

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ*

УДК 62-567.7

**ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕКУПЕРАЦИИ
ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ
ПОДВЕСКЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА***

А.Е. СТЫРОВ

*630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет, аспирант. E-mail: ckeletik@gmail.com*

Повышение плавности хода и защита от вибраций является актуальной задачей транспортного машиностроения. Увеличение скорости, максимальной грузоподъемности и мобильности транспортных средств, увеличение времени работы водителей, а также плохое состояние дорог обуславливают необходимость совершенствования виброзащитных систем и внедрение новых технических решений [10].

Одним из путей решения данных проблем является использование активной электро-механической подвески. В свою очередь, такой подход требует значительных затрат энергии для своей работы.

В статье описывается подход к энергоэффективному использованию активной электро-механической подвески. В исследовании ставится задача минимизации потерь энергии в активной подвеске путем использования рекуперативного демпфирования колебаний колес.

Проведенный анализ алгоритмов управления параметрами подвески показал, что они имеют сложную структуру и для их реализации необходимы сложные системы управления.

Предложенный метод уменьшения потребления энергии электро-механической подвески основан на том, что система энергетически замкнута. Это достигается путем преобразования механической энергии в электрическую и обратно в пределах подвески. Из-за нелинейности поступающих на вход системы возмущений необходимо рассчитать адаптивный регулятор с помощью программного моделирования.

Ключевые слова: активная подвеска, рекуперация энергии, электро-механическая подвеска, адаптация, электро-автомобиль, регулятор, математическая модель, теория автоматического управления

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-106-115

* Статья получена 15 мая 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие фирмы занимаются разработкой активной подвески, которая должна обеспечивать, с одной стороны, возможность перемещения колес по траекториям, копирующим дорожные неровности, а с другой – сохранять уровень пола кузова. Проблема состоит в том, что для работы такой подвески необходимо заранее оценивать наличие и величину неровностей перед автомобилем, потому что любая механическая система характеризуется запаздыванием своего срабатывания. Существующие на сегодняшний день экспериментальные системы обеспечивают постоянную оценку нагрузки, приходящейся на каждое колесо, и при ее увеличении (например, когда колесо наезжает на препятствие) гидравлический цилиндр приподнимает колесо, а при уменьшении нагрузки – опускает. Гидравлические системы, используемые в таких подвесках, требуют большой мощности привода (около 10 кВт) и не могут быть рекомендованы для широкого применения, по крайней мере в настоящее время. Кроме того, прецизионные гидравлические узлы стоят дорого, а при выходе их из строя подвеска полностью теряет работоспособность [9].

Устранением таких недостатков могло бы стать использование электро-механической активной подвески, как, например, «BoseSuspensionSystem» [7] (рис. 1, а) или «MichelinActiveWheel» [8] (рис. 1, б).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о перспективности направления повышения экономичности автомобилей путем создания в их подвесках эффективных систем рекуперации. На неизбежные колебания поддрессоренной массы движущегося автомобиля естественно затрачивается часть энергии силовой установки, составляющая, по разным оценкам – в зависимости от дорожных условий, не менее 10...20 % общих механических потерь. Эту энергию без вреда для снижения эффективности функционирования подвески можно полезно использовать. Основными случаями возникновения возмущающей силы и, соответственно, деформаций в упругих элементах подвески автомобиля являются кивки кузова при разгоне и торможении, крен в поворотах, отработка неровностей дороги.

В этих случаях возвратно-поступательное движение поддрессоренной массы автомобиля характеризуется такими основными параметрами в упругом элементе подвески, как перемещение, ускорение, усилие, частота колебаний.



а



б

Рис. 1. Bose Suspension System (а), Michelin Active Wheel (б)

Отечественными и зарубежными изобретателями и разработчиками новой техники к настоящему времени предложено большое число разных по типу и конструкции устройств рекуперации энергии в подвесках автомобилей (свыше 100 патентов). В общем случае они подразделяются на следующие три группы (рис. 2) [6]: электрические, гидравлические и пневматические, инерционно-механические.

Учитывая, что основным видом энергии в электрических и гибридных силовых установках является электричество, первая группа устройств рекуперации энергии в подвесках более предпочтительна. В отличие от двух других

групп здесь не требуется трансформация энергии из одного вида в другой, что в конечном итоге упрощает конструкцию и удешевляет производство электрических и гибридных автомобилей. К большой группе электрических устройств рекуперации энергии в подвесках можно отнести: электромагнитные, с постоянными магнитами, электромашинные, линейные, пьезокерамические. Из перечисленных наиболее перспективны электрические устройства рекуперации энергии на основе линейных генераторов, классификация и общая характеристика которых достаточно полно представлены в работе [3]. Приемлемыми по эксплуатационным свойствам и конструктивному исполнению также являются устройства электрического типа – электромагнитные и с постоянными магнитами. Такие устройства достаточно эффективны, просты по конструкции, дешевые в производстве, надежны в работе и легко компонуются во всех типах подвесок автомобилей [4, 5].



Рис. 2. Классификация устройств рекуперации энергии подвески автомобиля по виду рекуперированной энергии и типу конструкции

При рассмотрении кинематики процесса демпфирования становится очевидно, что энергия, запасенная в пружине в процессе езды, либо возрастает при наезде на кочку, либо уменьшается при попадании колеса в выбоину, а вся лишняя энергия воспринимается в виде колебаний кузова. Упрощенная кинематическая схема подвески с электродвигателем и без него приведена ниже (рис. 3).

На рис. 3 обозначены:

m_m – масса машины,

m_k – масса колеса,

$k_{п}$ – коэффициент упругости пружины,

$k_{ш}$ – коэффициент упругости шины,

F_d – управляемая сила.

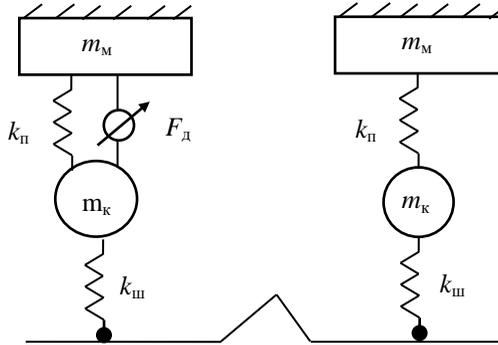


Рис. 3. Кинематическая схема активной (слева) и пассивной (справа) систем подвески

Когда автомобиль стоит на месте, его сила тяжести запасается в пружинах подвески и сжатых шинах:

$$F_T - F_{\text{п}} - F_{\text{ш}} = 0.$$

или

$$m_M g - k_{\text{п}} \Delta l_1 - k_{\text{ш}} \Delta l_2 = 0.$$

При наезде на ухаб появится дополнительная нескомпенсированная сила массы колеса, умноженная на его ускорение:

$$F_T - F_{\text{п}} - F_{\text{ш}} - F_{\text{к}} = 0$$

или

$$m_M g - k_{\text{п}} \Delta l_1 - k_{\text{ш}} \Delta l_2 - m_{\text{к}} a_{\text{к}} = 0.$$

Из-за высокой инерционности пассивной системы подвески сила, возникшая при ударе, не будет скомпенсирована мгновенно и баланс сил нарушится, создав колебания кузова.

В системе рассматриваемой подвески происходит активное противодействие такому удару, что приведет к мгновенному выравниванию баланса сил и, соответственно, к нерушимой плавности хода. В таком случае электродвигатель активной подвески должен создавать силу, обратную той, которая появляется у колеса в результате удара. Компенсация движения колеса приведет к повторению рельефа поверхности и плавности хода транспортного средства:

$$F_{\text{д}} - F_{\text{к}} = 0.$$

Электродвигатель активной подвески способен создавать знакопеременный момент силы, работая в режиме рекуперации при отскоке колеса, и в двигательном режиме при попадании колеса в выбоину. Таким образом, при высоком КПД системы общий расход энергии будет снижен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании алгоритмов управления электроприводами разработчики стремятся обеспечить высокие энергетические показатели системы. На решение этой задачи направлены такие известные законы, как управление по минимуму тока [1], управление с минимумом потерь в электрическом двигателе [2]. Для достижения требуемых динамических свойств электромеханической системы приходится отклоняться от алгоритмов управления, обеспечивающих оптимальные с энергетической точки зрения режимы.

В работе ставится задача максимальной энергетической эффективности работы системы активной подвески транспортного средства при сохранении горизонтальности кузова. Из-за сложности и непредсказуемости динамики колес необходимо использовать метод адаптивного регулятора с различными датчиками и наблюдателями. Для упрощения математического описания электропривода было принято решение в качестве электродвигателей для активной подвески взять двигатели постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эпштейн И.И.* Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.
2. *Боченков Б.М., Филошов Ю.П.* Энергорациональные алгоритмы управления // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – С. 1–30.
3. *Бабикова Н.Л., Саттаров Р.Р., Полихач Е.А.* К вопросу о классификации линейных электрических генераторов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т. 12, № 1 (30). – С. 144–149.
4. *Мурашевский В.В.* Электродинамический амортизатор-генератор электрического тока для колесных транспортных средств [Электронный ресурс] // Техинвест: web-сайт компании. – URL: <http://www.tex-invest.ru/projects/eldyngeneration.php> (дата обращения: 06.05.2015).
5. *Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.* Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: КОРОНА принт, 2008. – 356 с.

6. *Посметьев В.И., Драпалюк М.В., Зеликов В.А.* Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 76 (02). – С. 1–15.

7. Bose suspension system. Applied learning [Electronic resource] // Bose: website of corporation. – URL: http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/applied_learning.jsp (дата обращения: 06.05.2015).

8. *Санников В.* Белка в колесе: мотор-колесо [Электронный ресурс] // Популярная механика. – 2009. – № 4 (78). – URL: <http://www.popmech.ru/technologies/9009-belka-v-kolese-motor-koleso/> (дата обращения: 06.05.2015).

9. Основы конструкции современного автомобиля / А.М. Иванов, А.Н. Солнцев, В.В. Гаевский, П.Н. Клюкин, В.И. Осипов, А.И. Попов. – М.: За рулем, 2012. – 336 с.

10. *Мирошниченко Д.А.* Технология создания и доводки алгоритмов адаптивного управления демпфированием в подвеске колесных машин в особых условиях движения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2012. – 16 с.

11. *Горобцов А.С., Мирошниченко Д.А.* Пространственные колебания подрессоренной массы автомобиля при случайном возмущении // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 20–21.

12. О возможности использования рекуперированной энергии лесного почвообрабатывающего агрегата для интенсификации технологического процесса / В.И. Посметьев, В.А. Зеликов, А.И. Третьяков, В.В. Посметьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2011. – № 1. – С. 60–64.

13. *Fodor M.G., Redfield R.C.* The variable linear transmission for regenerative damping in vehicle suspension control // Proceedings of the 1992 American Control Conference, Chicago, Illinois, USA, 24–26 June 1992. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 1992. – P. 26–30.

14. Self-powered active control applied to a truck cab suspension / K. Nakano, Y. Suda, S. Nakadai, H. Tsunashima, T. Washizu // JSAE Review. – 1999. – Vol. 20, iss. 4. – P. 511–516. – doi: 10.1016/S0389-4304(99)00043-0.

15. *Montazeri-Gh M., Soleymani M.* Investigation of the energy regeneration of active suspension system in hybrid electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57, iss. 3. – P. 918–925. – doi: 10.1109/TIE.2009.2034682.

Стыров Александр Евгеньевич – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета. E-mail: ckeletik@gmail.com

Approach to the use of energy recovery in electromechanical active vehicle suspension *

A.E. Styrov

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: ckeletik@gmail.com

Improving travelling comfort and protection from vibration is an important task of transport engineering. Increase speed, the maximum capacity and mobility vehicles, an increase in working hours of drivers, as well as poor road conditions cause the need to improve the vibration isolation systems and the introduction of new technical solutions.

One solution to these problems is the use of electro-active suspension. In turn, this approach requires a considerable amount of energy for their operation.

The paper describes an approach to energy-efficient use of electromechanical active suspension. The study sets problem to minimize energy loss in the active suspension by the use of regenerative damping fluctuations wheels.

The analysis algorithms controlling the parameters of the suspension showed that they have a complex structure and to implement them needed complex control systems.

The proposed method to reduce energy consumption electromechanical suspension based on the fact that the system is energetically closed. This is achieved by converting mechanical energy into electrical energy and back in the aisles of the suspension. Because of the nonlinearity at the input of the system is necessary to calculate the perturbation adaptive controller using a software simulation.

Keywords: active suspension, energy recovery, electro-mechanical suspension, adaptation, electric vehicle, regulator, mathematical model, theory of automatic control

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-106-115

REFERENCES

1. Epshtein I.I. *Avtomatizirovannyi elektroprivod peremennogo toka* [Automatic electric drive of alternating current]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 192 p.
2. Bochenkov B.M., Filyushov Yu.P. [Energy-efficient control algorithms]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskie sistemy: sbornik nauchnykh trudov* [Automated electromechanical systems: collection of scientific papers]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997, pp. 1–30.
3. Babikova N.L., Sattarov R.R., Polihach E.A. K voprosu o klassifikatsii lineynykh ehlektricheskikh generatorov [On the classification of linear electric generators]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)*, 2009, no. 1 (30), pp. 144–149.

* Received 14 May 2015.

4. Murashevskii V.V. Elektrodinamicheskii amortizator-generator elektricheskogo toka dlya kolesnykh transportnykh sredstv [Electrodynamic shock-power generator for wheeled vehicles]. *Techinvest*: web-site of the company. Available at: <http://www.tex-invest.ru/projects/eldyngeneration.php> (accessed 06.05.2015).

5. Khiterer M.Ya., Ovchinnikov I.E. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous machines reciprocating motion]. St. Petersburg, KORONA print Publ., 2008. 356 p.

6. Posmet'ev V.I., Drapalyuk M.V., Zelikov V.A. Otsenka effektivnosti primeniya sistemy rekuperatsii energii v podveske avtomobilya [Estimation of efficiency of application of system recovery of energy in car suspender]. *Nauchnyi zhurnal KubGAU – Scientific Journal of KubSAU*, 2012, no. 76 (02), pp. 1–15.

7. Bose suspension system. Applied learning. *Bose*: website of corporation. Available at: http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/applied_learning.jsp (accessed 06.05.2015).

8. Sannikov V. Belka v kolese: motor-koleso [Squirrel in a cage: motor-wheel]. *Populyarnaya mekhanika – Popular Mechanics*, 2009, no. 4 (78). Available at: <http://www.popmech.ru/technologies/9009-belka-v-kolese-motor-koleso/> (accessed 06.05.2015).

9. Ivanov A.M., Solntsev A.N., Gaevskii V.V., Klyukin P.N., Osipov V.I., Popov A.I. *Osnovy konstruksii sovremennogo avtomobilya* [The basis of design of a modern car]. Moscow, Za rulem Publ., 2012. 336 p.

10. Miroshnichenko D.A. *Tekhnologiya sozdaniya i dovodki algoritmov adaptivnogo upravleniya dempfirovaniem v podveske kolesnykh mashin v osobykh usloviyakh dvizheniya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Technology for creating and fine-tuning adaptive control algorithms in the suspension damping-wheeled vehicles in particular driving conditions. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Volgograd, 2012. 16 p.

11. Gorobtsov A.C., Miroshnichenko D.A. Prostranstvennye kolebaniya podressorennoi massy avtomobilya pri sluchainom vozmushchenii [Spatial variation of the car spring mass for random perturbations]. *Avtomobil'naya promyshlennost' – Automotive industry*, 2010, no. 7, pp. 20–21.

12. Posmet'ev V.I., Zelikov V.A., Tret'yakov A.I., Posmet'ev V.V. O vozmozhnosti ispol'zovaniya rekuperiruemoi energii lesnogo pochvoobrabatyvayushchego agregata dlya intensivatsii tekhnologicheskogo protsessa [On possibility of using recuperative energy of forest soil cultivating machine for technological process intensification]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal – Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forest Journal)*, 2011, no. 1, pp. 60–64.

13. Fodor M.G., Redfield R.C. The variable linear transmission for regenerative damping in vehicle suspension control. *Proceedings of the 1992 American Control Conference*, Chicago, Illinois, USA, 24–26 June 1992, pp. 26–30.

14. Nakano K., Suda Y., Nakadai S., Tsunashima H., Washizu T. Self-powered active control applied to a truck cab suspension. *JSAE Review*, 1999, 20 (4), pp. 511–516. doi: 10.1016/S0389-4304(99)00043-0

15. Montazeri-Gh M., Soleymani M. Investigation of the energy regeneration of active suspension system in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, iss. 3, pp. 918–925. doi: 10.1109/TIE.2009.2034682