

Бажинов¹ А.В., Веселая² М.А.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО КРИТИКА

Рассмотрено перспективный подход к реализации адаптивного управления силовой установкой электромобиля с использованием адаптивного критика. Адаптивный критик содержится в специальном блоке, оценивающий качество работы системы управления силовой установкой электромобиля

Ключевые слова: адаптивный критик, электромобиль, силовая установка, система управления

Постановка проблемы. Эффективность работы силовой установки электромобиля в значительной степени определяется характеристиками системы управления (САУ), которая обеспечивает перераспределение потоков мощности между ходовой частью автомобиля, электродвигателем и контуром рекуперации энергии. Применяемые методы анализа и синтеза САУ не уделяют достаточно внимания многокритериальности возникающих оптимизационных задач. Данные обстоятельства не позволяют в полной мере раскрыть потенциальные возможности электромобилей.

Одним из наиболее перспективных и неисследованных подходов к реализации адаптивного управления ГСУ является управление с использованием нейросетевого адаптивного критика (Adaptive Critic), известный также как «Приближенное динамическое программирование» (Approximated Dynamic Programming) [1,2]. В этом случае в структурной схеме САУ содержится специальный блок – Критик, оценивающий качество работы всей системы управления. Данный подход предполагает адаптацию стратегии управления расходом электроэнергии на основе концепции обучения с подкреплением.

В связи с этим **целью работы** является создание рациональной системы управление силовой установкой электромобиля с использованием нейросетевого адаптивного критика, который предполагает управление расходом электроэнергии на основе обучения.

Результаты исследования. В процессе функционирования САУ электромобиля на $-m$ шаге управления вычисление коэффициента расходования электроэнергии аккумулятора нейроконтроллером $\varepsilon = F_{ESU.NC}(x, M_{ESU.zd})$, который реализован в виде трехслойной ИНС прямого распространения с активационной функцией нейронов скрытых слоев в виде функции гиперболического тангенса и линейном нейроне выходного слоя

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}(k) \\ \bar{M}_{ESU.zd}(k) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{ESU.zd}(k) \end{bmatrix} - \frac{M}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{ESU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} \right) : \frac{std}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{ESU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\},$$

$$N_{31} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(W_{31} \cdot [\bar{\omega}(k) \quad \bar{\theta}_{TAB}(k) \quad \bar{M}_{ESU.zd}(k)]^T + B_{31} \right) \right) \right) - 1,$$

$$N_{31} = 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot (W_{31} \cdot W_{32} + B_{32}) \right) \right) - 1,$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}(k) &= W_{33} \cdot W_{32} + B_{33}, \\ \bar{\varepsilon}(k) &= \bar{\varepsilon}(k) \cdot \frac{std}{k=0, N} \{ \varepsilon(k) \} + \frac{M}{k=0, N} \{ \varepsilon(k) \}, \end{aligned} \quad (1)$$

где W_{31} , W_{32} , W_{33} - матрицы весовых коэффициентов нейрона первого, второго и третьего слоев ИНС нейроконтроллера соответственно;

B_{31}, B_{32}, B_{33} - векторы смещений нейронов соответствующих слоев;
Символ «:» в нормирующем выражении обозначает поэлементное деление векторов.

Одновременно нейросетевая модель $\left[\hat{M}_{EVS}, \hat{\theta}_{TAB} \right]^T = F_{ESU.MD}(\varepsilon, x, M_{ESU.zd})$ на основании текущего расхода электроэнергии и применяемого управления дает оценку параметров состояния системы на следующем шаге управления, которые критичны с точки зрения оценки функционала

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon}(k) \\ \bar{\omega}(k) \\ \bar{\theta}_{TAB}(k) \\ \bar{M}_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} &= \left(\begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} - \frac{M}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\} \right) : \frac{std}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \omega(k) \\ \theta_{TAB}(k) \\ M_{GSU.zd}(k) \end{bmatrix} \right\}, \\ N_{41} &= 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(W_{41} \cdot \left[\bar{\varepsilon}(k) \quad \bar{\omega}(k) \quad \bar{\theta}_{TAB}(k) \quad \bar{M}_{GSU.zd}(k) \right]^T + B_{41} \right) \right) \right) - 1, \\ \left[\bar{M}_{EVS}(k), \bar{\hat{\theta}}_{TAB}(k+1) \right]^T &= W_{42} \cdot N_{41} + B_{42}, \\ \begin{bmatrix} \hat{M}_{EVS}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \end{bmatrix} &= \left[\begin{bmatrix} \bar{M}_{EVS}(k) \\ \bar{\hat{\theta}}_{TAB}(k+1) \end{bmatrix} \right] * \frac{std}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{M}_{EVS}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k) \end{bmatrix} \right\} + \frac{M}{k=0, N} \left[\begin{bmatrix} \hat{M}_{EVS}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k) \end{bmatrix} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где W_{41}, W_{42} , матрицы весовых коэффициентов нейронов первого и второго слоев ИНС нейросетевой модели соответственно;

B_{41}, B_{42} , - векторы смещений нейронов соответствующих слоев;

Символом «*» при детермировании выходного сигнала ИНС обозначается поэлементное умножение векторов.

Адаптивный критик осуществляет оценку функционала качества управления на данном шаге при выбранном управлении и текущем расходе энергии опираясь на оценку параметров системы, осуществленной нейросетевой моделью

$$\hat{J}_{SU\mu} = F_{ESU.KR}(\hat{M}_{ED}, \hat{\theta}_{TAB}, \omega). \quad (3)$$

Адаптивный критик реализован в виде ИНС с архитектурой, подобной ИНС нейросетевой модели

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{M}_{ESU.zd}(k) \\ \bar{\hat{\theta}}_{TAB}(k+1) \\ \bar{\omega}(k) \end{bmatrix} &= \left(\begin{bmatrix} \hat{M}_{ESU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k+1) \\ \omega(k) \end{bmatrix} - \frac{M}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{M}_{ESU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\} \right) : \frac{std}{k=0, N} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{M}_{ESU.zd}(k) \\ \hat{\theta}_{TAB}(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} \right\}, \\ N_{51} &= 2 : \left(1 + \exp \left(-2 \cdot \left(W_{51} \cdot \left[\bar{M}_{ESU.zd}(k) \quad \bar{\hat{\theta}}_{TAB}(k+1) \quad \bar{\omega}(k) \right]^T + B_{51} \right) \right) \right) - 1, \\ \hat{J}_{SV\mu}(k) &= W_{52} \cdot N_{51} + B_{52}, \end{aligned} \quad (4)$$

где W_{51}, W_{52} , - матрицы весовых коэффициентов нейрона первого, второго и третьего слоев ИНС нейроконтроллера соответственно;

B_{51}, B_{52} , - векторы смещений нейронов соответствующих слоев;

В ряде случаев возможна подача на входы адаптивного критика действительных значений параметров ЭСУ $M_{ED}(k)$ и $\theta_{TAB}(k+1)$ вместо их оценки нейросетевой моделью. В этом случае ИНС служит только для обратного процесса распространения ошибки при настройке нейроконтроллера в процессе адаптации САУ электромобиля.

Блок адаптации обеспечивает параметрическую настройку (обучение) ИНС нейроконтроллера, модели и адаптивного критика путем настройки соответствующих матриц весовых коэффициентов и векторов смещений нейронов.

В качестве эталонной модели может выступать управление с использованием логических правил выбора стратегии либо оптимальная стратегия управления полученная для некоторого заданного стиля езды (например, спортивный или экономичный).

В процессе моделирования движения автомобиля на выбранном ездувом цикле при использовании эталонной модели управления расходом электроэнергии получают множества точек

$\{\varepsilon_i, \omega_i, \theta_{TAB,i}\}$ и $\{M_{ED,i}, \theta'_{TAB,i}, \varepsilon_i, \omega_i, \theta_{TAB,i}, M_{ESU,zd,i}\}$, $i = \overline{1, N}$, где $\theta'_{TAB,i}$ – значение степени заряженности ТАБ на следующем шаге управления. Функции невязки выходов нейроконтроллера и нейросетевой модели –ой точке могут быть определены из выражений

$$\begin{cases} \psi_{ESU.NC}(i, W_{3j}, B_{3j}) = (\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i)^2 \\ \hat{\varepsilon}_i = F_{ESU.NC}(\omega_i, \theta_{TAB}, M_{ESU.zd,i}, W_{3j}, B_{3j}) \quad j = \overline{1, 3} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \psi_{ESU.NC}(i, W_{4j}, B_{4j}) = (M_{ED.zd,i} - \hat{M}_{ED.zd,i})^2 + (\theta'_{TAB,i} - \hat{\theta}_{TAB,i})^2 \\ \left[\hat{M}_{ED.zd,i}, \hat{\theta}_{TAB,i} \right]^T = F_{ESU.MD}(\varepsilon_i, \omega_i, \theta_{TAB}, M_{ESU.zd,i}, W_{4j}, B_{4j}) \quad j = \overline{1, 2} \end{cases}.$$

Задача обучения нейронных сетей $F_{ESU.NC}$ и $F_{ESU.MD}$ сводится к поиску минимума целевых функционалов вида

$$\begin{aligned} J_{ESU.NC}(W_{3j}, B_{3j}) &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{ESU.NC}(i, W_{3j}, B_{3j}), j = \overline{1, 3} \rightarrow \min, \\ J_{ESU.NC}(W_{4j}, B_{4j}) &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \psi_{ESU.MD}(i, W_{4j}, B_{4j}), j = \overline{1, 2} \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (6)$$

Выходы. С целью предотвращения эффекта переобучения, множества исходных данных могут быть разделены на обучающее (training set) и контрольное (validation set) подмножества с использованием соответствующих коэффициентов разбиения.

Предварительное обучение адаптивного критика $F_{ESU.KR}$ может быть выполнено «on-line» с использованием ошибки временной разности непосредственно перед запуском процесса адаптации стратегии управления расходованием энергии.

Качество и скорость адаптации стратегии управления расходом электроэнергии можно улучшить если дополнить входные вектора нейроконтроллера и нейросетевой модели адаптивного регулятора сигналом идентификации конкретных условий эксплуатации. Данный сигнал может быть получен в результате анализа характера изменений функций $\omega = \omega(t)$ и $\alpha = \alpha(t)$ или $M_{ESU.zd} = M_{ESU.zd}(t)$ в некотором скользящем временном окне.

1. 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.;
2. Чернодуб А.Н. Обзор методов нейроуправления / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – №2. – С.79-94.;
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. / С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.;
4. Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: учебное пособие / О.Г. Руденко, Е.В. Бодянский. – Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2005. – 408 с.;
5. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложение. Кн.2 (Нейрокомпьютеры и их применение) / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсор.; пер. с англ. Н.В. Батина; под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с..

REFERENCES

1. Mosalov, O. Prokhorov, D. & Redko V. (2004). *Self-learning agents based on adaptive critic* [Samoobuchayushchiesya agenty na osnove nejrosetevyh adaptivnyh kritikov]. Moscow, Artificial intelligence Publ. pp. 550-560.
2. Chernodub, A. & Dzyuba, D. (2011). *Review methods of neurocontrol* [Obzor metodov nejroupravleniya]. Kiew, Problems of programming Publ. pp.79-94 .;
3. Haykin, S. (2006). *Neural networks: a complete course*. [Nejronnye seti: polnyj kurs.] Moskow, Translated from English. Publishing house "Williams" 1104 p.
4. Rudenko, O. & Bodyansky, E. (2005). *Artificial neural networks: a tutorial* [Iskusstvennye nejronnye seti]. Kharkov, SMITH Publ. 408 p.
5. Shigeru, O., Marzuki, K. & Rubiya, Y. (2000). *Neurocontrol and its application. Neurocomputers and their application* [Nejroupravlenie i ego prilozhenie. Nejrokomp'yutery i ih primenenie]. Moskow. IPRZHR Publ. 272 p.

Бажинов О.В., Весела М.А. Керування силовою установкою електромобіля з використанням адаптивного критика.

Розглянуто перспективний підхід до реалізації адаптивного керування силовою установкою електромобіля з використанням адаптивного критика. Адаптивний критик міститься в спеціальному блоці, що оцінює якість роботи систем керування силовою установкою електромобіля

Ключові слова: адаптивний критик, електромобіль, силова установка, система управління

Bazhynov O., Veselaya, M. Control of electric powerplant with using of adaptive critic.

Considered a promising approach to implementation of adaptive control electric power plant with using adaptive critic. Adaptive critic is contained in a special unit that evaluates the quality of the control systems of electric power plant

Keywords: adaptive critic, electromobile, propulsion, control system

АВТОРЫ:

БАЖИНОВ Алексей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильная электроника», - Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com

ВЕСЕЛАЯ Мария Анатольевна – аспирант кафедры «Автомобильная электроника», - Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, e-mail: mariyakucheryava@mail.ru

АВТОРИ:

БАЖИНОВ Олексій Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Автомобільна електроніка», - Харківський національний автомобільно – дорожній університет, e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com

ВЕСЕЛА Марія Анатоліївна – аспірант кафедри «Автомобільна електроніка», - Харківський національний автомобільно – дорожній університет, e-mail: mariyakucheryava@mail.ru

AUTHORS:

Aleksey BAZHINOV, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head of Automotive Electronics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: alexey.bazhinov@gmail.com

Maria VESELAYA, Aspirant the department "Automotive Electronics", e-mail: mariyakucheryava@mail.ru

Стаття надійшла в редакцію 11.03.2016р.