m_{\varepsilon j}$ помещают в запоминающее устройство в качестве поправки ζ_j ($\zeta_j = -m_{\varepsilon j}$) и в процессе управления задание регулятору выдаётся с учётом известного значения ζ_j :

$$V_{zj} = V_p + \zeta_j,$$

где V_{zj} – задание регулятору при торможении отцепа j -го типа; V_p – расчётная скорость выхода отцепа из тормозной позиции.

В ЦУС введение поправки ζ_j к величине V_p осуществляется непосредственно ЭВМ.

Однако, внесистемный способ определения поправок имеет и ряд недостатков. Во-первых, модель не может быть полностью адекватной объекту, в силу чего реальные значения $m_{\varepsilon j}$ будут отличаться от расчётных. Во-вторых, ошибка регулирования является

нестационарной (т.е. ее математическое ожидание и дисперсия являются случайными функциями времени). Это объясняется старением регулятора (износ шин замедлителя, старением радиокомпонентов электронных схем) и нестационарностью окружающей среды (изменением погодных условий), которая оказывает влияние на работу регулятора.

В силу вышеизложенного целесообразно иметь механизм самонастройки, позволяющий корректировать значения поправок с учетом фактических результатов регулирования.

Адаптивная коррекция для стационарных систем

В работе [1] предложено использовать для коррекции процедуру, так называемого "скользящего среднего" значения m_ε . Такая процедура предполагает коррекцию поправки ζ на некотором $(k+1)$ -м шаге управления исходя из измеренного значения погрешности ε_k регулирования скорости отцепа на предыдущем шаге в соответствии с формулой

$$\zeta_{k+1} = \gamma \cdot \zeta_k + (1 - \gamma) \cdot \varepsilon_k, \quad (1)$$

где γ – коэффициент адаптации, определяемый статистическими параметрами ошибки регулирования ($0 < \gamma < 1$); ζ_k и ζ_{k+1} – значения поправок соответственно для k -го и $(k+1)$ -го по счёту отцепов одного из типов.

Оценим возможности этого метода для стационарных систем с неизвестными (но постоянными) статистическими характеристиками ошибки регулирования.

После прохождения через тормозную позицию k отцепов поправка ζ примет значение

$$\zeta_{k+1} = \gamma^k a_1 - \sum_{i=1}^k \gamma^{k-i} (1-\gamma) \varepsilon_i \quad (2)$$

где ε_i – ошибка регулирования для i -го отцепа.

Так как ошибка ε_i является случайной величиной, то и ζ_{k+1} также случайная величина. Её статистические параметры можно найти путём несложных преобразований, используя теорему линейности [2]:

$$M[\zeta_{k+1}] = \gamma^k \zeta_1 - (1-\gamma^k) \cdot m_\varepsilon; \quad (3)$$

$$D[\zeta_{k+1}] = \frac{1-\gamma}{1+\gamma} (1-\gamma^{2k}) \cdot D_\varepsilon. \quad (4)$$

Скорость выхода $(k+1)$ -го отцепа с тормозной позиции

$$V_{k+1} = V_3 + \varepsilon_{k+1} = V_p + \zeta_{k+1} + \varepsilon_{k+1}. \quad (5)$$

Её статистические параметры также можно найти, используя теорему линейности:

$$M[V_{k+1}] = V_p + \gamma^k (\zeta_1 + m_\varepsilon), \quad (6)$$

$$D[V_{k+1}] = [1 + \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)} (1-\gamma^{2k})] D_\varepsilon. \quad (7)$$

Найденное значение является дисперсией скорости относительно $M[V_{k+1}]$. Дисперсия же относительно расчётного значения V_p :

$$\begin{aligned} D^*[V_{k+1}] &= D[V_{k+1}] + (M[V_{k+1}] - V_p)^2 = \\ &= [1 + \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)} (1-\gamma^{2k})] D_\varepsilon + \gamma^{2k} (\zeta_1 + m_\varepsilon)^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Как видно из формул (6) и (8), при $0 < \gamma < 1$ с ростом k математическое ожидание $M[V_{k+1}] \rightarrow V_p$, а дисперсия $D^*[V_{k+1}] \rightarrow (1 + \frac{1-\gamma}{1+\gamma}) D_\varepsilon$. При этом, если $\gamma \rightarrow 1$, то уменьшается дисперсия $D^*[V_{k+1}]$, но замедляется сходимость величины V_{k+1} к V_p .

С другой стороны, при $\gamma \rightarrow 0$ убыстряется сходимость $M[V_{k+1}] \rightarrow V_p$, но и увеличивается дисперсия $D^*[V_{k+1}]$. Для решения вопроса о выборе оптимального значения γ требуется задаться критерием оптимальности. Таким критерием $\mathcal{J}$ может быть минимум генеральной дисперсии скорости для всех k отцепов, то есть математического ожидания дисперсии:

$$\mathcal{J} = \min\{M[D^*]\}. \quad (9)$$

Генеральная дисперсия может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\begin{aligned} M[D^*] &= \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k D^*[V_{k+1}] = \\ &= \left(1 + \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) D_\varepsilon + \frac{1}{k} \cdot \left[(\zeta_1 + m_\varepsilon)^2 - \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)} D_\varepsilon \right] \frac{\gamma^2 (1-\gamma^{2k})}{1-\gamma^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Определить γ_{opt} , минимизирующее (10), можно несколькими способами. Однако, учитывая относительную сложность формулы (10), а также то, что предварительные исследования показали наличие лишь одного минимума функции $M_{DV}(\gamma)$ в интервалах разумных значений m_ε , D_ε , применим для поиска минимума численный метод последовательного перебора, подставляя в (10) различные значения γ в диапазоне 0...1 с постоянным шагом. Зависимости $\gamma_{opt}(k)$ для одного из наборов значений m_ε , D_ε показаны на рис. 1.

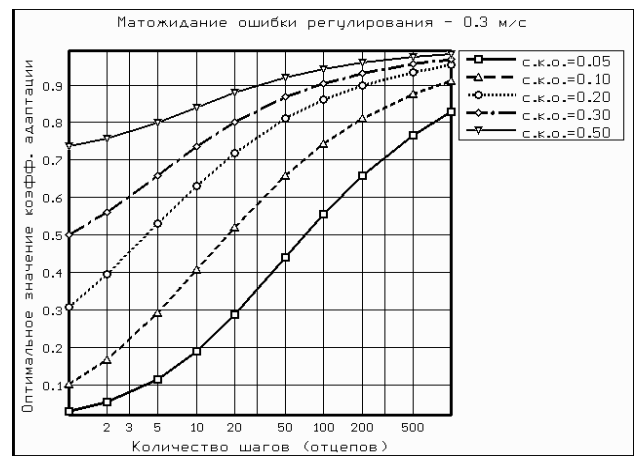


Рисунок 1 – Зависимости $\gamma_{opt}(k)$ для одного из наборов значений m_ε , D_ε

На рис. 2 показаны зависимости $\sigma_V(k)/\gamma = \gamma_{opt}$ (здесь σ_V – среднее квадратичное отклонение скорости V от расчетного значения V_p) для одного из наборов m_ε , D_ε при $\zeta_1 = 0$. Как и следовало ожидать, с увеличением k величина $\gamma \rightarrow 1$, а $\sigma_V \rightarrow \sigma_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon}$.

Адаптивная коррекция для нестационарных систем управления

Оценим теперь возможности адаптивной коррекции с учетом нестационарности системы управления. Так как изменение статистических параметров ошибки ε происходит относительно медленно, то при управлении может быть применен метод "замороженных коэффициентов". То есть, принимается, что на определенном отрезке времени (для определенного числа отцепов N) процесс является стационарным. Количество отцепов N , для которых процесс принимается стационарным, зависит от многих факторов (вагонопотока, номера тормозной позиции, погодных условий и т. п.), но (см. рис. 2) это количество может быть вы-

брано из достаточно широкого диапазона, так как уже через несколько десятков отцепов величина σ_V резко падает.

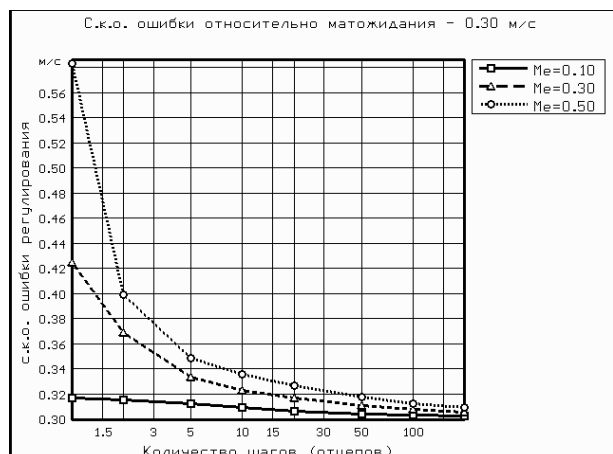


Рисунок 2 – Зависимости $\sigma_V(k)$ при оптимальном значении коэффициента адаптации γ для некоторых наборов m_ε , D_ε при $\zeta_1=0$.

Алгоритм вычисления поправки

Принимаем, что для N отцепов процесс - стационарен, т.е. в расчет принимаются данные лишь для последних N отцепов и $\zeta_1=0$. В регулятора имеется память, где хранятся данные (ошибки) для N последних отцепов. Последовательность вычисления поправки для k -го отцепа ($k>N$) при этом следующая:

1. Измеряется ошибка регулирования ε_k .

2. В памяти производится сдвиг ранее измеренных N ошибок. Первая (самая "старая") вообще отбрасывается, вторая становится на место первой, третья на место второй и т.д. Измеренная ε_k становится на место ε_N .

3. Вычисляются оценки m_ε и D_ε на основании последних N измерений:

$$\tilde{m}_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i, \quad (11)$$

$$\tilde{D}_\varepsilon = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{N}{N-1} \tilde{m}_\varepsilon^2. \quad (12)$$

4. Находим γ_{opt} , минимизирующее (10) при вычисленных оценках m_ε и D_ε и количестве отцепов $k=N$.

5. Вычисляем очередную поправку:

$$\zeta_{k+1} = \gamma_{opt} \zeta_k - (1 - \gamma_{opt}) \varepsilon_k. \quad (13)$$

Выводы

Разработан алгоритм адаптивной коррекции задания регулятору тормозной позиции, который позволяет для стационарных систем с неизвестными (но постоянными) статистическими характеристиками ошибки регулирования вносить поправки в задание по измерениям фактических результатов регулирования.

Метод расширен для нестационарных систем управления.

Литература

1. Сафрис Л.В., Скабалланович Т.И. Коррекция задания для регуляторов замедлителей. // Автоматическое управление и вопросы применения вычислительной техники на железнодорожном транспорте. Труды ДИИТа. – Вып. 184/8. – Днепропетровск, 1976. С.29-32.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М. Наука, 1969.