



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.3.08

УДК 62-52

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕНОСА ГРУЗА ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Р.Р. Саттаров, Р.Т. Хазиева, М.Д. Иванов

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 мая 2021

Одобрена: 23 сентября 2022

Принята к публикации: 24 сентября 2022

Ключевые слова:

оптимизация переноса груза, колебательная система, четырехпружинный подвес, нелинейная характеристика, генерация электрической энергии.

АННОТАЦИЯ

Целью работы является определение требований, предъявляемых к системе подвеса рюкзака, которая значительно бы облегчила перенос груза человеком. На основе исследований других авторов выявлено, что задача минимизации энергии, затрачиваемой на перенос груза, может быть решена при помощи снижения амплитуды колебаний рюкзака при ходьбе человека. Следовательно, идеальной характеристикой системы подвеса груза является такая зависимость результирующей силы, действующей на рюкзак при его перемещении, при которой рюкзак «зависает» на одном уровне над землей. В работе показано, что при учете возможности генерации электрической энергии при относительном движении груза вдоль спины человека форма зависимости такой силы от вертикальных колебаний центра масс человека будет являться эллипсоидной. Близкую к данной идеальной характеристике можно воспроизвести при помощи колебательной системы, состоящей из четырех пружин, каждая из которых действует на контейнер рюкзака в заданный промежуток времени. Четырехпружинный подвес позволяет уменьшить амплитуду колебаний рюкзака над поверхностью земли до 0,02 мм, то есть свести энергетические затраты на перенос груза практически до нуля. Практическая реализация такой системы остается весьма сложной задачей: используемые пружины должны обладать ярко выраженной нелинейной характеристикой, то есть иметь жесткую характеристику, чтобы удерживать весьма массивный груз на весу, но при этом быть мягкими, чтобы груз мог колебаться в своём относительном движении вдоль спины человека, также необходимо разработать механизм, в нужный момент включающий ту или иную пружину. В дальнейших исследованиях поставлена задача определения условий работы системы подвеса при изменениях скорости движения и походки пользователя.

© ПНИПУ

Введение

Тяга к исследованию мира и мобильности заложена в людях самой природой. Всемирный экономический форум определил будущую мобильность, как один из глобальных вызовов. В то время как возникает все более технологичная смарт-инфраструктура, люди по-прежнему стремятся исследовать нетронутые природные области, где можно было бы оказаться наедине с природой, не нарушая равновесия экосистем. В таких условиях актуальной остается старая технология переноски грузов

«за плечами» – при помощи рюкзаков. В последние годы предприняты попытки их улучшения [4; 7].

Масса рюкзака туриста-любителя может превышать 20 кг, а профессионального спасателя или военного – 40 кг. При каждом шаге мышцами совершается работа, которую примерно можно оценить как подъем центра масс человека и рюкзака на амплитуду его колебаний [5]. Подвес рюкзака на пружинах позволяет уменьшить амплитуду его вертикальных колебаний, что позволяет оптимизировать энергетические затраты человека на переноску груза [6]. Более того, относительное перемещение

© Саттаров Роберт Радикович – д.т.н., профессор, e-mail: sattar.rb@gmail.com ID: 0000-0001-9624-965X

© Хазиева Регина Тагировна – к.т.н., доцент, e-mail: khazievart@mail.ru

© Иванов Максим Дмитриевич – магистрант группы МАЭ04-21-01, e-mail: maxivanovd@mail.ru ID: 0000-0002-3316-2140



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

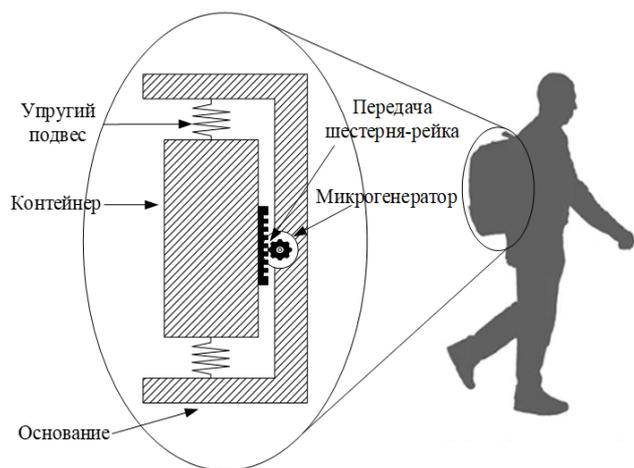


Рис. 1. Рюкзак с динамическим подвесом и генератором электрической энергии

рюкзака можно использовать для генерации электрической энергии [4; 6; 7; 9; 10].

В настоящей статье решена задача определения требований к идеальной системе подвеса рюкзака, которая обеспечит минимизацию энергетических затрат человека при переносе груза. Полученные требования позволяют определить общий подход к реализации четырехпружинной системы подвеса. Моделирование предлагаемой системы подвеса показывает возможность практически полного снижения затрат энергии на перенос грузов.

Энергетические затраты при переносе рюкзака

На рис. 1 представлено схематичное изображение рюкзака с подвесом и электрическим микрогенератором. Рюкзак состоит из основания, которое фиксируется на спине человека, и подвижного контейнера, в котором находится груз. Контейнер подвешен на упругом подвесе (пружины) относительно основания. Линейные направляющие (на рис. 1 не показаны) ограничивают передвижения контейнера только продольными колебаниями. Относительные продольные колебания контейнера преобразуются во вращательное движение микрогенератора с помощью передачи шестерня-рейка. При подключенной электрической нагрузке, генератор вырабатывает электрический ток. Таким образом, энергия относительных продольных колебаний может быть преобразована в электрическую. С другой стороны, динамический упругий подвес основной массы рюкзака с грузом позволяет уменьшить энергетические затраты человека при переносе груза.

Пусть y_1 – отклонение проекции положения центра масс человека и основания рюкзака на вертикальную ось от начального значения. Согласно исследованиям [2], кривая перемещения центра масс напоминает синусоиду, её размах колебаний составляет от 4 до 6 см, соответственно амплитуда y_{1m} – от 2 до 3 см. Тогда зависимость $y_1(t)$ можно представить как:

$$y_1(t) = y_{1m} \sin(\omega t), \quad (1)$$

где $y_{1m} \approx (2-3)$ см, ω – циклическая частота колебаний центра масс.

Работа человека по подъёму собственного веса и основания рюкзака за один шаг будет равна:

$$A_{11} = Mg \cdot 2y_{1m}, \quad (2)$$

где M – сумма масс человека и основания рюкзака.

Пусть y_2 – отклонение проекции положения центра масс контейнера на вертикальную ось от начального значения этой проекции y_{20} . При переносе контейнера на упругом подвесе $y_2(t)$ также будет меняться гармонически, а её частота будет совпадать с частотой внешних воздействий, то есть:

$$y_2 = y_{20} + y_{2m} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (3)$$

где $y_{2m} \approx (2-3)$ см, ω – циклическая частота колебаний центра масс; φ_0 – начальная фаза.

Работа человека по подъёму веса контейнера за один шаг будет равна:

$$A_{12} = mg \cdot 2y_{2m}, \quad (4)$$

где m – масса рюкзака.

Суммарная работа человека будет равна сумме работ по подъёму центра масс человека и центра масс контейнера:

$$A_{\Sigma} = A_{11} + A_{12} = 2(Mgy_{1m} - mgy_{2m}). \quad (5)$$

При обычном способе крепления рюкзак плотно прилегает к спине, и движение центра масс рюкзака полностью повторяет движение центра масс человека:

$$y_{1m} = y_{2m}. \quad (6)$$

Человек при этом расходует энергию как для подъёма собственного веса, так и веса груза.

Условие минимальных энергетических затрат

Чтобы облегчить ходьбу человека с тяжелым рюкзаком, необходимо уменьшить энергетические затраты. Если рюкзак при ходьбе будет «зависать» на постоянном уровне над поверхностью земли, то $y_{2m} = 0$, а работа человека ограничится только подъёмом собственного центра масс. При этом рюкзак будет в относительном движении к основанию рюкзака, что может использоваться для генерации электрической энергии.

Найдем требования к «идеальной» системе подвеса рюкзака, которая обеспечивает постоянную высоту нахождения груза при ходьбе. В этом случае будут верны следующие соотношения для y_2 и его производных:

$$y_2 = \dot{y}_2 = \ddot{y}_2 = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим силы, действующие на контейнер рюкзака (рис. 2). При этом не будем учитывать собственный вес упругих элементов, а также будем считать систему симметричной. Тогда на контейнер с грузом действуют следующие три силы.

1. Сила тяжести: mg ,
2. Сила упругости пружин, являющаяся нелинейной функцией от её удлинения:

$$F = f(y_1 - y_2).$$

С учетом (7), силу упругости можно выразить как:

$$F = f(y_1). \quad (8)$$

3. Электромагнитная сила, возникающая при протекании тока по обмотке микрогенератора. Можно показать, что эта сила пропорциональна относительной скорости движения рюкзака вдоль основания [4; 5], и с учетом (7) равна:

$$F_3 = k(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) = k(\dot{y}_1). \quad (9)$$

где k – коэффициент пропорциональности между скоростью движения рюкзака вдоль направляющих и силой F_3 . Этот коэффициент определяется конструктивными параметрами микрогенератора и передачи шестерня-рейка [4; 5]. Электромагнитная сила аналогична силам демпфирования в механических колебательных системах.

Тогда для контейнера рюкзака можно записать следующее уравнение:

$$m\ddot{y}_2 = F(y_1) + k\dot{y}_1 = mg. \quad (10)$$

Перепишем уравнение (10) с учетом (1) и (7):

$$F(y_1) = mg - k\dot{y}_1 = mg - ky_{1m}\omega \cos(\omega t). \quad (11)$$

Заметим, что:

$$\cos(\omega t) = \pm \sqrt{1 - \sin^2(\omega t)} = \pm \sqrt{1 - \frac{y_1^2}{y_{1m}^2}}. \quad (12)$$

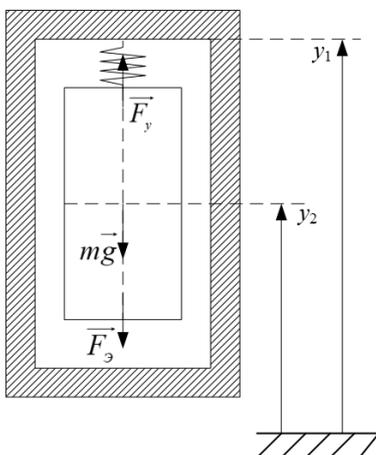


Рис. 2. Силы, действующие на рюкзак

С учетом (11) и (12) получим следующее выражение для $F(y_1)$:

$$F(y_1) = mg \pm k\omega \sqrt{y_{1m}^2 - y_1^2}. \quad (13)$$

На рис. 3 изображен график зависимости этой силы от y_1 . Из уравнения (13) видно, что идеальная зависимость силы от перемещения описывается эллипсом (см. рис. 3).

В рассмотренной системе подвеса (см. рис. 2) могут использоваться несколько параллельно включенных пружин, тогда сила F всегда может быть представлена как упругая сила от одной эквивалентной пружины. Однако характеристику на рис. 3 невозможно обеспечить только одной пружиной или рядом параллельных пружин. Характеристику, близкую к требуемой, можно получить с помощью четырех пружин, которые будут действовать только в некоторые интервалы времени. Система с четырьмя независимыми пружинами представлена на рис. 4, а теоретическая зависимость силы упругости такой системы подвеса представлена на рис. 3 (красные отрезки).

Определим, как необходимо задавать каждую из таких сил. Из рис. 3 следует, что коэффициент жесткости каждой из пружин должен быть одинаковым и равен $c = k\omega$.

1. $F_{y1}(0) = mg - ky_{1m}\omega$, $F_{y1}(y_{1m}) = mg$; данная пружина действует при $\omega t \in [0; \frac{\pi}{2}]$. Один конец закрепим выше рюкзака, второй – к рюкзаку. Пружина работает в растянутом положении. Её растяжение при $y_1 = 0$ и $y_2 = 0$ составит $\Delta y_{10} = \frac{mg}{c} - y_{1m}$. С учетом данных коэффициентов, можно записать:

$$F_{y1} = \begin{cases} mg + k\omega(y_1 - y_2 - y_{1m}) & \text{при } \omega t \in [0; \frac{\pi}{2}], \\ 0 & \text{при } \omega t \in [\frac{\pi}{2}; 2\pi]. \end{cases} \quad (14)$$

2. $F_{y2}(y_{1m}) = mg$, $F_{y2}(0) = mg + ky_{1m}\omega$; данная пружина действует при $\omega t \in [\frac{\pi}{2}; \pi]$. Один конец закрепим ниже рюкзака, второй – к рюкзаку. Пружина работает в растянутом положении. Её растяжение при $y_1 = 0$ и $y_2 = 0$ составит $\Delta y_{20} = \frac{mg}{c} + y_{1m}$.

С учетом данных коэффициентов, можно записать:

$$F_{y2} = \begin{cases} mg - k\omega(y_1 - y_2 - y_{1m}) & \text{при } \omega t \in [\frac{\pi}{2}; \pi], \\ 0 & \text{при } \omega t \in [\pi; \frac{5\pi}{2}]. \end{cases} \quad (15)$$

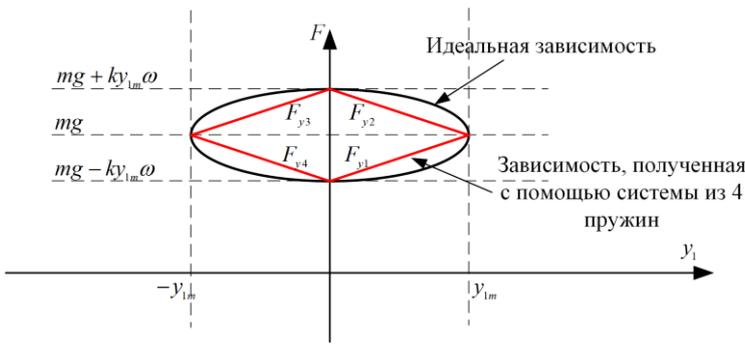


Рис. 3. Зависимость силы упругости F от y_1 : черная линия – в идеальной системе подвеса, красная линия – полученная при помощи четырех пружин

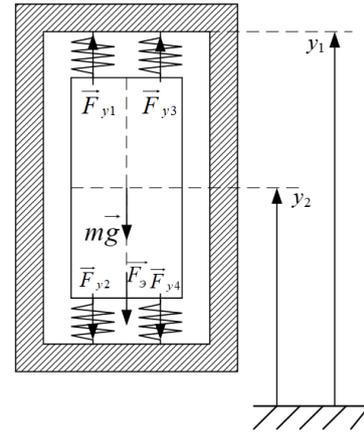


Рис. 4. Конструкция системы подвеса и силы, действующие на контейнер рюкзака

3. $F_{y3}(0) = mg + ky_{1m}\omega$, $F_{y3}(-y_{1m}) = mg$; данная пружина действует при $\omega t \in \left[\pi; \frac{3\pi}{2} \right]$. Один конец закрепим выше рюкзака, второй – к рюкзаку. Пружина работает в растянутом положении. Её растяжение при $y_1 = 0$ и $y_2 = 0$ составит $\Delta y_{03} = \frac{mg}{c} + y_{1m}$.

С учетом данных коэффициентов, можно записать:

$$F_{y3} = \begin{cases} mg + k\omega(y_1 - y_2 + y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[\pi; \frac{3\pi}{2} \right], \\ 0 & \text{при } \omega t \in \left[\frac{3\pi}{2}; 3\pi \right]. \end{cases} \quad (16)$$

4. $F_{y4}(-y_{1m}) = mg$, $F_{y4}(0) = mg - ky_{1m}\omega$; данная пружина действует при $\omega t \in \left[\frac{3\pi}{2}; 2\pi \right]$. Один конец закрепим ниже рюкзака, второй – к рюкзаку. Пружина работает в растянутом положении. Её растяжение при $y_1 = 0$ и $y_2 = 0$ составит $\Delta y_{04} = \frac{mg}{c} - y_{1m}$.

С учетом данных коэффициентов, можно записать:

$$F_{y4} = \begin{cases} mg - k\omega(y_1 - y_2 + y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[\frac{3\pi}{2}; 2\pi \right], \\ 0 & \text{при } \omega t \in \left[0; \frac{3\pi}{2} \right]. \end{cases} \quad (17)$$

Результирующую силу упругости, действующую на рюкзак, можно выразить, как:

$$+ F_{y4} = \begin{cases} mg + k\omega(y_1 - y_2 - y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right], \\ mg - k\omega(y_1 - y_2 - y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[\frac{\pi}{2}; \pi \right], \\ mg + k\omega(y_1 - y_2 + y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[\pi; \frac{3\pi}{2} \right], \\ mg - k\omega(y_1 - y_2 + y_{1m}) & \text{при } \omega t \in \left[\frac{3\pi}{2}; 2\pi \right]. \end{cases} \quad (18)$$

Для реализации подобного четырехпружинной подвеса могут быть использованы пружины с квазиулевой жесткостью [1; 3; 11].

Анализ идеального четырехпружинного подвеса

Исследуем, как будет двигаться рюкзак при замене идеальной силы $F(y_1)$ на силу F_y , которую можно реализовать четырьмя линейными пружинами. Уравнение движения рюкзака будет (с учетом (9), (10) и (16)):

$$m\ddot{y}_2 = F_y(y_1, y_2, t) + k(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - mg. \quad (19)$$

Решение данного уравнения выполним при помощи среды динамического моделирования *SimInTech*. Были заданы следующие параметры: масса контейнера рюкзака (с полезным грузом) составляет 10 кг, амплитуда колебаний центра масс составляет 2,5 см, продолжительность шага равна 0,6 с [9], циклическая частота в этом случае будет равна:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0,6} = 10,47 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (20)$$

Коэффициент, связывающий силу и относительную скорость движения рюкзака, рассчитаем в соответствии с паспортными данными принятого генератора (на базе *FL57BL*):

$$k = \frac{(C_0\Phi)^2}{\rho^2} \cdot \frac{1}{(R_H + R_J)} = \frac{(0,063)^2}{0,01^2} \cdot \frac{1}{(160 + 160)} = 0,124 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (21)$$

Здесь C_0 – постоянная генератора; Φ – магнитный поток возбуждения генератора; R_H и R_J – сопротивления нагрузки и якоря; ρ – эквивалентный радиус приведения.

На рис. 5 изображена структурная модель, соответствующая уравнению (19).

Одним из условий адекватности разработанной математической модели является непрерывность действия силы упругости пружин. На рис. 6 изображена зависимость $F_y(t)$.

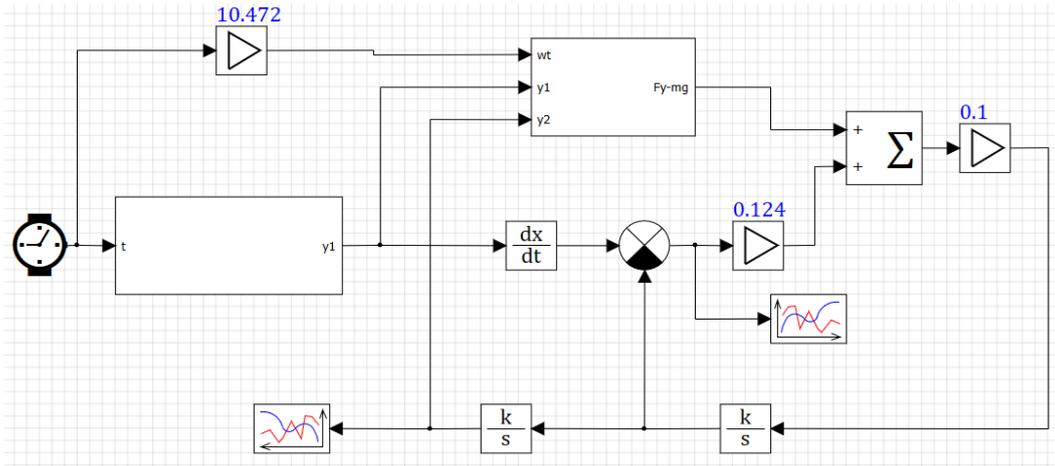


Рис. 5. Компьютерная модель колебаний рюкзака

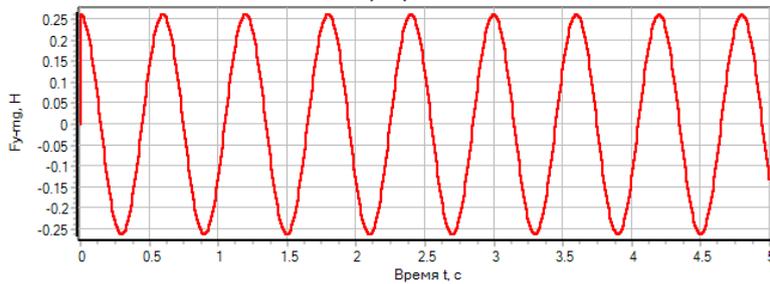


Рис. 6. Зависимость $(F_y - mg)$ от времени

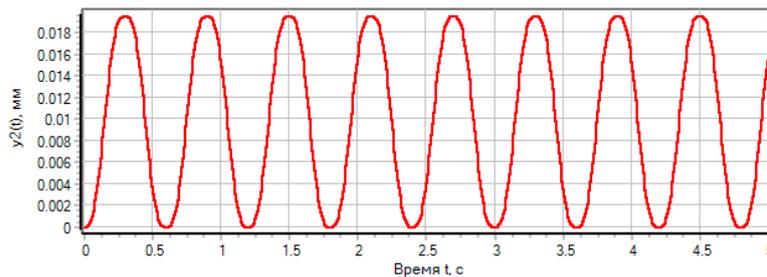


Рис. 7. Зависимость $y_2(t)$

Зависимость $y_2(t)$ представлена на рис. 7. В компьютерной модели принято, что в начальный момент времени пружина находится в растянутом состоянии, а контейнер, соответственно, в самом нижнем положении. При дальнейших колебаниях $y_2(t)$ не опускается ниже начального значения, что свидетельствует об установившемся режиме колебаний.

Как видно из рис. 7, амплитуда колебаний рюкзака составляет всего 0,02 мм. При обычном креплении амплитуда бы составила 25 мм (при тех же расчетных данных), что в 1250 раз больше. Поскольку энергетические затраты на перенос груза прямо пропорциональны амплитуде его колебаний [2; 4; 5], то, соответственно, они также снизятся более чем в 1000 раз. Однако при более точном анализе необходимо учесть массу подвеса и основания рюкзака, которая может составлять до 2–3 кг. Это существенно меньше массы контейнера с грузом, а значит, эффективность предложенной системы существенно не снизится.

Однако и такая пассивная колебательная система нуждается в питании извне. Энергия необходима для возврата пружин 3 и 4 после каждого шага в исходное положение. Также пружины должны обладать нелинейной характеристикой, ведь иначе среднее растяжение пружины при заданной жесткости

$$c = k\omega \quad (22)$$

составит

$$\Delta y_0 = \frac{mg}{c} = \frac{10 \cdot 9,8}{1,298} = 75,5 \text{ м}, \quad (23)$$

что, естественно, невозможно. Таким образом, для практической реализации идеального подвеса необходимо решить нетривиальную задачу по реализации четырехпружинной упругой системы, обеспечивающей близкую к идеальной силовую характеристику. При этом могут быть использованы пружины с квази нулевой жесткостью [1; 3; 11].

Заключение

В статье поставлена задача определения идеального упруго подвеса для рюкзака, когда энергетические затраты человека на перенос рюкзака практически отсутствуют. Проведенный анализ показал, что полученная идеальная силовая характеристика подвеса может быть приближенно реализована с помощью линейных пружин, что теоретически позволяет уменьшить энергетические затраты более чем в 1000 раз. Однако для реализации подобной идеальной системы подвеса необходимо

решить задачу ограничения колебаний рюкзака. Кроме того, необходимо провести оценку влияния собственной массы основания рюкзака с подвесом на его эффективность. Другой важной задачей является необходимость определения условий работы системы подвеса при изменениях скорости движения и походки пользователя (следовательно, при изменениях амплитуды, частоты и формы возбуждения), что позволит разработать и реализовать самонастраивающиеся адаптивные системы подвеса.

Список литературы

1. Валеев А.Р., Зотов А.Н., Зубкова О.Е., Ризванов Р.Г., Свиридов М. В. Системы с разрывной квазиулеговой восстанавливающей силой // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2017. – № 5. – С. 130–136.
2. Дубровский В.И. Биомеханика – М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2008. – 669 с.
3. Зотов А.Н., Иванов М.Д. Создание заданной перегрузки при помощи колебательных систем с постоянной восстанавливающей силой при наличии сил тяжести // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. тр. в 4-х томах, 19–24 августа 2019 года. – Уфа, 2019. – С. 338–340.
4. Саттаров Р.Р., Алмаев М.А. К оценке эффективности электромеханических генераторов на основе виброударных колебательных систем // Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем: XVIII Международный Симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А.Е. Кобринского, 17–23 мая 2015 года. – Москва-Бекасово, 2015. – С. 272–279.
5. Саттаров Р.Р., Полихач Е.А., Крымов Б.С., Галиакберова Э.Ф. Оценка возможности использования энергии движения человека для электропитания маломощных электронных устройств // Современные проблемы науки и образования в техническом вузе: материалы II Международной научно-практической конференции, 25–27 июня 2015 года. – Стерлитамак, 2015. – С. 217–221.
6. Granstrom J., Feenstra J., Sodano H. A., Farinholt K. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps // Smart Materials and Structures. – 2007. – Vol. 16, no 5. – P. 1810–1820. DOI: 10.1088/0964-1726/16/5/036
7. Green P.L., Papatheou E., Sims N.D. Energy harvesting from human motion: an evaluation of current nonlinear energy harvesting solutions // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – Vol. 24, no 12. DOI: 10.1177/1045389X12473379
8. He L., Xiong C., Zhang Q., Chen W., Fu C., Lee K.-M. A backpack minimizing the vertical acceleration of the load improves the economy of human walking // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2020. – Vol. 28, no 9. – P. 1994–2004. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3011974
9. Mitcheson P.D., Yeatman E.M., Rao G.K., Holmes A.S., Green T.C. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96, no 9. – P. 1457–1486. DOI: 10.1109/JPROC.2008.927494
10. Tech G., Paradiso J.A. Human generated power for mobile electronics // Low-Power Electronics Design. – 2004. DOI: 10.1201/9781420039559.ch45
11. Zotov A., Valeev A. Vibration isolating and impact protecting systems with quasi-zero stiffness providing wide operating area // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Lecture Notes in Mechanical Engineering, 25–29 March 2019. – Sochi, 2019. – P. 299–307. – DOI 10.1007/978-3-030-22041-9_34

OPTIMIZING LOAD CARRY BY USING AN OSCILLATION SYSTEM

R.R. Sattarov, R.T. Khazieva, M.D. Ivanov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia,

ARTICLE INFO

Received: 14 May 2021

Approved: 23 September 2022

Accepted for publication: 24 September 2022

Keywords: load carry optimization, oscillation system, four-spring suspension, non-linear characteristic, electric power generation.

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the requirements for a backpack suspension system, which would greatly facilitate the carrying of a backpack by a person. Based on the studies of other authors, it was revealed that the problem of minimizing the energy spent on carrying the load can be solved by reducing the amplitude of the backpack oscillations when a person walks. Therefore, the ideal characteristic of the load suspension system is such a dependence of the resulting force acting on the backpack during its movement, in which the backpack "hangs" at the same level above the ground. The paper considers a backpack with a built-in microgenerator of electrical energy, which works due to the relative movement of the load along the back of a person. In this case, the dependence of the resulting elastic force on the vertical displacement of the human center of mass (CoM) will have the shape of an ellipse. Close to this ideal characteristic can be reproduced using an oscillatory system consisting of four springs, each of which acts on the backpack container for a given period of time. A four-spring suspension allows reducing the amplitude of the backpack oscillations above the ground to 0.02 mm, that is, to reduce the energy costs for carrying cargo to almost zero. The practical implementation of such a system remains a very difficult task. The springs used must have a pronounced non-linear characteristic. That is, they must have a rigid characteristic in order to hold a very massive load in weight, but at the same time be soft so that the load can oscillate in its relative movement along the person's trunk. It is also necessary to develop a mechanism that, at the right time, switch one or another spring. In further studies, the task was set to determine the operating conditions of the suspension system with changes in the speed of movement and gait of the user.

© PNRPU