

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНО-РЕКУПЕРАТИВНОЙ ПОДВЕСКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Замыслов В.М., к.т.н. Есаков А.Е.

Московский политехнический университет, Москва, Россия
shoorroop@gmail.com

Целью работы является раскрытие неочевидных недостатков активно-рекуперативной подвески, а также обозначение возможных вариантов борьбы с ними. Такими проблемами являются опасность пробоя подвески в активном режиме, невозможность работы в рекуперативном режиме при скорости деформации подвески ниже пороговой, работа системы в режиме раскачки. Новизна работы заключается в том, что ранее эти аспекты функционирования активно-рекуперативной системы поддрессоривания не рассматривались. Проблема повышенного риска пробоя подвески заключается в том, что в активном режиме деформирование упругого устройства происходит не только за счет работы внешнего возмущения (неровностей дороги), но и за счет работы, совершенной актуатором. В качестве решений предлагаются: правильный подбор параметров системы; сбор дополнительной информации о профиле неровности; введение превентивных мер в алгоритм управления. Проблема невозможности работы в рекуперативном режиме при скорости деформации подвески ниже пороговой заключается в том, что электродвижущая сила индукции на обмотке ротора на малых скоростях может быть ниже порогового напряжения зарядки на клеммах накопителя энергии. В качестве решений предлагаются: сухое трения в подвеске; введение в конструкцию подвески амортизатора с выраженной дегрессивностью характеристики; снижение порогового напряжения зарядки с помощью разделения цепей питания и зарядки с использованием преобразователя напряжения; введение «цепи рассеивания» в цепь якоря; оптимальное управление цепью возбуждения. Проблема работы системы в режиме раскачки заключается в том, что при определенных условиях через актуатор в колебательную систему подводится энергия, в результате чего происходит постепенное увеличение амплитуды колебаний. В качестве решений предлагается: ввод дополнительного демпфера или обратной связи по скорости деформации подвески.

Ключевые слова: автомобиль, активная подвеска, рекуперативная подвеска, электромагнитный демпфер.

Для цитирования: Замыслов В.М., Есаков А.Е. Проблемы применения активно-рекуперативной подвески и пути их решения // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. № 3 (45). С. 14–22. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-14-22.

Введение

Несмотря на то, что исследования в области рекуперативных [1, 2, 3, 4, 5] и активных [6, 7] подвесок начались достаточно давно, а также были предложены варианты совмещения этих идей [8], конструкции такого рода до сих пор не получили широкого распространения в автомобилестроении. Это свидетельствует о наличии проблем, возникающих при использовании подобных систем. В этой статье рассматриваются проблемы, обусловленные особенностями принципов управления, которые применяются в активных системах поддрессоривания, а также предлагаются пути решения.

Цель исследования

Целью работы является раскрытие неочевидных недостатков активно-рекуперативной

подвески, а также обозначение возможных вариантов борьбы с ними.

Материалы и методы исследования

Исследование свойств активно-рекуперативной системы поддрессоривания производится в среде «MATLAB» с помощью математической модели, основанной на двухмассовой расчетной схеме (рис. 1) и следующих уравнениях движения:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = (F_{sp} + F_{ems} - Mg) / M; \\ \ddot{q}_2 = (F_{tyre} - F_{sp} - F_{ems} - mg) / m, \end{cases}$$

где \ddot{q}_1 , \ddot{q}_2 – вторые производные (ускорения) вертикальных координат, соответственно, поддрессоренной и неподдрессоренной масс; $M = 161$ кг – поддрессоренная масса; $m = 39$ кг – неподдрессоренная масса; g – уско-

рение свободного падения; F_{sp} – сила, действующая со стороны упругого устройства; F_{tyre} – сила, действующая со стороны шины; F_{ems} – сила, действующая со стороны актуатора.

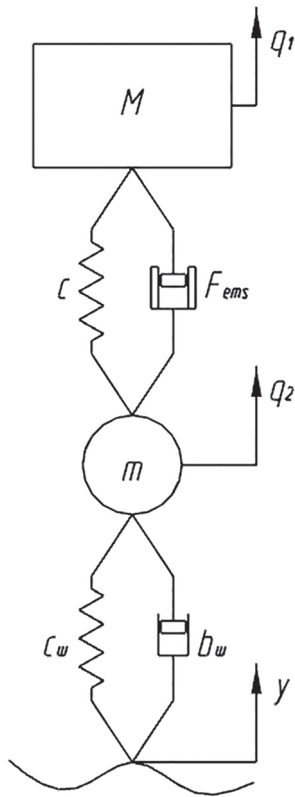


Рис. 1. Расчетная схема, используемая при моделировании

Зависимости, с помощью которых вычисляются силы, действующие со стороны пружины, шины, актуатора, а также величина возмущающего воздействия, несколько более сложны, чем прямая пропорциональность, и мы не будем их рассматривать в рамках данной статьи. Тем не менее, при средних значениях деформации и скорости деформации подвески и шины зависимости близки к линейным:

$$F_{sp} = c(q_2 - q_1);$$

$$F_{tyre} = c_{ш} \Delta_{ш} + b_{ш} \dot{\Delta}_{ш},$$

где q_1 – вертикальная координата поддресоренной части; q_2 – вертикальная координата неподдресоренной части; $c_{ш} = 192500$ Н/м – жесткость шины; $b_{ш} = 500$ Н·с/м – коэффициент сопротивления шины; $c = 12000$ Н/м – жесткость подвески; $\Delta_{ш} = y(x) - q_2$ – деформация шины при вертикальной координате профиля дороги $y(x)$.

Другие параметры моделируемой системы: ход подвески на сжатие – 0,1 м; ход подвески на отбой – 0,11 м; скорость движения $V = 10$ м/с.

Результаты исследования

Проблема повышенного риска пробоя

В зарубежных публикациях [3, 4], как правило, фигурируют два принципа управления активной подвеской: *skyhook* и *groundhook*. Первый направлен на обеспечение неподвижности кузова в вертикальном направлении относительно пространства. Второй – на обеспечение постоянства радиальной деформации шины.

Часто усилие, реализуемое устройством, вычисляется на основе анализа вертикальных скоростей поддресоренной и неподдресоренной частей [3, 4]. Также используется вычисление требуемого усилия исходя из ускорений этих частей или, что близко по смыслу, исходя из сил, действующих на них [7]. Общим в этих подходах является то, что управление направлено на то, чтобы свести к нулю оцениваемую величину: скорость или ускорение.

Рассмотрим, как поведет себя подвеска с таким управлением при преодолении единичной неровности. Будем считать, что применяется принцип управления *skyhook*, а система поддресоривания идеальна, то есть имеет неограниченный ход подвески и неограниченную мощность актуатора (электрического, гидравлического, пневматического или другого типа исполнительного механизма, включенного в колебательную систему и способного к созданию активных сил).

В случае, когда неровность мала, устройство позволяет свести сумму сил, действующих на поддресоренную часть к нулю, что, несомненно, повышает плавность хода (рис. 2). Отметим, что система поддресоривания не получает энергии от поверхности дороги, она поставляется (а затем отводится) от источника питания через актуатор.

Профиль неровности на рис. 2 описывается зависимостью:

$$y(x) = 0,05 \sin[\pi(x - x_0)],$$

где x – горизонтальная координата профиля дороги; x_0 – горизонтальная координата начала неровности.

Проблема применения активной подвески с управлением по принципам *skyhook*

и *groundhook* даже при наличии актуатора неограниченной мощности, но ограниченного хода подвески проявляется при проезде неровностей, высота которых больше, чем ход подвески на сжатие. Далее, мы будем называть такую неровность крупной. В этом случае в определенный момент наступает пробой подвески (рис. 3), причем сжатие до этого происходило не за счет энергии, подведенной от по-

верхности дороги, а за счет работы актуатора. Таким образом, в момент пробы подрессоренной части только предстоит придать нужную для преодоления препятствия вертикальную координату, поскольку до пробы кузов был неподвижен в вертикальном направлении.

В результате имеем значительные величины вертикального ускорения подрессоренной части, что означает резкое ухудшение плавно-

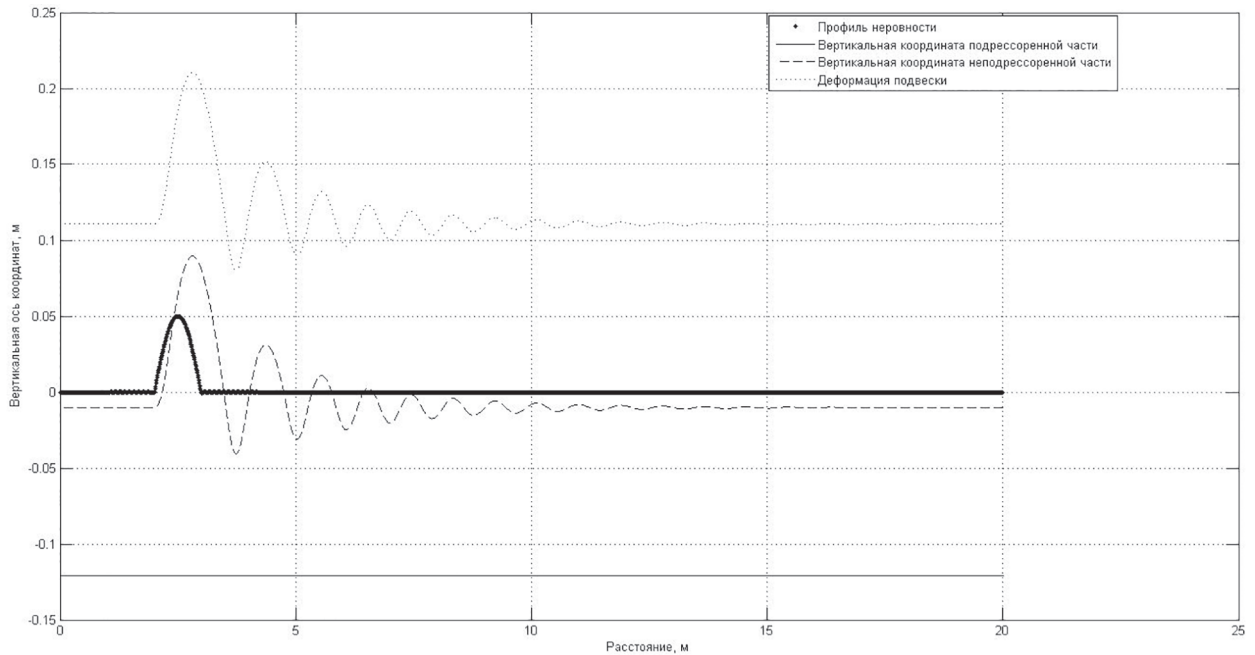


Рис. 2. Результаты моделирования процесса преодоления единичной неровности при управлении идеальной системой подрессоривания по принципу *skyhook*

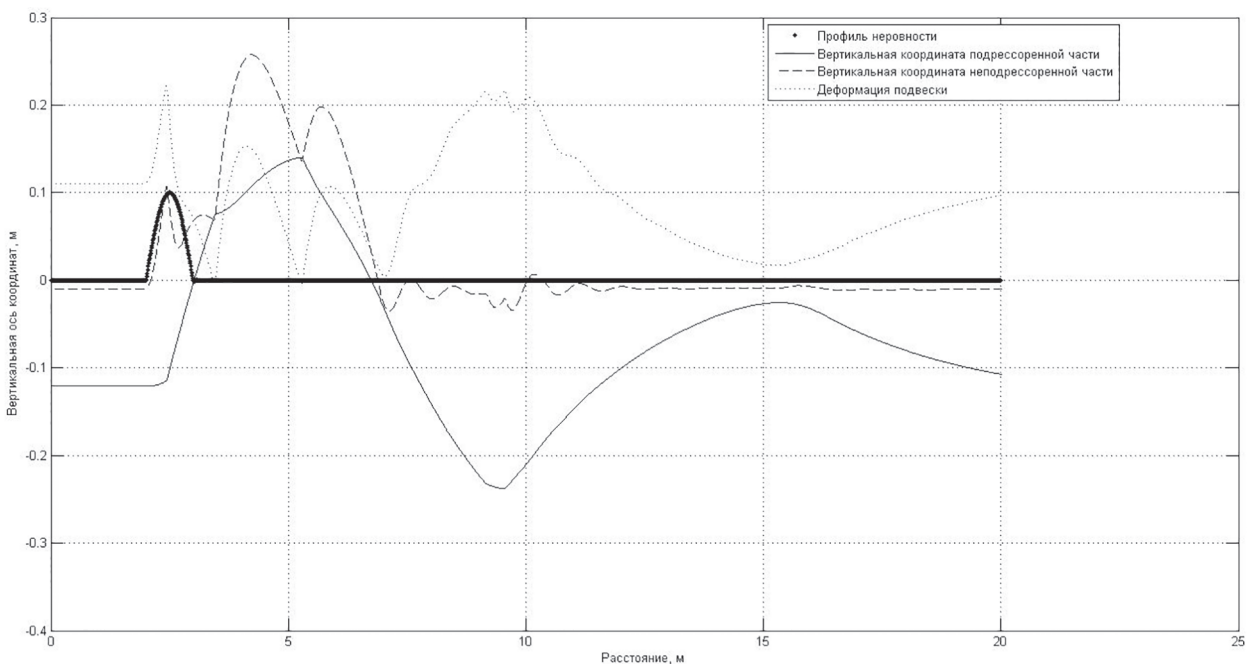


Рис. 3. Результаты моделирования процесса преодоления единичной неровности, высотой более хода подвески на сжатие, при управлении системой подрессоривания по принципу *skyhook*

сти хода – результат, обратный тому, к которому мы стремились.

Профиль неровности на рис. 3, 4, 5 описывается зависимостью:

$$y(x) = 0,0105 \sin[\pi(x - x_0)].$$

Предлагаемые меры по снижению риска пробоя активной подвески.

1. Увеличение допустимого вертикального ускорения с увеличением сжатия подвески.

Как было описано выше, малые неровности не несут угрозы пробоя подвески, и на них было бы целесообразно использовать все возможные средства повышения плавности хода, а на крупных неровностях на первый план выходит энергоемкость подвески. Она повышает-

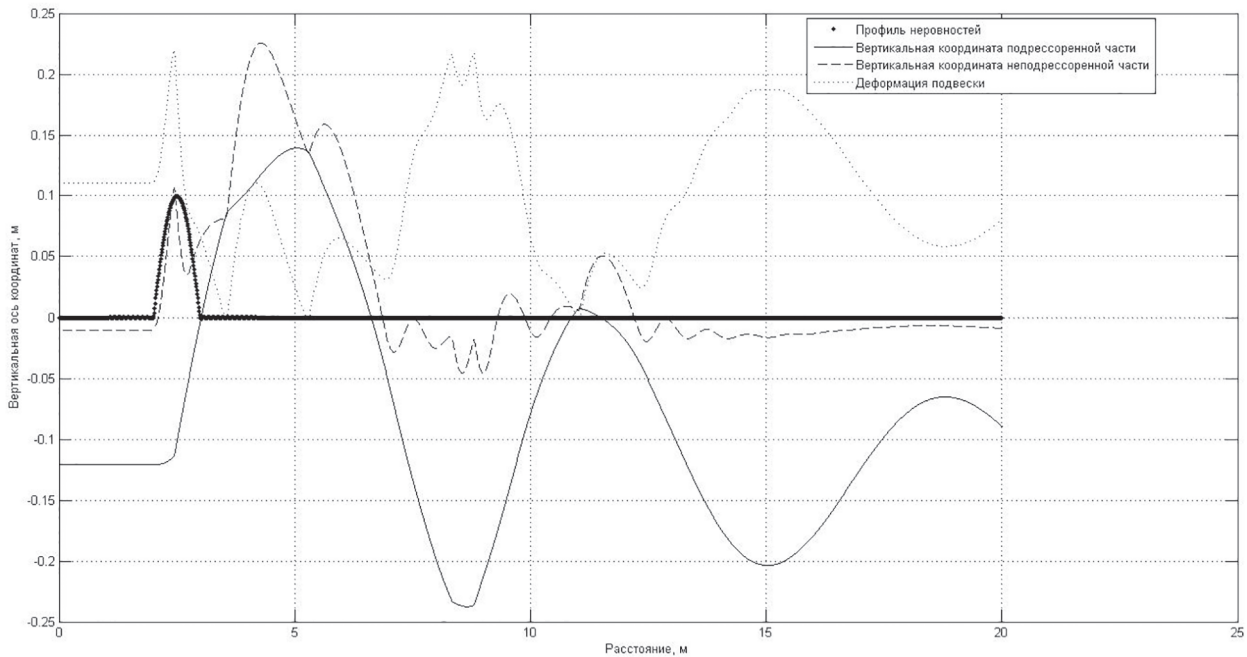


Рис. 4. Результаты моделирования процесса преодоления единичной неровности при коэффициенте сопротивления демпфирующего устройства подвески равном 400 Н·с/м

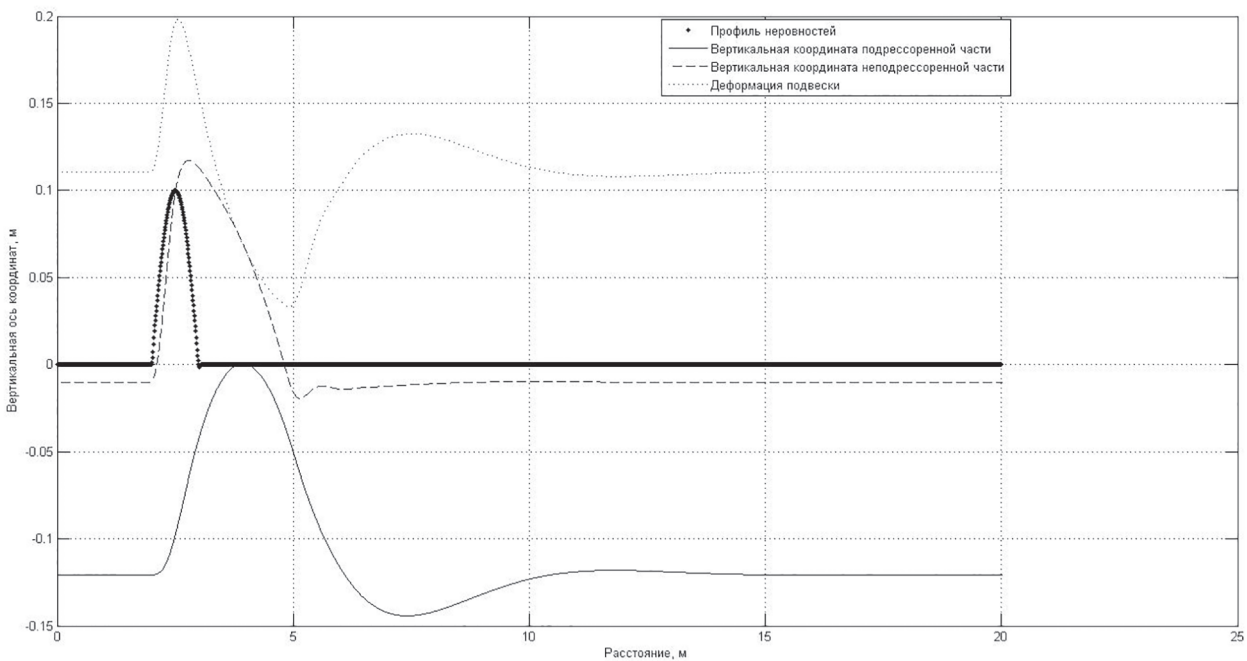


Рис. 5. Результаты моделирования процесса преодоления единичной неровности при коэффициенте сопротивления демпфирующего устройства подвески равном 1700 Н·с/м

ся с увеличением жесткости упругого устройства. В нашем случае аналогом жесткости является коэффициент обратной связи по отклонению деформации подвески от ее значения в статическом положении, так как его повышение ведет к увеличению сил, пропорциональных относительно перемещению подрессоренной и неподрессоренной частей.

При неограниченной мощности актуатора отклонение вертикального ускорения подрессоренной массы от нуля будет тем больше, чем больше этот коэффициент и деформация подвески. Для повышения плавности хода на малых ходах целесообразно делать небольшим данный коэффициент и интенсивно его увеличивать ближе к крайним положениям подвески. Во избежание влияния макропрофиля на положение подвески в статике необходимо и на малых ходах делать коэффициент обратной связи по отклонению деформации подвески от статического значения ненулевым.

2. Включение в колебательную систему амортизатора с малым коэффициентом демпфирования.

Демпфирование оказывает очень существенное влияние на значение максимальной высоты неровности, преодолеваемой автомобилем при заданной скорости и длине неровности без пробоя подвески (рис. 4, 5). Например, при малом коэффициенте сопротивления демпфирующего устройства подвески (рис. 4) видно, что ход подвески на сжатие исчерпан на вершине неровности, что означает пробой подвески. При увеличении этого коэффициента (рис. 5) пробой может быть устранен.

Включение в активную систему подрессорирования амортизатора малого сопротивления позволит не создавать больших потерь при работе подвески в отсутствие крупных неровностей (при малых скоростях относительного перемещения подрессоренной и неподрессоренной частей), но при этом получить дополнительное демпфирование при их наличии.

Альтернативой такому решению может выступать введение обратной связи по скорости деформации подвески. Чем больше будет коэффициент такой обратной связи, тем больший вклад будет вносить именно скорость деформации подвески в формирование выходной силы актуатора. Наличие в уравнении движения составляющих, пропорциональных скорости и направленных против нее, свидетельствует о наличии демпфирования. Таким обра-

зом, можно ввести демпфирование в систему, не устанавливая дополнительных элементов, а лишь внося изменения в алгоритм управления актуатором.

К такому подходу, с одной стороны, электромашинная преобразовательная установка за счет увеличения противо-ЭДС с увеличением скорости вращения ротора. С другой стороны, создание диссипативных сил на скоростях ниже пороговой невозможно в рекуперативном режиме, о чем будет сказано позже.

3. Установка на переднем свесе автомобиля датчика, позволяющего обнаружить крупные неровности.

Существует ряд решений, позволяющих определить расстояние от какой-либо точки на переднем свесе до поверхности дороги. Использование информации от датчика такого рода было бы полезно для работы активной подвески и без рассмотрения вышеуказанной проблемы, однако в реальности такие измерения вызывают трудности: некоторые датчики недостаточно точны, некоторые дороги, некоторые не приспособлены к различным состояниям поверхности дороги. В дополнение к этому есть проблема движения автомобиля в повороте, когда траектории движения колес и датчиков различны.

Однако такому датчику необходимо реагировать только на неровности, высота которых больше некоего значения, соизмеримого с ходом сжатия подвески. Это обстоятельство устраняет все, помимо последней проблемы применения такого сенсора.

4. Подбор параметров системы.

Так как величина питающего напряжения ограничена, а увеличение скорости деформации подвески вызывает увеличение противо-ЭДС на обмотках якоря, то при определенной скорости деформации вместо разрядки конденсаторов питания якоря начнется их зарядка, что означает отвод энергии из колебательной системы. Однако чтобы такой переход не происходил без надобности, но тем не менее происходил при превышении определенной скорости деформации, необходимо правильно подобрать под конкретную систему подрессорирования электромашину, шарико-винтовую передачу, напряжение питания и пр., поскольку от них зависит, как соотносится скорость деформации подвески и скорость вращения ротора и при какой скорости вращения ротора будет происходить переход.

Стоит отметить, что рассмотренные методы решения данной проблемы не противоречат друг другу, что означает возможность их комбинации.

Проблема невозможности работы в рекуперативном режиме при скорости деформации подвески ниже пороговой.

Допустим, электромагнитный актуатор находится в рекуперативном режиме, потому что в данный момент нужно отводить энергию из колебательной системы. Обмотка якоря подключена к какой-либо батарее, на клеммах которой есть определенное напряжение. Его необходимо преодолеть для того, чтобы по цепи якоря начал протекать ток зарядки, который, взаимодействуя с магнитным потоком статора, создал бы тормозной момент на валу электромашины:

$$M_{эм} = k\Phi I_{я}, \quad (1)$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент на валу электромашины; k – коэффициент, характеризующий особенности конструкции электромашины; Φ – магнитный поток; $I_{я}$ – ток в обмотке якоря.

В режиме рекуперации электромашина работает как генератор и электродвижущая сила (ЭДС), которая должна быть больше, чем напряжение на клеммах, – это ЭДС индукции.

ЭДС индукции прямо пропорциональна магнитному потоку и угловой скорости ротора:

$$E_{я} = k\Phi\dot{\phi}, \quad (2)$$

где $E_{я}$ – ЭДС индукции; $\dot{\phi}$ – угловая скорость ротора электромашины.

Таким образом, при заданном не бесконечно большом магнитном потоке существует определенная пороговая скорость вращения ротора, при которой $E_{я} = U$, где U – напряжение на клеммах батареи. При скорости ниже пороговой рекуперативный отвод энергии из системы невозможен. В этом случае актуатор не работает в режиме генератора и демпфирование отсутствует, что при отсутствии иных диссипативных сил приводит к незатухающим колебаниям.

С этой точки зрения, следует поддерживать минимальное напряжение питающего элемента. Однако этот же элемент должен питать обмотку якоря в активном режиме. В случае низкого напряжения питания система не сможет работать в активном режиме на скорости выше пороговой. Иными словами, чем выше напряжение питания, тем выше реализуемая мощ-

ность актуатора. С этой точки зрения следует увеличивать напряжение питания цепи якоря.

Выбор компромиссного значения напряжения в конечном счете приводит к увеличению габаритов актуатора, поэтому целесообразно рассмотреть другие решения:

5. Нерекуперативный отвод энергии на малых скоростях.

Такой подход решает проблему отсутствия демпфирования на низких скоростях, однако оставляет энергоэффективность системы на довольно низком уровне. Реализовать такую идею можно следующими способами:

– введением сухого трения в подвеску. Практически его наличие неизбежно, однако это принято считать негативным фактором;

– введением в конструкцию подвески амортизатора с выраженной дегрессивностью характеристики. Дегрессивная характеристика позволит снизить влияние амортизатора на высоких скоростях деформации подвески;

– введением «цепи рассеивания», к которой бы на малых скоростях подключалась бы обмотка якоря. В такую цепь включается активное сопротивление в виде радиатора, и энергия рассеивается в виде тепла. При этом порог напряжения, который должна преодолеть ЭДС индукции, отсутствует.

6. Разделение цепей питания и отвода энергии.

Если в активном режиме требуется высокое напряжение питания, а в режиме рекуперации – низкое пороговое напряжение, то целесообразно в этих режимах применять разные цепи. Например, использовать в рекуперативном режиме повышающий импульсный преобразователь напряжения для соединения цепи якоря и батареи, а в активном режиме соединить батарею и обмотку напрямую. Это позволит снизить минимальную скорость, при которой возможно рекуперативное демпфирование.

7. Оптимальное управление током в обмотке возбуждения.

В активном режиме ток якоря $I_{я}$ зависит от напряжения питания и ЭДС якоря следующим образом:

$$I_{я} = \frac{U - E_{я}}{R}, \quad (3)$$

где R – общее сопротивление цепи якоря.

Из выражений (1), (2) и (3) получаем следующую зависимость момента на валу электромашины от величины $k\Phi$:

$$M_{эм} = \frac{1}{R} \left[-(k\Phi)^2 \dot{\phi} + k\Phi U \right]. \quad (4)$$

Функция момента от величины магнитного потока – это квадратичная парабола, ветви которой направлены вниз. Это означает, что для каждой совокупности значений напряжения питания и скорости вращения ротора есть определенное значение магнитного потока, при котором достигается максимальный момент. Дифференцируя выражение (4) и приравнявая производную к нулю, получаем выражение для оптимального значения $k\Phi$:

$$k\Phi = \frac{U}{2\dot{\phi}}.$$

Такое управление цепью возбуждения, при котором значение $k\Phi$ оптимально в активном режиме, позволяет получить максимальную мощность актуатора на разных режимах работы, что способствует снижению напряжения питания, а значит, и пороговой скорости.

Проблема работы системы в режиме раскачки.

Если система работает по принципу компенсации внешнего воздействия на подрессоренную часть, а внешним воздействием является сила со стороны упругого устройства, то при нулевых начальных условиях, актуаторе неограниченной мощности и неограниченном ходе подвески подрессоренная часть будет двигаться без вертикальных ускорений. Однако в реальности условия не столь идеальны. Если у подрессоренной части по каким-либо причинам все-таки возникает вертикальная скорость, то система будет всячески препятствовать ее изменению. Так, двигаясь от одного крайнего положения подвески до другого, система будет препятствовать изменению вертикальной скорости подрессоренной массы до тех пор, пока актуатор будет на это способен. Для этого ему придется деформировать упругое устройство, а значит подводить энергию в колебательную систему. За счет такого поведения актуатора начинается процесс увеличения амплитуды колебаний.

Для решения этой проблемы можно прибегнуть к следующим мерам:

1. Введение обратной связи по скорости деформации подвески.

Эта мера позволит при возникновении вертикальной скорости подрессоренной массы возвращать ее к нулю. Однако, как показывают

эксперименты над математической моделью, при недостаточном коэффициенте обратной связи по скорости, явление резонанса все равно может наблюдаться при достаточно больших воздействиях. Увеличение же значения этого коэффициента негативно сказывается на плавности хода.

2. Оценка общего количества энергии, накопленной в колебательной системе, и принятие мер по ее отводу.

Зная скорости масс и деформацию упругого устройства, можно оценить энергию, накопленную в колебательной системе. Если ее можно оценить, то при превышении определенного значения можно задать переход актуатора в тормозной режим, что будет означать отвод энергии из колебательной системы, либо ввести обратную связь по количеству энергии, запасенной в колебательной системе.

Заключение

Определены потенциальные проблемы при составлении алгоритма управления активно-рекуперативной системой подрессоривания.

Таковыми проблемами являются:

- опасность пробоя подвески в активном режиме;
- невозможность работы в рекуперативном режиме при скорости деформации подвески ниже пороговой;
- работа системы в режиме раскачки.

Предложены решения этих проблем.

Проблема пробоя подвески в активном режиме может быть решена правильным подбором параметров системы, за счет чего при определенных скоростях деформации подвески будет наблюдаться переход из активного режима в тормозной (рекуперативный); сбором дополнительной информации о профиле неровности; введением превентивных мер в алгоритм управления.

Проблема невозможности работы в рекуперативном режиме при скорости деформации подвески ниже пороговой может быть решена наличием сухого трения в подвеске; введением в конструкцию подвески амортизатора с выраженной деградацией характеристики; снижением порогового напряжения зарядки с помощью разделения цепей питания и зарядки с использованием преобразователя напряжения; введением «цепи рассеивания» в цепь якоря; оптимальным управлением цепью возбуждения.

Проблема работы системы в режиме раскачки может быть решена вводом дополнительного демпфера или обратной связи по скорости деформации подвески.

Следующими этапом данной работы является апробация описанных выше решений на математической модели.

Литература

1. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Бурдюгов А.С. Рекуперация энергии в подвеске транспортного средства // Знание. 2016. № 11–1 (40). С. 12–18.
2. 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.
3. Sankaranarayanan V., Oncu S., Ozcan D., Guvenc L. Vehicle Chassis Control Using Adaptive Semi-Active Suspension // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. 2008.
4. Kawamoto Y., Suda Y., Inoue H., Kondo T. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension // Journal of System Design and Dynamics. 2007. № 3. С. 524–535.
5. Fang Z., Guo X., Xu L., Zhang H. An Optimal Algorithm for Energy Recovery of Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber // Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal. 2013. № 6.
6. Бальсам А., Рязанцев В.И. Стабилизация вертикальных реакций дороги на колеса и плавность хода автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 5.
7. Рязанцев В.И. Метод повышения устойчивости движения автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 9.
8. Стыров А.Е. Подход к использованию рекуперации энергии в электромеханической активной

подвеске транспортного средства // Сборник научных трудов НГТУ. 2015. № 2 (80). С. 106–115. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-106-115.

References

1. Kireyev A.V., Kozhemyaka N.M., Burdyugov A.S. Energy recovery in vehicle suspension. *Znaniye*. 2016. No 11–1 (40), pp. 12–18. (in Russ.).
2. Posmet'yev V.I., Drapalyuk M.V., Zelikov V.A. Evaluation of the efficiency of the energy recovery system in the vehicle suspension. *Nauchnyy zhurnal KuBG AU*. 2012. No 76 (02), pp. 1–15. (in Russ.).
3. Sankaranarayanan V., Oncu S., Ozcan D., Guvens L. Vehicle Chassis Control Using Adaptive Semi-Active Suspension. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. 2008.
4. Kawamoto Y., Suda Y., Inoue H., Kondo T. Modeling of electromagnetic damper for automobile suspension. *Journal of System Design and Dynamics*. 2007. No 3, pp. 524–535.
5. Fang Z., Guo X., Xu L., Zhang H. An Optimal Algorithm for Energy Recovery of Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber. *Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal*. 2013. No 6.
6. Bal'sam A., Ryazantsev V.I. Stabilization of the vertical reactions of the road to the wheels and the smoothness of the vehicle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2017. No 5. (in Russ.).
7. Ryazantsev V.I. Method of increasing vehicle stability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2013. No 9. (in Russ.).
8. Styrov A.E. An approach to using energy recovery in electromechanical active vehicle suspension. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. 2015. No 2 (80), pp. 106–115. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-106-115. (in Russ.).

PROBLEMS OF USING ACTIVE-RECUPERATIVE SUSPENSION AND WAYS TO SOLVE THEM

V.M. Zamyslov, PhD in Engineering A.E. Yesakov
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
shoorroop@gmail.com

The aim of the work is to reveal the unobvious disadvantages of active-recuperative suspension, as well as to identify possible options for dealing with them. Such problems are the danger of suspension breakdown in the active mode, the impossibility of operating in the regenerative mode when the suspension deformation rate is below the threshold, and the system operation in swing mode. The novelty of the work lies in the fact that these aspects of the functioning of the active-recuperative suspension system were not previously considered. The problem of the increased risk of suspension breakdown is that in the active mode, the deformation of the elastic device occurs not only due to the work of external disturbance (road irregularities), but also due to the work performed by the actuator. The following solutions are offered: correct selection of system parameters; collection of additional information about the roughness profile; introduction of preventive measures into the control algorithm. The problem of the impossibility of operating in a regenerative mode at a suspension deformation rate below the threshold is that the electromotive force of induction on the rotor winding at low speeds may be lower than the threshold charging voltage at the terminals of the energy storage device. The following solutions are offered: dry friction in the suspension; introduction of a shock absorber with a pronounced degressive characteristic into the suspension structure; lowering the charging threshold voltage by separating the supply and charging circuits using a voltage converter; introduction of a "scattering chain" into the armature chain; optimal control of the excitation circuit. The problem of the system operation in the swing mode is that, under certain conditions, energy is supplied to the oscillatory system through the actuator, resulting in a gradual increase in the oscillation amplitude. The following solutions are proposed: the introduction of an additional damper or regenerative connection on the deformation rate of the suspension.

Keywords: vehicle, active suspension, recuperative suspension, electromagnetic damper.

Cite as: Zamyslov V.M., Yesakov A.E. Problems of using active-recuperative suspension and ways to solve them. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2020. No 3 (45), pp. 14–22 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-14-22.