

УДК.621.3.049.79

С. П. Тимошенко¹, д-р техн. наук, проф., spt@miee.ru,
В. В. Калугин¹, д-р техн. наук, проф., victor118@mail.ru,
Н. М. Парфёнов², канд. техн. наук, доц., sedennik@mail.ru, **С. А. Анчутин**², вед. инженер,
Е. С. Кочурина¹, канд. техн. наук, инженер, **Д. Ж. Мукимов**¹, инженер-конструктор,
Чжо Мьё Аунг¹, аспирант,

¹ МИЭТ (национальный исследовательский университет),

² МАИ (национальный исследовательский университет)

Исследование и разработка методов оценки основных параметров микромеханических преобразователей линейного ускорения

Изложен метод оценки основных параметров (смещение нуля, крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент и т. д.) микроэлектромеханических преобразователей линейного ускорения (ПЛУ). Приведены методы оценки статических и случайных ошибок ПЛУ.

Рассматривается разработанный микромеханический ПЛУ (акселерометр), предназначенный для систем навигации, ориентации, стабилизации, управления движением и наведения различных объектов. Анализ статических характеристик микромеханических ПЛУ проведен с помощью метода наименьших квадратов. Случайные ошибки параметров акселерометра оцениваются с помощью вариации Алана — характеристики шума и других параметров, представляющей собой функцию от времени усреднения. Приведены результаты оценки статических параметров ПЛУ, проведенной с использованием центрифуги с микропроцессорным управлением и программированием режимов, позволившей повысить точность расчета параметров.

Ключевые слова: преобразователи линейного ускорения, статические и случайные ошибки, вибростенд, центрифуга

Введение

Современные микроэлектромеханические (МЭМ) преобразователи все чаще используются в навигации и системах управления авиационно-космической техникой и постепенно вытесняют дорогие электромеханические датчики.

Разработанный МЭМ преобразователь линейного ускорения (акселерометр) предназначен для систем навигации, ориентации, стабилизации, управления движением и наведения различных объектов. Важнейшим этапом в процессе создания и эксплуатации изделия является оценка его основных параметров, поэтому разработка методов оценки параметров микромеханических преобразователей является востребованной и актуальной.

Аналитические исследования преобразователей линейного ускорения с помощью метода наименьших квадратов

На основании экспериментальных данных, содержащих случайные ошибки, был проведен расчет параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей линейного ускорения с помощью метода наименьших квадратов (МНК), минимизирующего разницу между экспериментальными и теоретическими значениями параметров МЭМ преобразователей. Это позволило рассчитать параметры модели с минимальной погрешностью. Мерой разницы

в МНК послужила сумма квадратов отклонений действительных (экспериментальных) значений от теоретических [1—3].

Значение выходного сигнала микроэлектромеханического ПЛУ можно записать следующим образом:

$$U_{\text{вых}_i}(a_i) = K_0 + K_1 a_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}_i}(a_i)$ — выходной сигнал; a_i — измеряемое ускорение на i -м эксперименте; K_0 — смещение нуля; K_1 — крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент); n — число проведенных экспериментов.

Перепишем выражение (1) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} U_{\text{вых}_1}(a_1) \\ \dots \\ U_{\text{вых}_n}(a_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_1 \\ \dots \\ 1 & a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Обозначив $U = \begin{bmatrix} U_{\text{вых}_1}(a_1) \\ \dots \\ U_{\text{вых}_n}(a_n) \end{bmatrix}$ — вектор значений выходного сигнала; $A = \begin{bmatrix} 1 & a_1 \\ \dots \\ 1 & a_n \end{bmatrix}$ — вектор задаваем

мых ускорений; $K = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_n \end{bmatrix}$ — вектор искоемых коэффициентов, перепишем выражение (1) следующим образом:

$$U = AK. \quad (3)$$

Согласно МНК вектор искоемых коэффициентов можно найти по формуле

$$K = (A^T A)^{-1} A^T U. \quad (4)$$

Согласно изложенному методу можно определить, в частности, следующие параметры микромеханического акселерометра: смещение нуля (K_0); значение масштабного коэффициента (K_1).

Исследование случайных ошибок параметров преобразователей линейного ускорения

Для оценки случайных ошибок параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей линейного ускорения будем использовать вариацию Алана [3, 4]. Вариация Алана — характеристика шума и других параметров, представляющая собой функцию от времени усреднения.

Пусть N — число значений записанного выходного сигнала преобразователя с шагом дискретизации по времени τ_0 . Сформируем из полученных значений выходного сигнала K групп по M значений в каждой ($K = N/M$) [4, 5]:

$$\underbrace{U_{\text{ВЫХ}1}, U_{\text{ВЫХ}2}, \dots, U_{\text{ВЫХ}M}}_{k=1}, \underbrace{U_{\text{ВЫХ}M+1}, \dots, U_{\text{ВЫХ}2M}}_{k=2}, \dots, \underbrace{U_{\text{ВЫХ}N-M}, \dots, U_{\text{ВЫХ}N}}_{k=K}. \quad (5)$$

Для каждой полученной группы рассчитаем среднее значение [3]:

$$\bar{U}_k(M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_{\text{ВЫХ}(k-1)M+1}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (6)$$

Далее необходимо рассчитать вариацию Алана для данного числа точек группы [4]:

$$\sigma_A^2(\tau_M) \cong \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} (\bar{U}_{k-1}(M) - \bar{U}_k(M))^2, \quad (7)$$

где $\tau_M = M/f_s$ — время корреляции; f_s — частота дискретизации.

Точность оценки с помощью вариации Алана λ , измеряемая в процентах, повышается с увеличением числа групп K :

$$\lambda = \frac{100}{\sqrt{2(K-1)}}. \quad (8)$$

Для получения оценки вариации Алана с точностью λ в одной группе должно быть не более $M \leq N\lambda^2/(5000 + \lambda^2)$ значений выходного цифрового кода, где λ — допустимая относительная погрешность определения вариации Алана, устанавливаем

мая для конкретной категории испытаний. Итерация повторяется для $M = 2, \dots, N\lambda^2/(5000 + \lambda^2)$. Таким образом, для получения оценки Алана с точностью до 10 % необходимо проводить разбиение на 51 группу, с точностью 5 % — на 201 группу.

Вариацию Алана можно представить следующим образом [4]:

$$\sigma_A(\tau_j) = \sqrt{\sigma_{\text{total}}^2} = \sqrt{\sum_{n=-2}^2 A_n^2 \tau_j^n}, \quad j = 1, \dots, M, \quad (9)$$

отсюда

$$\begin{aligned} \sigma_A^2(\tau_j) &= \frac{A_{-2}^2}{\tau_j^2} + \frac{A_{-1}^2}{\tau_j} + A_0^2 + A_1^2 \tau_j + A_2^2 \tau_j^2 = \\ &= \sum_{n=-2}^2 B_n \tau_j^n, \end{aligned} \quad (10)$$

где $B_n = A_n^2$, $n \in \{-2, -1, 0, 1, 2\}$.

С учетом достаточно большого массива значений выходного сигнала уравнение (10) можно решить методом наименьших квадратов. Для этого перепишем его следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_A^2(\tau_1) \\ \dots \\ \sigma_A^2(\tau_M) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_1^2} & \frac{1}{\tau_1} & 1 & \tau_1 & \tau_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\tau_M^2} & \frac{1}{\tau_M} & 1 & \tau_M & \tau_M^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} B_{-2} \\ B_{-1} \\ B_0 \\ B_1 \\ B_2 \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Таким образом, выражение (10) можно записать в виде

$$\sigma = TB. \quad (12)$$

Таблица 1

Случайные параметры разрабатываемых МЭМС преобразователей [3]

Тип погрешности	Вариация Алана	Параметр
Шум квантования, $\sigma_{\text{quant}}^2(\tau)$	$\frac{3Q^2}{\tau^2}$	Q — коэффициент шума квантования
Случайное блуждание скорости, $\sigma_{\text{arw}}^2(\tau)$	$\frac{N^2}{\tau}$	N — случайное блуждание скорости
Случайный дрейф нулевого сигнала, $\sigma_{\text{bias}}^2(\tau)$	$\frac{2B^2}{\pi} \ln(2)$	B — нестабильность нуля
Случайное блуждание ускорения, $\sigma_{\text{rw}}^2(\tau)$	$K^2 \frac{\tau}{3}$	K — случайное блуждание ускорения
Тренд, $\sigma_t^2(\tau)$	$\frac{R^2 \tau^2}{2}$	R — тренд ускорения
Гармоническая помеха, $\sigma_{\text{sn}}^2(\tau)$	$\Omega_0^2 \left(\frac{\sin^2(\pi f_0 \tau)}{\pi f_0 \tau} \right)$	f_0 — частота гармонической помехи, Ω_0 — амплитуда гармонической помехи

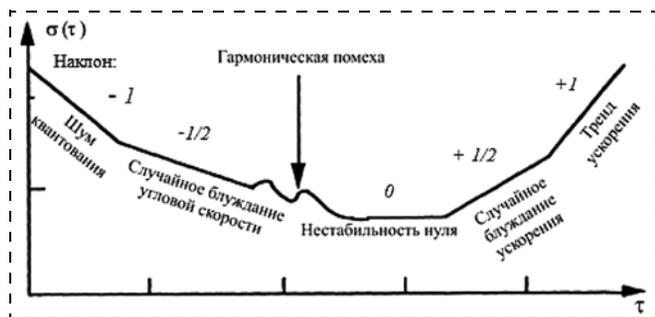


Рис. 1. График зависимости вариации Алана от времени [4]

Согласно МНК вектор искоемых коэффициентов равен

$$B = (T^T T)^{-1} T^T \sigma. \quad (13)$$

Получив значения коэффициентов B_n и учитывая выражение для суммарной погрешности выходного сигнала преобразователя $\sigma^2 = \sigma_{quant}^2 + \sigma_{arw}^2 + \sigma_{bias}^2 + \sigma_{rrw}^2 + \sigma_{sn}^2 + \sigma_t^2$ (табл. 1), можно определить значение каждого из коэффициентов.

В табл. 1 указаны типы случайных параметров разрабатываемых МЭМ преобразователей и аналитические выражения для соответствующих вариаций Алана. На рис. 1 показана типовая диаграмма Алана с указанием искоемых параметров преобразователей.

Кривая, соответствующая квадратному корню из вариации Алана, нанесенная на двойную логарифмическую сетку, определяет случайные параметры разрабатываемых МЭМ преобразователей.

Исследование параметров образцов акселерометров с помощью испытательного оборудования

Исследование статических параметров разрабатываемых датчиков линейного ускорения проводили с помощью центрифуги, а динамических — с помощью вибростенда.

Основным оборудованием для определения статических параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ была центрифуга. В данном случае испытательный стенд был собран на базе центрифуги Acutronic 1135S (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Образец датчика линейного ускорения помещают в крепежную оснастку на центрифуге. Поворотный стол центрифуги обычно вращается в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси так, что на испытываемый МЭМ ПЛУ вдоль поворотного стола действует ускорение: $a = R\omega^2$, где R — длина плеча поворотного стола, ω — угловая скорость вращения центрифуги (рис. 3) [5–10].

Для подачи стабильного питания на испытываемые образцы ПЛУ необходимо использовать источник питания, который позволяет получать плавное регулируемое стабилизированное напряжение около 3 В и ток ~ 15 мА.

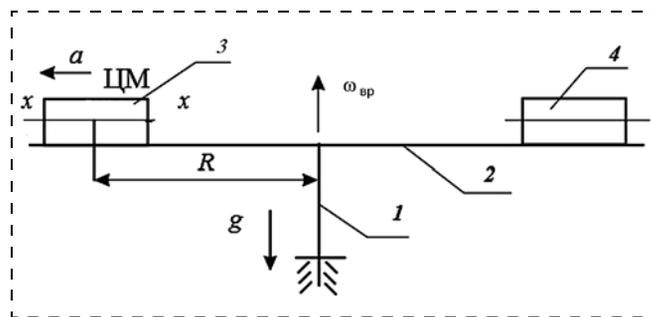


Рис. 3. Упрощенная схема расположения испытываемых образцов микромеханических ПЛУ на центрифуге: 1 — ось вращения центрифуги; 2 — поворотный стол; 3, 4 — испытываемые образцы [10]

Исследование динамических параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ проводили на вибростенде Bruel 4809 с усилителем Power Amp 2718 (ФРГ).

Для формирования необходимого вибрационного воздействия на испытываемый образец ПЛУ оператору необходимо установить параметры вибрации, программно задаваемые с помощью компьютера. Далее сигнал попадает на управляющую систему, которая генерирует электронный сигнал, инициирующий заданное колебательное движение головной части вибростенда [6, 8]. Если сигнал, полученный с контрольного акселерометра, расположенного на головной части вибростенда, показывает, что выход вибростенда отличается от желаемого, то выполняется подстройка сигнала управляющей системой таким образом, чтобы выход вибростенда приближался к профилю испытания.

Выводы

1. Таким образом, МНК позволяет определить такие параметры ПЛУ, как смещение нулевого сигнала (K_0) и масштабный коэффициент (K_1).

Таблица 2

Результаты измерений основных параметров акселерометров

Контролируемый параметр	Диапазон измеряемых ускорений		
	1,2g	5g	10g
Масштабный коэффициент, В/г	1,971	0,504	0,260
Нелинейность статической характеристики, %	0,067	0,076	0,108
Смещение нуля, г	$1,728 \cdot 10^{-3}$	$-7,649 \cdot 10^{-3}$	$57,3 \cdot 10^{-3}$
Частотный диапазон преобразования, Гц	160	147	140
Разрешающая способность, % от диапазона		0,3	
Спектральная плотность мощности шума, г/√Гц	$1,319 \cdot 10^{-5}$	$3,534 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
Время готовности, с	0,132	0,110	0,0948
Нестабильность масштабного коэффициента в запуске в нормальных условиях, %	0,110	0,1	0,12

2. Случайные ошибки параметров разрабатываемых МЭМ ПЛУ могут быть определены с помощью вариации Алана, что позволяет существенно повысить точность измерений до $\pm 0,01$.

3. В результате исследований с помощью испытательного оборудования были определены основные параметры акселерометров (табл. 2). Для изготовленных пилотных образцов диапазон ускорений составил $\pm 1,2 \dots \pm 10$ g, частотный диапазон 140...160 Гц.

Список литературы

1. **Бойко А. Н., Заводян А. Р., Симонов Б. М.** Моделирование элементов конструкции и изготовление // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2009. № 8. С. 100—103.
2. **Панов А. П.** Математические основы теории инерциальной ориентации. Киев: Наукова думка, 1995. 280 с.

3. **Мокров Е. А.** Краткий анализ методов испытаний инерциальных МЭМС-датчиков // Датчики и системы. 1995. № 10. С. 18—20.
4. **Синельников А. Е.** Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов, 1979. 175 с.
5. **Pavelescu I., Georgescu I., Guran D. E., Cobianu C. P.** Патент США на изобретение US 7784344. Integrated MEMS 3D multi-sensor; Honeywell International Inc. (US). Оpubл. 31.08.2010. 14 с.
6. **Мальшев Р. А.** Краткий анализ методов испытаний инерциальных МЭМС-датчиков // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 64—66.
7. **Sun Y., Kim K.** Патент США на изобретение US 8317245. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors / Оpubл. 27.11.2012. 7 с.
8. **Байрак В. В., Шарков М. В.** Стенд для испытаний изделий на совместное воздействие вибрационных и линейных ускорений. Патент. G01M7/02 Оpubл. 10.08.2010.
9. **Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R.** A New Perspective on Magnetic Field Sensing // Sensor. Expo proceedings. 1998. P. 195—213.
10. **Катомин Н. Н.** Испытания гироскопов и акселерометров: Учеб. пособие. М.: Изд. МАТИ, 1993. 94 с.

Research and Development of the Methods for Estimation of the Basic Parameters of the Micromechanical Transducers of Linear Acceleration

S. P. Timoshenkov¹, spt@miee.ru, **V. V. Kalugin**¹, victor118@mail.ru,
N. M. Parfenov², sedennik@mail.ru, **S. A. Antchutin**², **E. S. Kochurina**¹, **D. W. Mukimov**¹, **Jo Had Aung**¹
¹ MIET (National Research University), Moscow, 124498, Russian Federation
² MAI (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Received on December 16, 2015

The article describes the methods for evaluation of the basic parameters using the least squares (zero offset, slope of the output characteristics (scale factor), and so on) of the micromechanical transducers of linear acceleration (PLD). It also contains studies of the static and random errors of the micromechanical transducers of linear acceleration (accelerometers) and random errors of the measurement parameters using the least squares method, and Alan variations. Due to minimization of the experimental and theoretical values of the measured parameters and the least squares method it became possible to significantly reduce the measurement error. The accuracy of the measured values of the accelerometer using Alan variations was significantly improved due to an increase of the number of partitions of points in the group. So, in the split points in group 51 the accuracy was equal to 10 % and in group 201 to 5 %. The authors considered two ways for estimation of the parameters of a linear acceleration sensor: a static one, using centrifuges, and a dynamic one with testing on a shaker. As is known, a linear acceleration can occur due to the rectilinear, curvilinear and rotational movements. Since in this case the subject of interest is the linear acceleration, the play will be performed using the rotational motion of the centrifuge. The rotational motion and the linear motion depend on the distance of a product to the center of rotation of the table and the speed. The measurement result will depend on the values of the device parameters and characteristics of the test modes of a centrifuge. Because the effects of vibration of a product may cause mechanical defects or deterioration of the values of the parameters, of great importance is vibration testing on a vibration table. The main requirement to the test bench is a reproduction of vibration in a predetermined frequency range and mode for a set time and with a given accuracy.

Keywords: transducers of linear acceleration, static and random errors, shaker, centrifuge

For citation:

Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Parfenov N. M., Antchutin S. A., Kochurina E. S., Mukimov D. W., Jo Had Aung. Research and Development of the Methods for Estimation of the Main Parameters of the Micromechanical Transducers of Linear Acceleration, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 422—425.

DOI: 10.17587/mau.16.422-425

References

1. **Boiko A. N., Zavydyan A. R., Simonov B. M.** Modelirovanie elementov konstruktssii i izgotovlenie (Simulation of structural elements and manufacturing), *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes*, 2009, no. 8, pp. 100—103 (in Russian).

2. **Panov A. P.** *Matematicheskie osnovy teorii inertsiial'noi orientatsii* (Mathematical foundations of the theory of inertial orientation), Kiev, Naukova dumka, 1995, 280 p. (in Russian).
3. **Mokrov E. A.** *Kratkii analiz metodov ispytaniy inertsiial'nykh MEMS-datchikov* (Short analysis of test methods inertial MEMS sensors), *Datchiki i sistemy*, 1995, no. 10, pp. 18—20 (in Russian).
4. **Sinel'nikov A. E.** *Nizkochastotnye lineinye akselerometry. Metody i sredstva poverki i graduirovki* (Low-frequency linear accelerometers. Methods and tools for testing and calibration), Moscow, *Izdatel'stvo standartov*, 1979, 175 p. (in Russian).
5. **Pavelescu I., Georgescu I., Guran D. E., Cobianu C. P.** Патент SShA na izobretenie US 7784344. Integrated MEMS 3D multi-sensor; Honeywell International Inc. (US). Opubl. 31.08.2010. 14 p.

6. **Malyshev R. A.** *Kratkii analiz metodov ispytaniy inertial'nykh MEMS-datchikov* (Short analysis of test methods inertial MEMS sensors), *Datchiki i Sistemy*, 2011, no. 8, pp. 64–66 (in Russian).

7. **Sun Y., Kim K.** Patent SShA na izobretenie US 8317245. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors. Opubl. 27.11.2012. 7 p.

8. **Bairak V. V., Sharkov M. V.** *Stend dlya ispytaniy izdelii na sovestnoe vozdeistvie vibratsionnykh i lineinykh uskoreniy. Patent* (Stand for testing of products on conscientious impact vibration and linear accelerations. Patent) G01M7/02 Opublik. 10.08.2010 (in Russian).

9. **Caruso M. J., Bratland T., Smith C. H., Schneider R.** A New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensor. Expo proceedings*, 1998, pp. 195–213.

10. **Katomin N. N.** *Ispytaniya giroskopov i akselerometrov* (Tests of gyroscopes and accelerometers), Moscow, Published in MATI, 1993, 94 p. (in Russian).

Corresponding author:

Parfenov Nikolay M., Ph. D., Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: sedennik@mail.ru

УДК 629.13(075.8)

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., зав. сектором управления и навигации, devyatis@iacp.dvo.ru,

А. К. Стоценко, аспирант, stotsenko@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером

Предложены и исследованы теоретико-механические модели управляемого продольного движения пары (звена) роботизированных транспортных единиц, движущихся с заданной абсолютной скоростью и сохраняющих заданное расстояние между собой. Рассмотрены способы сохранения требуемого режима совместного движения при управлении со стороны каждой из транспортных единиц пары. Выявлена асимметрия этих возможностей. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: движение, скорость, расстояние, транспортный поток, транспортная единица, управление, обратная связь, модель

Введение

Одной из распространенных причин дорожно-транспортных происшествий является неспособность транспортного средства, движущегося в транспортном потоке, своевременно учесть изменения скорости и режима работы двигатель-тормозной системы впереди идущего участника движения. При этом ответственность за отсутствие столкновений возлагается на позади идущего [1]. По сути (де-факто), уже изложенного достаточно для актуализации исследований по управлению продольным движением с конечной целью создания математической, информационной и технической платформ, обеспечивающих решение проблемы активной безопасности движения на сухопутных транспортных магистралях. Вместе с тем, для полноты представления проблемы следует указать еще на один аспект актуальности предлагаемого исследования, который связан уже с целевой организацией группового (коллективного) движения, когда речь идет о системах экологического мониторинга и оценки параметров физических полей естественного и искусственного происхождения.

Настоящая работа посвящена теоретико-механическим моделям управляемого продольного движения двух транспортных единиц (ТЕ) — пары (звена) ТЕ — как простейшей системы коллективного (группового) поведения (движения), понимание которого существенно необходимо для последующего аналитического конструирования и исследования более сложных составных систем.

Главным образом, работа ориентирована на создание и исследование автоматических (роботизированных) систем коллективного движения (поведения); вместе с тем, в моделях управления движением выделен сегмент, который при необходимости (хотя бы по соображениям полноты методологии) можно интерпретировать как режим "ручного" (человеком-пилотом) управления, что позволяет далее, заполняя пространство между понятиями "ручной" и "автоматический", обращаться к образам полуполуавтоматического и корректируемого движений.

Модели управления и их исследование

Начнем с модели управляемого продольного движения базового системообразующего элемента транспортного потока — отдельно взятой ТЕ, представив ее в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= V, R(0) = R_0; \\ \dot{V} &= F - S - g_v, V(0) = V_0, S = A + Q; \\ \dot{F} &= -\mu(F - \varphi(V_d) + \gamma(V - V_d) + T), F(0) = F_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где R — расстояние, пройденное ТЕ; V — линейная скорость движения ТЕ, $V \geq 0$; F, S — удельные силы (далее — силы), F — сила, создаваемая двигатель-тормозной системой ТЕ, и S — сила сопротивления движению; $A = 0,5kV^2$ — сила аэродинамического