УДК 625.08
2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы



***И.П. Попов*[1], *В.А. Раков*[2]**
[1]*Курганский государственный университет,*
[2]*Вологодский государственный университет*

МЕХАНИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ МАШИНЫ

В работе приводится математическое описание механического стабилизатора частоты вращения. Рассматриваются преимущества и недостатки механического стабилизатора. Приводятся физические зависимости, описывающие его работу. Установлено, что расстояние от груза до оси вращения, а также линейная скорость груза являются функциями от момента импульса. Если момент импульса увеличится, то радиус и линейная скорость тоже изменятся в такой же мере. При этом угловая скорость останется такой же, какой была при предыдущем значении момента импульса.

Частота вращения, стабилизированный ротатор, груз, линейная скорость, момент импульса.

Актуальность разработки и применения механических стабилизаторов (регуляторов) частоты вращения обусловлена необходимостью обеспечения надежной, автономной и безопасной работы машин в условиях переменной нагрузки и нестабильных внешних воздействий. Несмотря на активное развитие электроники и микропроцессорных систем управления, чисто механические стабилизаторы имеют актуальность применения в транспортных и технологических машинах. Например, при монтаже конструкций мощным краном груз иногда начинает вращаться или «гулять» из-за ветра, рывков троса. Механические стабилизаторы (центробежные, инерционные, фрикционные) используют кинетическую энергию самого вращающегося вала для прямого воздействия на регулирующий орган. Механические конструкции могут эксплуатироваться при сильной вибрации, запыленности, высокой влажности и во взрывоопасных зонах, где электронные компоненты требуют дорогостоящей защиты или неприменимы [1, 2].

Простая конструкция снижает затраты на производство, обслуживание и ремонт. Не требует узкоспециализированного диагностического оборудования и квалификации инженера-электронщика при обслуживании в полевых условиях. Регуляторы частоты вращения валов отбора мощности (ВОМ) тракторов и спецтехники, вариаторные трансмиссии, центробежные муфты.

Механические регуляторы частоты вращения применяются также в бензиновых и дизельных электрогенераторах.

Свойства механического стабилизатора частоты вращения зависят от его конструкции, которая определяется на этапе проектирования по заданным рабочим характеристикам. Наиболее важным критерием работы является частота резонансных колебаний, исследования по которым ранее приводились в научных работах [3, 4]. В работе приводятся зависимости и алгоритмы, позволяющие произвести расчет регулятора.

Конструкция стабилизаторов частоты вращения описана в патентах [5–7].

В [8–12] представлены основы теории стабилизированного ротатора. В частности, установлено, что его собственная частота *вращения* равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \qquad (1)$$

и замечательным образом совпадает с собственной частотой *колебаний* маятника с идентичными параметрами [7–10].

Схема частоты вращения стабилизированного ротатора приведена на рисунке.

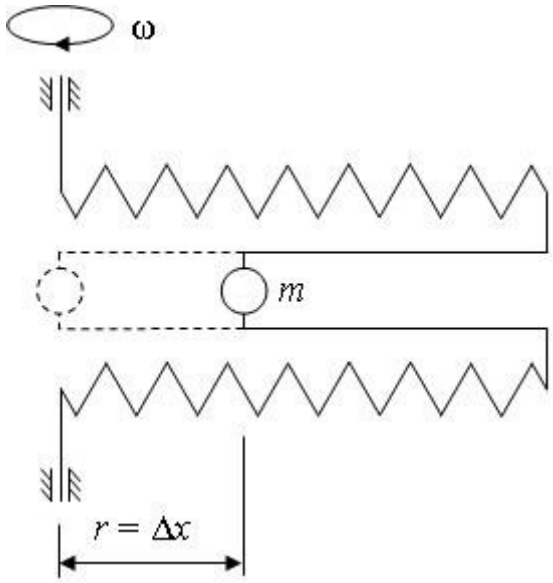


Рис. Кинематическая схема механического стабилизатора

Методы исследования

В основе методики расчета лежит первая (максвелловская) система механо-электрических аналогий, которая имеет вид:

- $V \Rightarrow I$ (скорость ⇒ ток),
- $F \Rightarrow U$ (сила ⇒ напряжение),
- $m \Rightarrow L$ (масса ⇒ индуктивность),

– $k \Rightarrow 1/C$ (коэффициент упругости $\Rightarrow$ величина обратная емкости),

– $r \Rightarrow R$ (коэффициент вязкого сопротивления $\Rightarrow$ сопротивление).

Американский физик Вебстер дополнил эти аналогии:

– $\omega m \Rightarrow \omega L$ (*инертный реактанс* $\Rightarrow$ индуктивное сопротивление),

– $k/\omega \Rightarrow 1/(\omega C)$ (*упругий реактанс* $\Rightarrow$ емкостное сопротивление).

Представляет интерес циклотронное движение электрического заряда, которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{qB}{m} r = \omega r \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{qB}{m}.$$

Здесь q – величина электрического заряда, v – тангенциальная скорость заряда, B – магнитная индукция, m – масса заряженной частицы, r – радиус циклотронного движения, ω – частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Это обстоятельство далее обобщается на стабилизированный механический ротатор.

Стабилизация частоты вращения

При выполнении технологически простого условия равенства деформации пружин Δx расстоянию r от центра масс груза до оси вала

$$r = \Delta x$$

баланс сил приобретает вид:

$$F = \frac{mv^2}{r} = k\Delta x = kr.$$

Или

$$\frac{mv^2}{r} = kr.$$

При этом

$$v^2 = \frac{k}{m} r^2 = \omega^2 r^2.$$

Из этой формулы непосредственно следует выражение (1).

Момент импульса стабилизированного ротатора равен

$$L = mvr.$$

Отсюда

$$r = \frac{L}{mv}. \qquad (2)$$

При этом

$$v = \omega r. \qquad (3)$$

Поэтому (2) приобретает вид:

$$r = \frac{L}{m\omega r}.$$

Отсюда

$$r^2 = \frac{L}{m\omega}.$$

С учетом (1) последнюю формулу можно записать в следующей форме:

$$r^2 = \frac{L}{m}\sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{L}{\sqrt{mk}}.$$

Отсюда

$$r = L^{1/2}(mk)^{-1/4}.$$

$(mk)^{-1/4}$ – величина неизменяющаяся. Она далее заменяется постоянным коэффициентом

$$C_1 = (mk)^{-1/4}.$$

Таким образом,

$$r = C_1 L^{1/2}. \qquad (4)$$

Другими словами, *расстояние от груза до оси вращения является функцией от момента импульса*.

Из (2) следует

$$v = \frac{L}{mr}. \qquad (5)$$

С учетом (3)

$$r = \frac{v}{\omega}.$$

Подстановка последнего выражения в (5) дает

$$v = \frac{L}{m}\frac{\omega}{v}.$$

Отсюда

$$v^2 = \frac{L}{m}\omega.$$

С учетом (1) последняя формула приобретает вид:

$$v^2 = \frac{L}{m}\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Отсюда

$$v = L^{1/2}k^{1/4}m^{-3/4}.$$

$k^{1/4}m^{-3/4}$ – величина неизменяющаяся. Она далее заменяется постоянным коэффициентом

$$C_2 = k^{1/4}m^{-3/4}.$$

Таким образом,

$$v = C_2 L^{1/2}. \qquad (6)$$

Другими словами, *линейная скорость груза является функцией от момента импульса*.

Пусть при $L = L_0$ радиус в соответствии с (4) равен

$$r = C_1 L_0^{1/2} = r_0,$$

а линейная скорость груза в соответствии с (6) равна

$$v = C_2 L_0^{1/2} = v_0.$$

Если момент импульса изменится и станет равным

$$L = aL_0,$$

то радиус тоже изменится и станет равным

$$r = C_1 (aL_0)^{1/2} = a^{1/2} r_0,$$

т.е. увеличится в $a^{1/2}$ раз.

Линейная скорость тоже изменится и станет равной

$$v = C_2 (aL_0)^{1/2} = a^{1/2} v_0,$$

т.е. тоже увеличится в $a^{1/2}$ раз.

При этом угловая скорость

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{a^{1/2}v_0}{a^{1/2}r_0} = \frac{v_0}{r_0} = \omega_0,$$

т.е. останется такой же, какой была при предыдущем значении момента импульса $L = L_0$.

Заключение

Рассмотрен механизм обеспечения постоянства частоты вращения стабилизированного ротатора.

Научная новизна состоит в том, что предложенный принцип стабилизации частоты механического ротатора математически изоморфен механизму стабилизации частоты циклотронного движения электрического заряда.

Показано, что угловая скорость ротатора при изменении момента импульса не меняется.

Это обусловлено тем, что при изменении момента импульса в одинаковой мере изменяются радиус ротатора и линейная скорость груза.

Ключевым условием обеспечения стабилизации вращения является равенство деформации пружин расстоянию от центра масс груза до оси вала.

Теоретическая значимость заключается в том, что разработан принцип стабилизации механической частоты вращения, существенно более эффективный, чем существующие.

Практическая значимость состоит в том, что для стабилизации механической частоты отпадает необходимость использования традиционных дорогостоящих следящих систем с обратными связями.

Литература

1. Петухов, С. Роботизированные технологические комплексы механической обработки. Учебник для вузов / С. Петухов, В. Аббясов. – Москва : Юрайт, 2026. – 56 с.

2. Карташевич, А. Н. Тракторы и автомобили. Конструкция тракторов и автомобилей. Основы теории и расчета тракторных и автомобильных двигателей : учебно-методическое пособие / А. Н. Карташевич, А. В. Гордеенко, А. А. Рудашко. – 2026.

3. Попов, И. П. Исследование вариантов и особенностей околорезонансных явлений в механических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 1(11). – С. 12–18.

4. Попов И. П. Механические реактансы при гармонических колебаниях исполнительных органов машин и механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 4 (14). – С. 65–67.

5. Патент 2840779 RU, МПК6 G09B 23/06. Механизм со стабилизированной циклической частотой : № 2022111657 ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 28.05.2025, бюл. № 16 / И. П. Попов, М. В. Давыдова (Россия).

6. Патент 2795752 RU, МПК6 G09B 23/06. Механическая модель циклотронного движения – стабилизированный ротатор : № 2022111659 ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 11.05.2023, бюл. № 14 / И. П. Попов, М. В. Давыдова (Россия).

7. Патент 2796041 RU, МПК6 G05D 13/10. Центробежный стабилизатор вращения : № 2022111651 ; заявл. 27.04.2022 ; опубл. 16.05.2023, бюл. № 14 / И. П. Попов, М. В. Давыдова (Россия).

8. Попов, И. П. Наложение вращений в механизмах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 4 (10). – С. 19–23.

9. Попов, И. П. Синтез механизма с фиксированной частотой вращения / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 3 (17). – С. 68–70.

10. Попов, И. П. Кинематика и динамика стабилизированного ротатора / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2022. – № 4(18). – С. 64–67.

11. Попов, И. П. Исследование резонансов в технических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2(4). – С. 15–18.

12. Попов, И. П. Маятник с искусственной массой / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2023. – № 2(20). – С. 55–57.

I.P. Popov[1], V.A. Rakov[2]

[1]Kurgan State University,

[2]Vologda State University

MECHANICAL ROTATIONAL SPEED STABILIZER FOR MACHINERY

This paper presents a mathematical description of a mechanical rotational speed stabilizer. The advantages and disadvantages of the mechanical stabilizer are discussed, and the physical relationships governing its operation are outlined. It is established that the distance from the weight to the axis of rotation and the linear velocity of the weight are functions of the angular momentum. If the angular momentum increases, the radius and linear velocity change to the same extent; however, the angular velocity remains the same as it was at the previous value of angular momentum.

Rotational speed, stabilized rotator, weight, linear velocity, angular momentum.