



УДК 519.6

Б.К. Гусев, В.В. Пеленко, А.М. Ширшиков

### ВЫЧИСЛЕНИЕ И АНАЛИЗ УДЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ, ОЦЕНКА КЛЮЧЕВОГО УДЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Для всесторонней оценки качества исследуемой техники разработаны разнообразные методики по определению путей совершенствования данных механических систем. Одним из путей научного обоснования, исследования и расчета узлов механических систем является использование классического принципа наименьших действий. Определению величин данных действий и посвящена данная работа.

**Ключевые слова:** затраты механических средств за рабочий цикл, удельное действие, виды и величина полезных затрат, ключевое удельное действие.

B.K. Gusev, V.V. Pelenko, A.M. Shirshikov

### SPECIFIC ACTION CALCULATION AND ANALYSIS, KEY SPECIFIC ACTION ESTIMATION

Various techniques for defining the ways to improve the given mechanical systems are developed for overall quality estimation of the technical equipment being researched. One of the ways for scientific substantiation, research and calculation of the mechanical system units is use of the least action classical principle. The article is devoted to determination of these actions.

**Key words:** mechanism consumption within the process cycle, specific action, kinds and quantity of the efficient consumptions, key specific action.

На основе критериальных действий можно определить затраты механических средств за рабочий цикл. Под затратами механической работы понимаются затраты либо энергии-времени, либо принуждения-времени или количества движения-времени, либо импульса силы. Данные затраты расходуются как на создание полезного эффекта, так и на потери (износ, вибрация, шум и т.п.).

В зависимости от вида интегральной функции  $F(I)$  можно получить критерии, позволяющие оценивать различные условия функционирования технических систем: причины износа, возникновение сил инерции, импульсных нагрузок и т.д. Созданные критерии названы в честь ученых, использовавших впервые соответствующие интегральные функции [1–6]. Перечислим данные критерии.

*Критериальное действие по Гауссу  $I_{Гс}$*  оценивает конструкции связей, структуру и износоустойчивость механической системы.

*Критериальное действие по Анпелю  $I_A$*  оценивает действие сил инерции, характеризующих напряженность динамического режима системы.

*Критериальное действие по Лагранжу  $I_l$*  определяет затраты кинетической энергии-времени, действие масс элементов системы, взвешенное по квадратам их скоростей.

*Критериальное действие по Эйлеру  $I_э$*  характеризует затраты потенциальной энергии-времени.

*Критериальные действия по Гамильтону-Остроградскому  $I_г-о$  и по Гамильтону  $I_{гм}$*  определяют затраты свободной и полной энергии-времени.

*Критериальные действия по Декарту  $I'д$  и  $I''д$*  оценивают затраты количества движения времени соответственно в поступательном и вращательном движениях звеньев системы.

*Критериальное действие по Бурдану  $I_B$*  определяет затраты импульса сил и в частности – импульса сил инерции.

*Критериальное действие по Кориолису-Понселе  $I_{К-П}$*  оценивает затраты механической работы и в частности – работы сил и инерции.

Локальный критерий по Герцу  $I_{Гц}$  используется при исследованиях и оптимизации механизмов с высшими кинематическими парами.

Локальный критерий по износу  $I_{ИЗ}$  оценивает износостойкость элементов высшей кинематической пары.

Введение в механику новых мер движения или воздействия позволяет увеличить количество рассматриваемых критериальных действий.

Для сравнительной оценки механических систем различной производительности и определенного назначения используется термин «удельное действие» [1–3], под которым понимается критериальное действие, отнесенное к единице эффекта.

$$K = \frac{1}{a} I = \frac{1}{a} \int_{t_0}^{t_1} F dt, \quad (1)$$

где  $a$  – полезный эффект системы за цикл.

Названия критериальных действий соответствуют названиям критериев.

Для проведения сравнительного анализа разнотипных механических систем введем безразмерные удельные действия  $K^\delta$  [4]. Они вычисляются так же, как и удельные действия, только в качестве эффекта  $a$  приняты минимально возможные (полезные) затраты механических средств. Безразмерные удельные действия системы показывают, во сколько раз затраты системой определенных механических средств  $I$  превышают полезные затраты  $a$ .

Удельные действия по сравнению с используемыми классическими критериями обладают следующими дополнительными свойствами:

- охватывают все механические средства, определяющие затраты в механической системе в процессе их движения;
- каждое удельное действие описывает свойства динамической модели системы так же полно, как и дифференциальное уравнение движения с начальными условиями;
- математически удельное действие включает в себя все параметры и узлы динамической модели системы, так как в качестве подинтегральной функции выступает или мера движения, или мера воздействия;
- удельные действия поддаются делению по узлам и деталям системы;
- удельные действия ввиду интегрального характера оценивают динамику системы за весь цикл движения;
- основанием для определения удельных действий являются проектные документы системы;
- вычисление удельных действий с требуемой точностью, а также оптимизацию системы, созданную на основе данных действий, удобно выполнять математическими методами с помощью ЭВМ;
- удельные действия пропорциональны основным народнохозяйственным критериям, а именно – себестоимости единицы эффекта, надежности системы, и следовательно, они аналитически связаны с конструктивными критериями.

Большинство конструктивных критериев оптимизации механических систем базируется на оценке следствий механических явлений, т.е. оценивается полезный эффект, нагрев, износ, шум, вибрация и т.д. А в основу оценки удельных действий заложены критерии основных причин механических явлений: сил, связей, геометрии масс, начальных условий движения. Это является главным отличием удельных действий от традиционно принятых критериев. Затраты механических средств выражают основные причины возникновения механических явлений. Удельные действия полностью описывают названные затраты, что подтверждает общность предложенных критериев.

На сегодняшний день одним из путей научного обоснования, исследования и расчета узлов механических систем является использование классического принципа наименьших действий, применением которого в области торгово-технологического оборудования и заняты авторы.

Принцип удельных действий целесообразно применять в первую очередь при решении задач поискового конструирования (выбор принципа действия системы, определение способа ее технического решения, направление оптимизация параметров и т.п.). Решение перечисленных задач осуществляется за счет принятия наименьшего значения главного – ключевого – удельного действия, определяемого функцией цели системы.

Выбранный механизм привода сварочного утюга предназначен для создания механической работы  $mW$  на перемещение  $\tilde{S}$  с требуемой скоростью. При данном условии ключевым удельным действием, отвечающим данной цели, является удельное действие по Кориолису-Понселе (функцией для интегрирования является мощность  $|Q_\varphi \cdot \dot{\varphi}|$ ).

Для исследования и оптимизации механизмов с высшими кинематическими парами (в рассматриваемом механизме такой является пара «кулачок-ролик») также представляет интерес использование локального критерия по Герцу (функцией для интегрирования является контактное напряжение в высшей паре  $\sigma_K$ ).

Для проведения сравнительного анализа разнотипных механических систем введем безразмерные удельные действия  $K^\delta$  [2]. Они вычисляются так же, как и удельные действия, только в качестве эффекта  $a$  приняты минимально возможные (полезные) затраты механических средств. Безразмерные удельные действия системы показывают, во сколько раз затраты системой определенных механических средств  $I$  превышают полезные затраты  $a$ .

В работе [4] была решена задача по формированию математической модели исследуемого механизма. На основании данной модели были определены величины значения затрат системой определенных механических средств. Таким образом, встает конкретная задача по определению величин полезных затрат

### Полезные затраты механических средств и определение их величин

Полезные затраты – это минимально возможные затраты механических средств [2]. С их помощью можно оценивать принуждение, энергию, количество движения, силу или мощность рабочего звена.

Полезные затраты механических средств определяются в соответствии с работой [1].

Полезные затраты кинетической энергии-времени находятся по формуле

$$a_{\text{Л}} = \int_0^{\tilde{t}} \tilde{T} dt = \frac{1}{2} m \frac{\tilde{S}}{\tilde{t}^3}, \quad (2)$$

где  $T$  – кинетическая энергия, Нм;

$m$  – масса утюга, кг;

$\tilde{S}$  – перемещение утюга, м;

$\tilde{t}$  – время перемещения утюга, с.

Полезные затраты энергии ускорения-времени определяются следующим образом:

$$a_{\text{А}} = \int_0^{\tilde{t}} \tilde{V} dt = 6m \frac{\tilde{S}^2}{\tilde{t}^3}. \quad (3)$$

Полезные затраты принуждения-времени

$$a_{\text{Гс}} = \int_0^{\tilde{t}} \tilde{Z} dt = \frac{1}{2} mg^2 \tilde{t} + a_{\text{А}}. \quad (4)$$

Полезные затраты количества движения-времени

$$a_{\text{Д}} = t \int_0^{\tilde{t}} \tilde{K} dt = m\tilde{S}. \quad (5)$$

Полезные затраты потенциальной энергии-времени

$$a_{\mathcal{E}} = \int_0^{\tilde{t}} |\Delta \tilde{T}| dt = \frac{1}{6} mg^2 \tilde{t}_{cn}^3, \quad (6)$$

где  $\tilde{t}_{cn} = \sqrt{\frac{2\tilde{S}}{g}}$  – время свободного падения, с.

Полезные затраты импульса силы

$$a_B = \int_0^{\tilde{t}} |\tilde{Q}| dt = mg\tilde{t}. \quad (7)$$

Полезные затраты работы находятся по соотношению

$$a_{K-П} = \int_0^{\tilde{t}} |\tilde{Q} \cdot \dot{g}| dt = mg\tilde{S}. \quad (8)$$

Принимая во внимание, что перемещение  $\tilde{S} = 0,121 м$ , масса утюга = 12,5 кг, а время перемещения утюга  $\tilde{t} = 1,43 с$ , получаем следующие значения полезных затрат, величины которых приведены в таблице 1.

#### Виды полезных затрат и значения их величин

Вид полезных затрат	Обозначение и значение величины
Кинетическая энергия-времени, кгм/с	$a_{\mathcal{L}} = 0,064$
Энергия ускорения-времени, кгм/с	$a_A = 0,376$
Принуждение времени, кгм/с	$a_{Гс} = 860,5$
Количества движения-времени, кгм	$a_D = 1,52$
Потенциальная энергия-времени, кгм/с	$a_{\mathcal{E}} = 0,785$
Импульс силы, кгм	$a_B = 1,52$
Работа, кгм/с	$a_{K-П} = 0,785$

Значения полезных затрат могут служить эталоном для реальных механических систем.

Для практического использования математической модели механизма привода упаковочной машины составлена программа для ЭВМ. В нее включены блоки интегрирования дифференциальных уравнений механизма.

Определим величины удельных действий. Для интегрирования уравнения движения использован метод Рунге-Кутты, который обладает наименьшей погрешностью и хорошей сходимостью результатов. В процессе численного интегрирования в каждом положении кулачка, определяемом текущим значением аргумента  $t$ , выводятся на печать значения времени, угловые координаты, скорость и ускорение кулачка.

Для оценки адекватности кинетических и динамических расчетов характеристик соответствующим параметрам реального процесса необходимо провести комплекс экспериментальных исследований механизма привода утюга.

**Оценка ключевого удельного действия.** Расфасовочно-упаковочное оборудование следует отнести к классу машин, предназначенных для преодоления технологических сопротивлений при перемещении рабочего органа с требуемой скоростью. Функцией цели такого класса машин является совершение механической работы силой  $mW$  на перемещение  $\tilde{S}$ . При этом за ключевое удельное действие принимается

такое действие, по которому можно оценивать затраты механической работы при перемещении рабочего органа с заданной скоростью.

Для осуществления динамического анализа необходимо вычислить все удельные действия, которые определяют затраты механических средств. При этом необходимо осуществить разбивку рассматриваемого механизма по его узлам, а именно: привод, кулачок, коромысло, тяга, цепь, звездочка, утюг и пружина. Причем при оценке закономерностей изменения удельных действий приоритет будем отдаваться ключевому удельному действию по Кориолису-Понселе.

Как отмечалось выше, рассматриваемая машина предназначена для создания механической работы  $mW$  на перемещение  $\tilde{S}$  с требуемой скоростью. При этом ключевым удельным действием, отвечающим данной цели, является удельное действие по Кориолису-Понселе (функцией для интегрирования является мощность  $|Q_\phi \cdot \dot{\phi}|$ ).

При исследовании и оптимизации механизмов с высшими кинематическими парами (в рассматриваемом механизме такой является пара «кулачок-ролик») целесообразно также использовать локальный критерий по Герцу (функцией для интегрирования является контактное напряжение в высшей паре  $\sigma_K$ ).

При динамическом совершенствовании механизма привода утюга необходимо уменьшить удельное действие по Кориолису-Понселе и Герцу с возможным уменьшением всех других удельных действий или по крайней мере с незначительным их увеличением.

Для определения динамического совершенствования рассматриваемого механизма привода был произведен численный эксперимент с использованием ЭВМ. В качестве исследуемых механизмов рассматривались однотипные механизмы с различными параметрами звеньев.

### Выводы

1. Осуществлен расчет величин полезных затрат реальной механической системы (механизм привода утюга), используемых при анализе в качестве эталона.
2. В качестве ключевого удельного действия выбрано удельное действие по Кориолису-Понселе.
3. Осуществлена реализация разработанных моделей на ЭВМ для их практического использования.

### Литература

1. Горский Б.Е. Использование инженерного опыта для оптимального проектирования и эксплуатации механических систем // Вестник машиностроения. – 1991. – №4. – С. 9–11.
2. Горский Б.Е., Ловейкин В.С. Применение коэффициентов удельных действий при исследовании крановых механизмов // Горные, строительные и дорожные машины: респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1980. – Вып.29. – С. 67–73.
3. Груданов В.Я. Энергосберегающие технологические машины и аппараты общественного питания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харьков, 1981. – 37 с.
4. Гусев Б.К., Ширшиков А.М. Разработка принципа удельных действий применительно к совершенствованию торгово-технологического оборудования. – Красноярск: Изд-во КГТЭИ, 2011. – 134 с.
5. Ланцош К. Вариационные принципы механики. – М.: Мир, 1965. – 408 с.
6. Полак Л.С. Вариационные принципы механики, их развитие и применение в физике. – М.: Физматгиз, 1960. – 600 с.

