

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

С.А. Сериков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

**Аннотация.** Рассматривается задача оптимизации управления силовой установкой гибридного автомобиля, минимизирующего векторный критерий качества при наличии ограничений на параметры состояния и вектор управления. Приведена формальная постановка оптимизационной задачи, рассмотрено её решение методом нейросетевого управления на основе адаптивной критики.

**Ключевые слова:** гибридный автомобиль, гибридная силовая установка, оптимальное управление, векторный критерий качества, нейросетевое управление, адаптивный критик

## АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

С.А. Серіков, доцент, к. т. н., ХНАДУ

**Анотація.** Розглядається задача оптимізації управління силовою установкою гібридного автомобіля що мінімізує векторний критерій якості за наявності обмежень на параметри стану і вектор управління. Приведена формальна постановка оптимізаційної задачі, а також розглянуто її вирішення методом нейромережевого управління на основі адаптивної критики.

**Ключові слова:** гібридний автомобіль, гібридна силова установка, оптимальне управління, векторний критерій якості, нейромережеве управління, адаптивний критик

## ADAPTIVE CONTROL OF THE HYBRID ENGINE

S. Serikov, associate professor, cand. eng. sc., KhNAHU

**Abstract.** The problem of optimum control by a hybrid car engine synthesis with vector quality criterion minimization and under constraints on the current parameters and control vector is considered. Formal statement of the optimization problem is resulted. The decision of this problem by a method of adaptive critic designs-based neural networks control is considered.

**Key words:** hybrid car, hybrid power setting, optimum control, vector quality criterion, neural networks control, adaptive critic

В мире не происходит ничего, в чём не был бы  
виден смысл какого-нибудь максимума или минимума.  
Л. Эйлер

### Введение

Экономичность и экологическая безопасность гибридного автомобиля в значительной степени определяется качеством управ-

ления его силовой установкой и степенью соответствия выбранной стратегии управления текущему тягово-скоростному режиму. Данное обстоятельство диктует необходимость придания системе автоматического

управления гибридной силовой установкой (САУ ГСУ) адаптивных свойств, т.е. способности выбора стратегии управления агрегатами ГСУ, которая минимизирует выбранный функционал на текущем ездовом цикле при заданных ограничениях.

### Анализ публикаций

В настоящее время существует достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных оптимизации управления силовой установкой гибридных автомобилей [1 – 3]. Вместе с тем, ряд особенностей процесса управления ГСУ остаются неисследованными.

Так, при формальной постановке оптимизационных задач не уделяется достаточно внимания их многокритериальности и тем особенностям, которые порождает данное обстоятельство. При этом остаётся незадействованным богатый арсенал средств теории векторной оптимизации [4 – 7].

При исследовании процессов адаптации стратегии управления агрегатами ГСУ к изменяющимся условиям их функционирования практически не рассматривались богатые возможности методов нейрорегуляции на основе адаптивных критиков [8 – 10].

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является исследование особенностей задачи синтеза адаптивного управления силовой установкой гибридного автомобиля при использовании векторного функционала оптимальности. При этом предложена методика формирования компонентов векторного функционала, а также рассмотрены некоторые способы получения единственного решения оптимизационной задачи из множества парето-оптимальных решений. Показана возможность линеаризации модели автомобиля как объекта управления по скорости на основе применения нелинейного преобразования к управляющему воздействию. Предложен эффективный способ уменьшения размерности оптимизационной задачи путём введения новой переменной – коэффициента использования электропривода. Рассмотрена возможность реализации адаптивного управления ГСУ на основе использования метода нейросетевых адаптивных критиков.

## Гибридный автомобиль как объект управления по скорости

Пусть автомобиль с ГСУ как управляемая система может быть идеализирован настолько, что в каждый фиксированный момент времени наблюдения  $t=t'$  на интервале  $T = \{t | t_s \leq t \leq t_f\}$ ,  $t' \in T$  его свойства могут быть описаны двумя действительными числами:  $\omega(t')$  – текущая угловая скорость вращения ведущих колёс;  $\theta_{TAB}(t')$  – состояние накопителя энергии (степень заряженности тяговой аккумуляторной батареи). Будем рассматривать данные величины как компоненты вектора состояния системы  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = [\omega(t), \theta_{TAB}(t)]^T$  в момент времени  $t'$ . Множество всех возможных состояний в различные моменты времени  $t \in T$  образуют двумерное пространство состояний  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{X} \subset \mathbb{R}_+^2, \forall t \in T, \mathbf{X} = \left[ \begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ 0 \leq \theta_{TAB} \leq 1 \end{array} \right],$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная угловая скорость вращения ведущих колёс.

На множестве  $\mathbf{X}$  можно выделить подмножество эксплуатационных состояний

$$\mathbf{X}_{ex} = \left[ \begin{array}{l} 0 \leq \omega \leq \omega_{ex.\max} \\ \theta_{ex.\min} \leq \theta_{TAB} \leq \theta_{ex.\max} \end{array} \right] \subset \mathbf{X}.$$

Выход состояния системы за пределы  $\mathbf{X}_{ex}$  нежелателен, хотя и не ведёт к аварийной ситуации.

Будем рассматривать автомобиль с ГСУ как многомерный нелинейный стационарный объект вида

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}) \\ \mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases},$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор управления

$$\mathbf{u} = [\beta_D, \beta_M, \beta_T, \gamma]^T;$$

$\beta_D$  – сигнал управления мощностью ДВС.  $\beta_D = -1$  соответствует отключенному со-

стоянию ДВС;  $\beta_M$  – сигнал управления вспомогательной силовой установкой (электромагнитным моментом вентильного электродвигателя);  $\beta_T$  – сигнал управления системой гидравлического торможения;  $\gamma$  – передаточное отношение трансмиссии автомобиля. При использовании пятиступенчатой коробки передач  $\gamma$  может принимать одно из пяти фиксированных значений.

Полагаем, что управляющие воздействия должны быть ограничены, т.е.

$$\mathbf{u} \in \mathbf{U} \subset \mathbb{R}^4 \quad \forall t \in T,$$

$$\mathbf{U} = \left[ \begin{array}{l} \beta_D = -1, \quad 0 \leq \beta_D \leq 1 \\ -1 \leq \beta_M \leq 1 \\ 0 \leq \beta_T \leq 1 \\ \gamma \in \{\gamma_i\}, i = \overline{1,5} \end{array} \right].$$

Вектор управления может быть задан как программное управление

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(t) = [\beta_D(t), \beta_M(t), \beta_T(t), \gamma(t)]^T$$

либо в виде координатного управления:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}) = [\beta_D(\mathbf{x}), \beta_M(\mathbf{x}), \beta_T(\mathbf{x}), \gamma(\mathbf{x})]^T;$$

$\xi$  – вектор возмущающих воздействий

$$\xi = \xi(t) = [\alpha(t), \vartheta_0(t)] \subset \mathbb{R}^2, \quad \forall t \in T;$$

$\alpha$  – уклон дороги;  $\vartheta_0$  – скорости встречного ветра;  $\mathbf{y}$  – вектор выхода:

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(t) = [V(t), G_T(t), E_T(t)]^T \subset \mathbb{R}^3, \quad \forall t \in T;$$

$V$  – скорость автомобиля;  $G_T$  – часовой расход топлива ДВС;  $E_T = f_T(C_{NOx}, C_{CO}, C_{HC})$  – степень токсичности отработавших газов ДВС;  $C_{NOx}$ ,  $C_{CO}$ ,  $C_{HC}$  – часовая эмиссия оксидов азота, оксида углерода и углеводородов соответственно;  $f(\cdot)$  и  $h(\cdot)$  – известные непрерывные или кусочно-непрерывные вектор-функции векторных аргументов, определенные на соответствующих множествах.

Кроме условий принадлежности состояния автомобиля с ГСУ и управляющих воздействий к множествам возможных состояний  $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ ,  $\forall t \in T$  и допустимых управлений  $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$ ,  $\forall t \in T$ , на рассматриваемую динамическую систему наложены ограничения в виде неголономной связи  $f_c(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$ , обусловленные динамическими свойствами собственно автомобиля, ГСУ и аппаратуры управления. Данные ограничения определяются кинематической схемой ГСУ и трансмиссии автомобиля

$$J_K \cdot \frac{d\omega}{dt} - M_{VR} + M_{SP} + M_{FR} = 0,$$

где  $J_K = J_K(\gamma)$  – суммарный момент инерции;  $M_{VR} = M_{VR}(\omega, \mathbf{u})$  – момент сил вращения, развиваемый ГСУ;  $M_{SP} = M_{SP}(\omega, \alpha)$  – момент сил сопротивления движению автомобиля;  $M_{FR}$  – момент сопротивления, обусловленный силами трения в элементах трансмиссии.

В последнем выражении момент инерции и все моменты сил приведены к оси вращения ведущих колёс.

### Методология выбора минимизируемого функционала

Основной функцией САУ ГСУ является выполнение задачи слежения, т.е. поддержание с минимальной ошибкой заданной скорости автомобиля  $V_{zd}(t)$  при наличии возмущений  $\xi(t)$ ,  $t \in T$ . Кроме этого процесс управления должен удовлетворять ряду дополнительных условий: минимизации расхода топлива, уровня токсичности отработавших газов, отклонения степени заряженности ТАБ от оптимальной. Каждое из этих условий может выражаться в виде соответствующего критерия оптимальности – требования обеспечения экстремума некоторого функционала  $J_X \in \mathbb{R}_+^1$ , зависящего от вида функций  $V_{zd}(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  и  $\xi(t)$ , которые являются аргументами данного функционала.

Критерии оптимальности должны быть согласованы между собой и с принятыми ограничениями для исключения тривиальных или вырожденных решений оптимизационной

задачи и, вместе с тем, достаточно точно описывать цель оптимизации [11, с.166]. Кроме этого критерии должны быть независимы и монотонны по предпочтению, т.е. улучшению качества управления должно соответствовать уменьшение значения соответствующего критерия [6, с.44, 45].

Для формальной постановки задачи оптимизации управления ГСУ определим многокритериальный (векторный) функционал качества  $\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = [J_V, J_\theta, J_G, J_E]^T$ ,  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}_+^4$ . Данный векторный функционал должен отражать величину потерь различных ресурсов при управлении автомобилем на ездовом цикле, определяемом заданной функцией изменения скорости  $V_{zd}(t)$ ,  $t \in T$ . Отдельные компоненты векторного функционала представляют собой критерии оптимальности по каждому из условий, которым должен удовлетворять процесс управления:

1. Критерий точности управления по скорости

$$\mathbf{J}_1 = J_V(V, T) = K_{NV} \int_{t_s}^{t_f} \left( (V_{zd}(t) - V(t))^2 + S_V^2(V(t)) \right) dt,$$

где  $S_V$  – функция штрафа за выход из области эксплуатационных режимов  $\mathbf{X}_{ex}$ :

$$S_V(V(t)) = \begin{cases} 0, & V(t) \leq V_{ex.max}, \\ V(t) - V_{ex.max}, & V(t) > V_{ex.max}; \end{cases}$$

$V_{ex.max}$  – максимальная эксплуатационная скорость.  $V_{ex.max} = r_k \omega_{ex.max}$ ;  $r_k$  – радиус качения ведущих колёс;

2. Критерий использования тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ)

$$\mathbf{J}_2 = J_\theta(\theta_{TAB}, T) = K_{N\theta} \int_{t_s}^{t_f} \left( \left( \begin{array}{c} \theta_{TAB,0}(t) - \\ -\theta_{TAB}(t) \end{array} \right)^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(t)) \right) dt,$$

где  $\theta_{TAB,0}$  – оптимальная степень заряженности ТАБ. Для NiMH аккумуляторов  $\theta_{TAB,0} = 0,6$ ;  $S_\theta$  – функция штрафа за выход из области эксплуатационных режимов  $\mathbf{X}_{ex}$ :

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = 0,$$

при  $\theta_{ex.min} \leq \theta_{TAB}(t) \leq \theta_{ex.max}$ ;

$$S_\theta(\theta_{TAB}(t)) = |\theta_{ex.min} - \theta_{TAB}(t)|,$$

при  $\theta_{ex.min} > \theta_{TAB}(t) > \theta_{ex.max}$ . Для NiMH аккумуляторов  $\theta_{ex.min} = 0,4$ ;  $\theta_{ex.max} = 0,8$ ;

3. Критерий экономичности ДВС

$$\mathbf{J}_3 = J_G(G_T, T) = K_{NG} \int_{t_s}^{t_f} G_T^2(t) dt;$$

4. Критерий степени токсичности отработавших газов ДВС

$$\mathbf{J}_4 = J_E(E_T, T) = K_{NE} \int_{t_s}^{t_f} E_T(t) dt,$$

где

$$E_T(t) = K_{ENox} C_{NOx}^2(t) + K_{ECO} C_{CO}^2(t) + K_{EHC} C_{HC}^2(t);$$

$K_{ENox}$ ,  $K_{ECO}$ ,  $K_{EHC}$  – коэффициенты токсичности соответствующих компонентов отработавших газов. Данные коэффициенты должны определяться с учётом влияния компонентов на здоровье человека и окружающую среду, а также их удельного содержания в отработавших газах. При этом должно выполняться соотношение

$$K_{ENox} + K_{ECO} + K_{EHC} = 1;$$

$K_{NV}$ ,  $K_{N\theta}$ ,  $K_{NG}$ ,  $K_{NE}$  – коэффициенты, обеспечивающие приведение компонентов векторного функционала качества к безразмерным величинам и нормирование.

В силу того, что отдельные компоненты векторного функционала имеют разный физический смысл и диапазоны изменения, их нормирование может быть выполнено согласно выражению [6, с. 83]

$$\mathbf{J}_i = \frac{\tilde{\mathbf{J}}_i - \mathbf{J}_{i\min}}{\mathbf{J}_{i0} - \mathbf{J}_{i\min}}, \quad i = \overline{1, 4},$$

где  $\tilde{\mathbf{J}}_i$  – значение  $i$ -го критерия до нормирования;  $\mathbf{J}_{i\min}$  – минимально-возможное значение соответствующего критерия, полученное в результате решения однокритериальной

задачи оптимизации без учёта остальных критериев;  $\mathbf{J}_{i0}$  – среднее значение  $i$ -го критерия при управлении близком к оптимальному на заданном ездовом цикле.

Для случая, когда  $\mathbf{J}_{i\min} = 0$  можно ввести нормирующие коэффициенты  $\mathbf{K}_{Ni} = \mathbf{J}_{i0}^{-1}$  для каждого из критериев

$$\mathbf{K}_N = [K_{NV}, K_{N\theta}, K_{NG}, K_{NE}]^T.$$

При вычислении критериев оптимальности в некоторых случаях интегрирование может осуществляться не на всём интервале наблюдения  $T$ , а в скользящем окне шириной  $\Delta T$   $[t, t + \Delta T]$ .

Учитывая, что  $\mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  в дальнейшем можно считать  $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, T) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ .

Решение многокритериальной задачи оптимизации управления приводит к формированию множества  $\mathbf{U}^P$  неулучшаемых по Парето (Парето-оптимальных) управлений [4, 5]

$$\mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U}^P \subset \mathbf{U},$$

$$\mathbf{U}^P = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}^{*P} \in \mathbf{U} \mid \exists \mathbf{u} \in \mathbf{U}: \\ \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \leq \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}^{*P}, T), \\ i = \overline{1, 4}; \mathbf{u} \neq \mathbf{u}^{*P} \end{array} \right\}$$

где  $\mathbf{J}_i$  –  $i$ -й компонент векторного функционала.

Управления, принадлежащие множеству  $\mathbf{U}^P$ , не могут быть улучшены одновременно по всем критериям, т.е. они являются несравнимыми по векторному функционалу, поскольку требования различных критериев противоречивы. Вследствие этого возникает проблема выбора единственного управления из множества Парето на основе некоторой схемы компромисса при достижении отдельными критериями условных минимумов. Существует достаточно много подходов к решению данной проблемы, которые строго определяют свойства оптимального решения и то, в каком смысле оптимальное решение превосходит все остальные допустимые решения [6, с. 57, 78; 7, с. 81].

Одним из подходов к обеспечению единственности решения задачи векторной оптимизации является использование принципа гарантированного результата (минимакса), согласно которому оптимальным считается управление  $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}$ , которое доставляет наилучшее значение наихудшему критерию качества:

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \max_{i=1,4} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T.$$

На различных участках ездового цикла приоритеты отдельных критериев, составляющих векторный функционал, могут изменяться. Для учёта различной степени важности критериев может быть введён вектор

$$\mathbf{K}_P = [K_{PV}, K_{P\theta}, K_{PG}, K_{PE}]^T,$$

$$\sum_i \mathbf{K}_{Pi} = 1, \quad \mathbf{K}_{Pi} > 0, \quad i = \overline{1, 4}.$$

Выбор компонентов вектора  $\mathbf{K}_P$  является нетривиальной задачей. Для её решения могут быть использованы метод анализа иерархий или метод классификации альтернатив, изложенные в [6, с. 176].

Векторная функция оптимального управления при неравнозначных критериях

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T,$$

где

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \max_{i=1,4} \{ \mathbf{K}_{Pi} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \},$$

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1.$$

Управление, являющееся решением минимаксной задачи, по сравнению с другими управлениями, гарантирует наибольшее удаление наихудшего из компонентов векторного функционала от границы области допустимых значений [7, с. 85].

Основным недостатком данного подхода является возможная потеря гладкости получаемой целевой функции  $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$ , однако во многих случаях применение минимаксной свёртки является достаточно удобным.

Другой подход к получению единственного решения оптимизационной задачи предполагает сведение многокритериальной оптимизации к однокритериальной путём линейного свёртывания векторного критерия в суперкритерий

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T), \quad \forall t \in T,$$

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{P_i} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T),$$

$$J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T) \in \mathbb{R}_+^1.$$

Простота и наглядность данного подхода определяют его наибольшее распространение. Вместе с тем, эффективное использование линейной свёртки критериев возможно только в случае, когда парето-оптимальные решения в пространстве критериев оптимальности образуют выпуклое множество. В противном случае некоторые управления  $\mathbf{u}^* \in \mathbf{U}^p$  не могут быть получены соответствующим выбором  $\mathbf{K}_p$ . Кроме того, в ряде случаев малым приращениям весовых коэффициентов  $\mathbf{K}_{P_i}$ ,  $i = \overline{1, 4}$  соответствуют большие приращения функционала  $J_{SV}$  и решение оптимизационной задачи может оказаться неустойчивым [6, с. 59, 62, 92; 7, с. 83].

Задачу оптимизации управления автомобильной ГСУ сформулируем следующим образом. Для ездового цикла, определяемого заданной функцией изменения скорости автомобиля  $V_{zd}(t)$ ,  $t \in T$ , найти управление  $\mathbf{u}^*(t)$ , которое доставляет минимум функционалу  $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T)$  и удовлетворяет принятым ограничениям

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, T) = \min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T),$$

$$\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^* \in \mathbf{U}, \quad f_c(\dot{\mathbf{x}}^*, \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = 0 \\ \forall t \in T.$$

При этом значение  $J_{SV}^*$  будем называть оптимальным значением функционала, а векторную функцию

$$\mathbf{u}^*(t) = \arg \min_{\mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, T),$$

доставляющую функционалу оптимальное значение – оптимальным управлением.

### Особенности постановки оптимизационной задачи в дискретном виде

Модель гибридного автомобиля как объекта управления по скорости может быть представлена в дискретном виде. Для этого выберем шаг дискретизации процесса управления по времени  $\Delta T$ . Будем рассматривать векторные функции  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$  и  $\xi(t)$  только в дискретные моменты времени  $t_k = t_s + k\Delta T$ ,  $k = \overline{0, N}$ ,  $N = (t_f - t_s)\Delta T^{-1}$ :  $\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(t_k)$ ;  $\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(t_k)$ ;  $\mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(t_k)$  и  $\xi(k) = \xi(t_k)$ ,  $t_k \in T$ .

Если применить замену производной конечной разностью

$$\dot{\mathbf{x}} \approx \Delta \mathbf{x} = (\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k))\Delta T^{-1},$$

можно записать разностные уравнения автомобиля с ГСУ:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \Delta T \cdot f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \xi(k)) \\ \mathbf{y}(k) = h(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \end{cases}.$$

Уравнение неголономной связи в этом случае приобретет вид:

$$J_K(k) \cdot \frac{\omega(k+1) - \omega(k)}{\Delta T} - \\ - M_{VR}(k) + M_{SP}(k) + M_{FR}(k) = 0$$

Для того, чтобы замена операции дифференцирования взятием конечной разности была правомерна, необходимо, чтобы  $\Delta T$  было мало по сравнению с наименьшей из постоянных времени процесса управления.

О качестве каждого  $k$ -го шага управления, переводящего систему из состояния  $\mathbf{x}(k)$  в состояние  $\mathbf{x}(k+1)$  можно судить по следующим критериям

$$J_{V_k}(k) = K_{NV} \left( \left( V_{zd}(k+1) - V(k+1) \right)^2 + S_V^2(V(k+1)) \right);$$

$$J_{\theta_k}(k) = K_{N\theta} \left( \left( \theta_{TAB,0}(k+1) - \theta_{TAB}(k+1) \right)^2 + S_\theta^2(\theta_{TAB}(k+1)) \right);$$

$$J_{G_k}(k) = K_{NG} G_T^2(k);$$

$$J_{Ek}(k) = K_{NE} \left( K_{ENox} \cdot C_{NOx}^2(k) + K_{ECO} \cdot C_{CO}^2(k) + K_{EHC} \cdot C_{HC}^2(k) \right).$$

Указанные критерии можно представить в виде вектора

$$\mathfrak{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, k) = \mathfrak{J}(k) = [J_{V_k}, J_{\theta_k}, J_{G_k}, J_{Ek}]^T,$$

характеризующего качество управления на  $k$ -м шаге. Векторный функционал качества управления после проведения дискретизации примет вид:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, N) = \Delta T \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \mathfrak{J}(k).$$

Очевидно, что постоянный множитель  $\Delta T$  для решения оптимизационной задачи несущественен и в дальнейшем его можно исключить. Учитывая, что  $\mathbf{y} = h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  будем считать  $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, N) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N)$ .

Для обеспечения единственности решения задачи из области парето – оптимальных управлений, определяемых векторным функционалом, преобразуем векторный функционал к скалярному виду одним из следующих способов

$$\begin{aligned} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) &= \max_{i=1,4} \{ \mathbf{K}_{Pi} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) \} = \\ &= \max_{i=1,4} \left\{ \mathbf{K}_{Pi} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \mathfrak{J}_i(k) \right\} \end{aligned}$$

– при использовании минимаксной свёртки и

$$\begin{aligned} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) &= \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathbf{J}_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{J}_i(k) \end{aligned}$$

– при использовании линейной свёртки критериев оптимальности.

Теперь оптимизационная задача сводится к выбору оптимальной последовательности управлений  $\mathbf{u}^*(k)$ , которая на заданном ездовом цикле  $V_{zd}(k)$ ,  $k = \overline{0, N}$  доставляет минимум функционалу  $J_{SV} = J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N)$  и удовлетворяет ограничениям на переменные состояния, управляющие воздействия и ограничениям неголономной связи:

$$J_{SV}^* = J_{SV}(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, N) = \min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N),$$

$$\mathbf{x}^*(k) \in \mathbf{X}, \quad \mathbf{u}^*(k) \in \mathbf{U},$$

$$f_c(\Delta \mathbf{x}^*(k), \mathbf{x}^*(k), \mathbf{u}^*(k)) = 0, \quad \forall k = \overline{0, N}.$$

При этом значение  $J_{SV}^*$  будем называть оптимальным значением функционала качества управления, а векторную функцию

$$\mathbf{u}^* = \arg \min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N),$$

доставляющую функционалу оптимальное значение – оптимальным управлением.

### Регулятор скорости автомобиля

Решение сформулированной оптимизационной задачи наталкивается на ряд трудностей, связанных с идентификацией математической модели гибридного автомобиля как объекта управления, а также с недостатком априорной информации о параметрах ездового цикла.

Одним из способов преодоления указанных трудностей является использование концепции адаптивного управления, когда низкая точность математических моделей и недостаток априорной информации восполняются за счёт более полного использования текущей информации. В этом случае характеристики системы управления целесообразно предста-

вить в виде параметрически задаваемых функций, а настройку производить путём итеративной оптимизации параметров.

Вместе с тем, нахождение оптимального управления  $\mathbf{u}^*$  на заданном ездовом цикле не указывает конструктивного пути для построения системы управления. В связи с этим возникает задача синтеза алгоритма управления (регулятора), обеспечивающего получение управления оптимального или близкого к оптимальному за счёт замыкания системы по переменным состояния:  $\mathbf{u}^* = f_u(\mathbf{x}, V_{zd})$ . Кроме данного регулятора САУ ГСУ должна иметь в своём составе блок адаптации, обеспечивающий асимптотическое приближение  $J_{SV} \rightarrow J_{SV}^*$  и  $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{u}^*$  при  $t \rightarrow \infty$  путём настройки параметров регулятора.

Рассмотрим структурную схему САУ ГСУ (рис. 1). На данной схеме  $M_{VR.zd}$  – момент вращения ГСУ, требуемый для поддержания заданного тягово-скоростного режима. При этом система гидравлического торможения условно отнесена к ГСУ для удобства изложения. Сигнал  $M_{VR.zd}$  является выходным для регулятора скорости автомобиля  $M_{VR.zd} = f_{V.RG}(V, V_{zd})$  и входным сигналом адаптивного регулятора ГСУ.

Момент сил сопротивления движению автомобиля, приведенный к ведущим колёсам, определяется из выражения [12, с.330]

$$M_{SP} = (F_K + F_\alpha + F_L) r_k,$$

где  $F_K = k_{pk} m_A g \cdot \cos(\alpha)$  – сила сопротивления качению, являющаяся следствием деформаций, возникающих в зоне контакта шины с дорогой;  $F_\alpha = m_A g \cdot \sin(\alpha)$  – сила

сопротивления движению на подъём или под уклон;  $F_L = 0,5 \rho_0 c_w S_A (V + \mathcal{G}_0)^2$  – сила аэродинамического сопротивления;  $k_{pk}$  – коэффициент сопротивления перекачиванию, который зависит от особенностей дорожного покрытия и качества шин;  $m_A$  – масса автомобиля;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_0$  – плотность воздуха;  $c_w$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $S_A$  – площадь наибольшего поперечного сечения автомобиля.

Если  $M_{VR.zd} = M_{VR.zd}(t)$  рассматривать как скалярное управляющее воздействие  $M_{VR.zd} \in [M_{VR.min}, M_{VR.max}] \subset \mathbb{R}^1, \forall t \in T$  и предположить, что  $\mathcal{G}_0 = 0$ , гибридный автомобиль как динамическая система может быть представлен моделью вида

$$a\dot{V} + bV^2 + c = M_{VR.zd},$$

где  $a = J_K r_k^{-1}$ ;  $b = 0,5 \rho_0 c_w S_A r_k$ ;  $c = (F_\alpha + F_K) r_k + M_{FR}$ .

Применим к управляющему воздействию системы нелинейное преобразование вида

$$\tilde{M}_{VR.zd} = f_{np}(M_{VR.zd}, V) = M_{VR.zd} - bV^2 + \tilde{b}V,$$

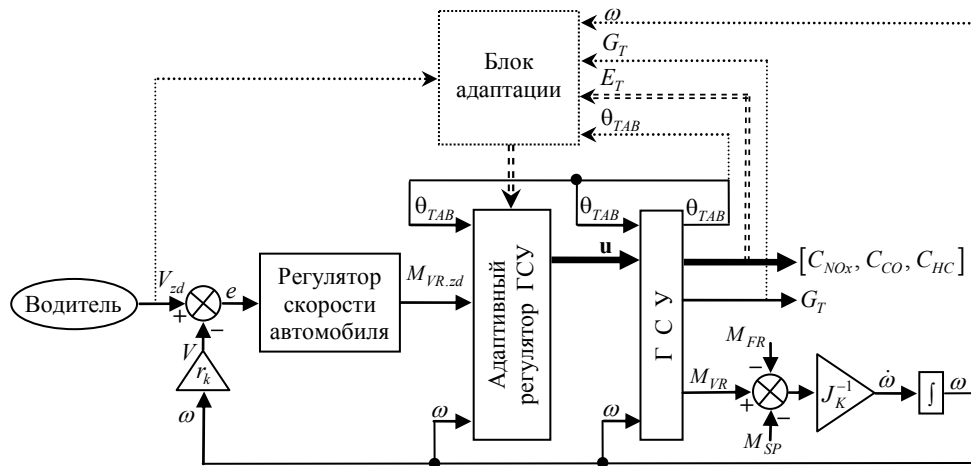


Рис. 1. Система автоматического управления силовой установкой гибридного автомобиля

где  $\tilde{b} = \text{const}$ . В результате получим линейное представление нелинейной модели гибридного автомобиля относительно управления  $\tilde{M}_{VR.zd}$ :  $a\dot{V} + \tilde{b}V + c = \tilde{M}_{VR.zd}$ .

Для данной модели с использованием стандартных методов теории линейных систем может быть получен регулятор скорости автомобиля  $\tilde{M}_{VR.zd} = \tilde{M}_{VR.zd}(V, V_{zd})$ , обеспечивающий минимизацию функционала  $J_V \rightarrow \min$ , и исследована устойчивость системы. Затем управляющее воздействие  $M_{VR.zd}$  находится с использованием обратного преобразования

$$M_{VR.zd} = f_{np}^{-1}(\tilde{M}_{VR.zd}, V) = f_{V.RG}(V, V_{zd}).$$

### Адаптивное управление агрегатами гибридной силовой установки

Для ГСУ с параллельной схемой построения можно записать

$$M_{VR}(\omega, \mathbf{u}) = \gamma M_{DVS}(\omega\gamma^{-1}, \beta_D) + \gamma_M M_{VD}(\omega\gamma_M^{-1}, \beta_M) - M_{irm}(\beta_T),$$

где  $M_{DVS}$  – эффективный крутящий момент ДВС,

$$M_{DVS} \in [M_{DVS.min}(\omega\gamma^{-1}), M_{DVS.max}(\omega\gamma^{-1})];$$

$M_{VD}$  – момент вращения или торможения, развиваемый электроприводом в двигательном или генераторном режиме,

$$M_{VD} \in [M_{VD.min}(\omega\gamma_M^{-1}), M_{VD.max}(\omega\gamma_M^{-1})];$$

$M_{irm}$  – тормозной момент, развиваемый гидравлической системой торможения,

$$M_{irm} \in [0, M_{irm.max}];$$

$\gamma_M$  – передаточное отношение трансмиссии от тягового электродвигателя к ведущим колёсам.

Задачей адаптивного регулятора ГСУ является такое перераспределение нагрузки между отдельными её агрегатами, которое обеспе-

чивает поддержание заданного тягово-скоростного режима  $M_{VR} = M_{VR.zd}$  и обращает в минимум выбранный функционал качества  $J_{SV} \rightarrow \min$ .

С целью уменьшения размерности задачи для описания перераспределения нагрузки между агрегатами ГСУ введём коэффициент использования электропривода

$$\varepsilon = \frac{\gamma_M M_{VD}}{M_{VR}}, \quad M_{VR} \neq 0.$$

В процессе торможения автомобиля, когда  $M_{VR} < 0$ , коэффициент  $\varepsilon \in [0, 1]$  характеризует уровень рекуперации энергии торможения. При  $\varepsilon = 0$  торможение осуществляется исключительно за счёт гидравлической тормозной системы. При  $\varepsilon = 1$  весь требуемый тормозной момент создаётся тяговым электроприводом в генераторном режиме:  $M_{VR} = \gamma_M \cdot M_{VD}$ ,  $M_{VD.min} \leq M_{VD} < 0$ . При  $0 < \varepsilon < 1$  тормозное усилие создаётся с использованием обеих тормозных систем.

При разгоне автомобиля либо равномерном движении, когда  $M_{VR} > 0$ , коэффициент  $\varepsilon \in [-\infty, 1]$  характеризует перераспределение потребляемой энергии между ДВС и тяговым электроприводом. При  $\varepsilon < 0$  тяговый электропривод работает в генераторном режиме и осуществляет подзарядку тяговой аккумуляторной батареи с использованием энергии, вырабатываемой ДВС. Если  $\varepsilon = 0$ , для создания тягового усилия используется только ДВС. При  $0 < \varepsilon < 1$  тяговое усилие создаётся за счёт совместного использования тягового электропривода и ДВС. При  $\varepsilon = 1$  используется только тяговый электропривод.

Рассмотрим дискретный процесс управления ГСУ. При известных моделях агрегатов, входящих в состав ГСУ:

$$M_{DVS} = M_{DVS}\left(\frac{\omega}{\gamma}, \beta_D\right),$$

$$M_{VD} = M_{VD}\left(\frac{\omega}{\gamma_M}, \beta_M\right) \text{ и } M_{irm} = M_{irm}(\beta_T), \text{ могут быть получены их обратные модели вида}$$

$$\beta_D = M_{DVS}^{-1}\left(\frac{\omega}{\gamma}, M_{DVS}\right), \quad \beta_M = M_{VD}^{-1}\left(\frac{\omega}{\gamma_M}, M_{VD}\right)$$

и  $\beta_T = M_{irm}^{-1}(M_{irm})$ . В этом случае, на  $k$ -м шаге управления при заданном коэффициенте

те использования электропривода  $\varepsilon(k)$  управляющие воздействия ГСУ  $\mathbf{u}(k) = [\beta_D(k), \beta_M(k), \beta_T(k), \gamma(k)]^T$ , которые обеспечивают требуемое значение  $M_{VR.zd}(k)$ , находятся с использованием следующих выражений.

При  $M_{VR.zd}(k) < 0$  компоненты вектора управления

$$\beta_D(k) = -1;$$

$$\beta_M(k) = M_{VD}^{-1}(\omega(k) \cdot \gamma_M^{-1}, M_{VD.zd}(k));$$

$$\beta_T(k) = M_{urm}^{-1}(M_{urm.zd}(k));$$

$$\gamma(k) = \gamma(k-1),$$

где

$$M_{VD.zd}(k) = \max \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.min} \right\};$$

$$M_{urm.zd}(k) = \min \left\{ \gamma_M M_{VD.zd}(k) - M_{VR.zd}(k), M_{urm.max} \right\};$$

Компоненты вектора управления при  $M_{VR.zd}(k) > 0$

$$\beta_D(k) = \begin{cases} M_{DVS}^{-1}(\omega(k) \cdot \gamma^{-1}(k), M_{DVS.zd}(k)), & \text{при } M_{DVS.zd}(k) \geq M_{DVS.min}; \\ -1, & \text{при } M_{DVS.zd}(k) < M_{DVS.min}; \end{cases}$$

$$\beta_M(k) = M_{VD}^{-1}(\omega(k) \cdot \gamma_M^{-1}, M_{VD.zd}(k));$$

$$\beta_T(k) = 0;$$

$$\gamma(k) = \gamma(\omega(k), \beta_D(k-1)) = \arg \min_{\gamma \in \{\gamma_i\}, i=1,5} \left\{ g_e(\omega(k) \cdot \gamma^{-1}(k), \beta_D(k-1)) \right\},$$

где

$$M_{DVS.zd}(k) = \min \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k) - \gamma_M M_{VD.zd}(k)}{\gamma(k)}, M_{DVS.max} \right\};$$

$$M_{VD.zd}(k) = \min \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.max} \right\}, \quad \text{при } M_{VD.zd}(k) > 0;$$

$$M_{VD.zd}(k) = \max \left\{ \frac{M_{VR.zd}(k)}{\gamma_M} \varepsilon(k), M_{VD.min} \right\}, \quad \text{при } M_{VD.zd}(k) < 0;$$

$g_e = g_e(\omega \gamma^{-1}, \beta_D)$  – зависимость эффективного циклового расхода топлива от скорости вращения коленчатого вала и положения органа управления мощностью ДВС. Использование данной зависимости для определения оптимального передаточного отношения трансмиссии предполагает гладкость сигнала  $\beta_D$ .

При  $M_{VR.zd}(k) = 0$  все агрегаты ГСУ отключены:  $\beta_D(k) = -1$ ;  $\beta_M(k) = 0$ ;  $\beta_T(k) = 0$ ;  $\gamma(k) = \gamma(k-1)$ .

Зависимости

$$M_{DVS} = M_{DVS}(\omega \gamma^{-1}, \beta_D), \quad g_e = g_e(\omega \gamma^{-1}, \beta_D),$$

$$M_{VD} = M_{VD}(\omega \gamma_M^{-1}, \beta_M), \quad M_{urm} = M_{urm}(\beta_T)$$

могут быть получены в результате теоретических исследований или стендовых испытаний агрегатов, входящих в состав ГСУ.

Таким образом, задача оптимизации управления ГСУ может быть сведена к задаче определения функции

$$\varepsilon(k) = \varepsilon(M_{VR.zd}(k), \mathbf{x}(k)),$$

которая минимизирует функционал  $J_{SV}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N) \rightarrow \min$  на текущем ездовом цикле. Затем, при известном коэффициенте использования электропривода  $\varepsilon$ , управляющие воздействия ГСУ определяются регулятором ГСУ  $\mathbf{u} = f_{GSU.RG}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$  согласно выражениям, приведенным выше.

Учитывая недостаток априорной информации о характере ездового цикла, подобно системам прогнозирующего модельного управления, величина коэффициента использования электропривода  $\varepsilon$  на  $k$ -м шаге должна выбираться системой управления с учётом оценок будущего значения критериев качества. Очевидно, что выбор стратегии управления должен стремиться к уменьшению величины потерь различных ресурсов на достаточно длительном отрезке времени  $T \rightarrow \infty$ . При этом проявляется несовершенство выбранного функционала, который неограниченно возрастает при  $N \rightarrow \infty$ . Для преодоления указанного недостатка при вычислении функционала качества управления будем использовать взвешенное (discounted) суммирование критериев.

Для линейной свёртки критериев оптимальности получим:

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{j=0}^{\infty} \mu^j \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{p_i} \mathfrak{F}_i(k+j),$$

где  $\mu$  – дисконтный фактор,  $0 < \mu < 1$ . Дисконтный фактор учитывает, что чем дальше САУ ГСУ заглядывает в будущее при выборе управляющих воздействий, тем меньше её уверенность в оценке будущих потерь различных ресурсов из-за недостатка априорной информации.

Рассмотрим структурную схему адаптивного регулятора гибридной силовой установки, который реализует концепцию нейросетевого управления на основе адаптивной критики [8 – 10], приведенную на рис. 2.

На  $k$ -м шаге управления вычисление коэффициента использования электропривода осуществляется нейроконтроллером

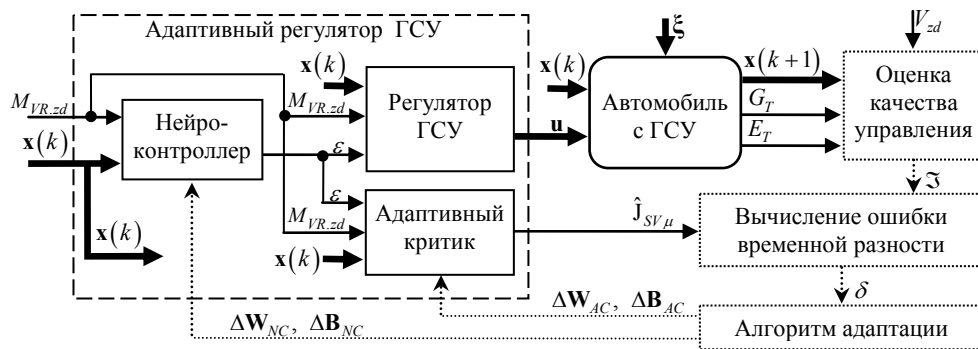


Рис. 2. Адаптивный регулятор гибридной силовой установки

$$\varepsilon = f_{GSU.NC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}),$$

который реализован в виде трёхслойной искусственной сети (ИНС) прямого распространения с активационной функцией нейронов скрытых слоёв в виде функции гиперболического тангенса и линейном нейроне выходного слоя:

$$\left[ \begin{array}{c} \bar{M}_{VR.zd} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{array} \right] = 2 \left( \left[ \begin{array}{c} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{array} \right] - \min_{k=0,N} \left\{ \left[ \begin{array}{c} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{array} \right] \right\} \right);$$

$$\left( \max_{k=0,N} \left\{ \left[ \begin{array}{c} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{array} \right] \right\} - \min_{k=0,N} \left\{ \left[ \begin{array}{c} M_{VR.zd} \\ \mathbf{x} \end{array} \right] \right\} \right) - 1$$

$$\mathbf{N}_{NC1} = \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{NC1} \left[ \begin{array}{c} \bar{M}_{VR.zd} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{array} \right] + \mathbf{B}_{NC1}\right)\right)} - 1;$$

$$\mathbf{N}_{NC2} = \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{NC2} \mathbf{N}_{NC1} + \mathbf{B}_{NC2}\right)\right)} - 1;$$

$$\bar{\varepsilon} = \mathbf{W}_{NC3} \mathbf{N}_{NC2} + \mathbf{B}_{NC3};$$

$$\varepsilon = 0,5(\bar{\varepsilon} + 1) \left( \max_{k=0,N} \{\varepsilon\} - \min_{k=0,N} \{\varepsilon\} \right) + \min_{k=0,N} \{\varepsilon\}$$

где  $\mathbf{W}_{NC1}$ ,  $\mathbf{W}_{NC2}$ ,  $\mathbf{W}_{NC3}$  – матрицы весовых коэффициентов нейронов первого [12×3], второго [4×12] и третьего [1×4] слоев соответственно;  $\mathbf{B}_{NC1}$ ,  $\mathbf{B}_{NC2}$ ,  $\mathbf{B}_{NC3}$  – векторы смещений нейронов первого [12×1], второго [4×1] и третьего [1×1] слоев соответственно. Символом «:» обозначается поэлементное деление векторов.

Затем регулятор ГСУ определяет вектор управления  $\mathbf{u} = f_{GSU.RG}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$ .

Управляющие воздействия подаются на вход объекта управления.

Адаптивный критик осуществляет оценку качества управления на данном шаге  $\hat{J}_{SV\mu} = f_{GSU.AC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$  с учётом прогноза будущих последствий данного управления. Адаптивный критик реализован на базе искусственной нейронной сети с архитектурой, подобной ИНС нейроконтроллера

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_{AC1} &= \\ &= \frac{2}{1 + \exp\left(-2\left(\mathbf{W}_{AC1}\begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \\ \bar{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{AC1}\right)\right)} - 1; \\ \mathbf{N}_{AC2} &= \frac{2}{1 + \exp\left(-2(\mathbf{W}_{AC2}\mathbf{N}_{AC1} + \mathbf{B}_{AC2})\right)} - 1; \\ \hat{J}_{SV\mu} &= \mathbf{W}_{AC3}\mathbf{N}_{AC2} + \mathbf{B}_{AC3}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{W}_{AC1}$ ,  $\mathbf{W}_{AC2}$ ,  $\mathbf{W}_{AC3}$  – матрицы весовых коэффициентов нейронов первого  $[12 \times 4]$ , второго  $[4 \times 12]$  и третьего  $[1 \times 4]$  слоев соответственно;  $\mathbf{B}_{AC1}$ ,  $\mathbf{B}_{AC2}$ ,  $\mathbf{B}_{AC3}$  – векторы смещений нейронов первого  $[12 \times 1]$ , второго  $[4 \times 1]$  и третьего  $[1 \times 1]$  слоев соответственно.

Блок адаптации обеспечивает параметрическую настройку (обучение) ИНС нейроконтроллера и адаптивного критика путём настройки соответствующих матриц весовых коэффициентов и векторов смещений нейронов. Целевой функцией настройки нейроконтроллера является минимизация функционала  $J_{SV\mu} \rightarrow \min$ . Адаптивный критик обучается с минимальной ошибкой аппроксимировать функцию  $J_{SV\mu} = f_{GSU.AC}(\mathbf{x}, M_{VR.zd}, \varepsilon)$ .

Выражение для функционала качества управления на  $k$ -м шаге может быть записано в виде

$$J_{SV\mu}(k) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{F}_i(k) + \mu J_{SV\mu}(k+1).$$

В этом случае ошибку адаптивного критика можно представить в виде ошибки временной разности

$$\begin{aligned} \delta(k) &= \hat{J}_{SV\mu}(k) - \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{F}_i(k) + \mu \hat{J}_{SV\mu}(k+1) = \\ &= \hat{J}_{SV\mu}(k-1) - \sum_{i=1}^4 \mathbf{K}_{Pi} \mathfrak{F}_i(k-1) + \mu \hat{J}_{SV\mu}(k) \end{aligned}$$

Для вычисления ошибки временной разности должны использоваться оценки  $\hat{J}_{SV\mu}(k)$  и  $\hat{J}_{SV\mu}(k+1)$  при одних и тех же значениях параметров ИНС адаптивного критика.

Коррекция параметров ИНС адаптивного критика осуществляется из условия минимизации квадратичной ошибки  $e = 0,5 \cdot \delta^2$  согласно выражениям

$$\mathbf{W}_{ACi}(k+1) = \mathbf{W}_{ACi}(k) + \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k);$$

$$\mathbf{B}_{ACi}(k+1) = \mathbf{B}_{ACi}(k) + \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k), \quad i = \overline{1, 3},$$

где

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k) &= \nu_{AC} \Delta \mathbf{W}_{ACi}(k-1) - \\ &- \lambda_{AC} (1 - \nu_{AC}) \delta(k) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \mathbf{W}_{ACi}(k)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k) &= \nu_{AC} \Delta \mathbf{B}_{ACi}(k-1) - \\ &- \lambda_{AC} (1 - \nu_{AC}) \delta(k) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \mathbf{B}_{ACi}(k)} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC3}} = 1;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} = \mathbf{W}_{AC3}^T \times (1 - \mathbf{N}_{AC2}^2);$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} = \mathbf{W}_{AC2}^T \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} \times (1 - \mathbf{N}_{AC1}^2);$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC3}} = \mathbf{N}_{AC2}^T;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC2}} = \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC2}} \mathbf{N}_{AC1}^T;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC2}} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} \mathbf{N}_{NC1}^T;$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{W}_{AC1}} = \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} \cdot [\bar{\varepsilon} \quad \bar{M}_{VR.zd} \quad \bar{\mathbf{x}}];$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC1}} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC1}} \cdot [\bar{M}_{VR.zd} \quad \bar{\mathbf{x}}];$$

$\lambda_{AC}$  – коэффициент скорости обучения ИНС адаптивного критика;  $\nu_{AC}$  – коэффициент инерционности обучения, который в ряде случаев позволяет преодолеть локальные минимумы целевой функции в пространстве параметров сети; символом « $\times$ » обозначается поэлементное умножение векторов.

Коррекция параметров ИНС нейроконтроллера осуществляется согласно выражениям:

$$\mathbf{W}_{NCi}(k+1) = \mathbf{W}_{NCi}(k) + \Delta \mathbf{W}_{NCi}(k);$$

$$\mathbf{B}_{NCi}(k+1) = \mathbf{B}_{NCi}(k) + \Delta \mathbf{B}_{NCi}(k), \quad i = \overline{1, 3},$$

где

$$\Delta \mathbf{W}_{NCi}(k) = \nu_{NC} \Delta \mathbf{W}_{NCi}(k-1) - \lambda_{NC} \cdot (1 - \nu_{NC}) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial \mathbf{W}_{NCi}(k)};$$

$$\Delta \mathbf{B}_{NCi}(k) = \nu_{NC} \Delta \mathbf{B}_{NCi}(k-1) - \lambda_{NC} (1 - \nu_{NC}) \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} \cdot \frac{\partial \varepsilon(k)}{\partial \mathbf{B}_{NCi}(k)};$$

$$\frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}(k)}{\partial \varepsilon(k)} = \left\{ \mathbf{W}_{AC1}^T \cdot \frac{\partial \hat{J}_{SV\mu}}{\partial \mathbf{B}_{AC1}} \right\}_1;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC3}} = 1;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} = \mathbf{W}_{NC3}^T \times (1 - \mathbf{N}_{NC2}^2);$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC1}} = \mathbf{W}_{NC2}^T \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{B}_{NC2}} \times (1 - \mathbf{N}_{NC1}^2);$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{W}_{NC3}} = \mathbf{N}_{NC2}^T;$$

$\lambda_{NC}$  – коэффициент скорости обучения ИНС нейроконтроллера;  $\nu_{NC}$  – коэффициент инерционности обучения. Символом « $\{\cdot\}_1$ » обозначается первый элемент вектора.

Таким образом, на каждом шаге улучшается закон управления путём обучения нейроконтроллера, а также повышается способность системы оценивать ситуацию путём обучения критика. Коррекция параметров продолжается пока система не достигнет требуемого качества управления.

## Выводы

На основании анализа особенностей автомобиля с гибридной силовой установкой как объекта управления по скорости обоснована необходимость использования векторного критерия оптимальности при постановке и решении оптимизационных задач.

Согласно предложенной методике выбора функционала качества управления, компонентами данного функционала являются критерии точности управления по скорости, эффективности использования тяговой аккумуляторной батареи, экономичности и экологической безопасности ДВС.

Для получения единственного решения оптимизационной задачи из множества парето-оптимальных решений предложено использовать принцип гарантированного результата (минимакса) либо линейное свёртывание векторного критерия в суперкритерий.

При решении задачи оптимизации управления гибридной силовой установкой предложено использовать преобразование нелинейного уравнения автомобиля как объекта управления по скорости к эквивалентной линейной форме на основе применения соответствующего нелинейного преобразования к управляющему воздействию.

Уменьшение размерности оптимизационной задачи возможно путём введения новой пе-

ременной – коэффициента использования электропривода, который определённым образом связан с вектором управления силовой установкой при известных задающем воздействии и векторе состояния.

Значения коэффициента использования электропривода на каждом шаге управления, асимптотически приближающиеся к оптимальным в процессе движения по заданному ездовому циклу, могут быть получены на основе использования метода нейросетевых адаптивных критиков при постановке оптимизационной задачи в дискретном виде.

### Литература

1. Development of Fuzzy Logic and Neural Network Control and Advance Emissions Modeling for Parallel Hybrid Vehicles / A. Rajagopalan, G. Washington, G. Rizzoni, Y. Guezennec. Center for Automotive Research. The Ohio State University Columbus, Ohio. Subcontract Report – December 2003 (<http://www.osti.gov/bridge>).
2. Сериков С.А. Нечітка модель системи керування силовою установкою гібридного автомобіля / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.А. Дзюбенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2006. – Вип. IV(39). – С. 240–247.
3. Сериков С.А. Синтез оптимального управління гібридною силовою установкою / С.А. Сериков // Проблеми управління і інформатики. – 2009. – №2. – С. 37–47.
4. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 255 с.
5. Лазарев Ю.Н. Алгоритм решения многокритериальных задач управления / Ю.Н. Лазарев, М.И. Гераськин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 3, №1. – 2001. – С.80 – 85.
6. Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений / А.В. Лотов, И.И. Поспелова: Учебное пособие – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
7. Лазарев Ю.Н. Управление траекториями аэрокосмических аппаратов / Ю.Н. Лазарев – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2007. – 274 с.
8. Мосалов О.П. Самообучающиеся агенты на основе нейросетевых адаптивных критиков / О.П. Мосалов, Д.В. Прохоров, В.Г. Редько // Искусственный интеллект, 2004. – Т.3. С. 550-560.
9. Редько В.Г. Нейросетевые адаптивные критики / В.Г. Редько, Д.В. Прохоров // Научная сессия МИФИ-2004. Ч.2 Нейроинформатика-2004. – С. 77-84.
10. Чернодуб А.Н. Обзор методов нейроуправления / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования, 2011. – № 2. – С. 79-94.
11. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы / И.В. Мирошник – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.: ил.
12. Автомобильный справочник. Перевод с англ. Первое русское издание. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2002. – 896 с.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2011 г.