

САМОНЕЙТРАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРТНЫХ РЕАКТАНСОВ ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКИ В РЕШЕТНЫХ СТАНАХ

Попов Игорь Павлович, аспирант кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»

Чумаков Владимир Геннадьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Тракторы и сельскохозяйственные машины»

ФГБОУ ВПО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева»

641300, Курганская обл, Кетовский р-н, с. Лесниково
т. (3522)429-458, E-mail: popov_ip@kurganobl.ru

Чикун Анатолий Васильевич, генеральный директор
ООО «Курганский завод нестандартного оборудования»
640027, г. Курган, пр. Машиностроителей, 36

Ключевые слова: решетный стан, механический инертный реактанс, привод, колебания, биения, момент, гармоника.

Предложена схема решетного стана с двумя решетками, смещенными друг относительно друга на четверть периода колебаний. Установлена возможность возникновения свободных гармонических колебаний решет. Показано, что в предложенной системе происходит взаимный обмен кинетической энергией между решетками, что позволяет существенно разгрузить привод и снизить нагрузку на питающую сеть.

Введение

Динамика решет зерноочистительных машин является характерным примером внешних периодических воздействий привода на массивные объекты. Реакция решет как инертных тел при возвратно-поступательных колебаниях проявляется в их силовом воздействии на привод решетных станов. Это воздействие обусловлено инерцией решет. При сообщении решеткам колебательных движений момент на валу привода является знакопеременным. Применение схемы движения двух решетных станов в противоположных направлениях снимает динамическую нагрузку на корпус зерноочистительной машины, но не решает проблему нейтрализации переменной нагрузки привода решетного стана – момент на валу привода остается знакопеременным. Переменная нагрузка передается питающей сети, возникают значительные потоки реактивной мощности, сопровождающиеся существенными потерями в проводах и обмотках электрических машин при циркуля-

ции этих потоков в сети.

Мерой сопротивления инертного тела, оказываемого им источнику колебаний (приводу), является механический инертный реактанс. Понятие механических реактансов заимствованы из электротехники А.Г. Вебстером (Webster, 1919 г.).

Пусть к инертному телу приложена гармоническая сила $f = F_m \cos \omega t$, где F_m – амплитуда силы, Н; ω – циклическая частота колебаний, рад/с; t – время, с. В соответствии со вторым законом Ньютона в скалярной форме

$$F_m \cos \omega t = m \frac{dv}{dt},$$

$$\int_0^v dv = \frac{F_m}{m} \int_0^t \cos \omega t dt,$$

$$v = \frac{F_m}{\omega m} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

$$V_m = \frac{F_m}{\omega m} = \frac{F_m}{X_m},$$

где m – масса, кг; v – скорость, м/с; V_m – амплитуда скорости, X_m – механический инертный реактанс, кгхрад/с.

Механический инертный реактанс: $X_m = \omega m$. В комплексной форме $\dot{X}_m = i\omega m$.

$$\dot{V} = -i \frac{\dot{F}}{\omega m} = \frac{\dot{F}}{i\omega m} = \frac{\dot{F}}{\dot{X}_m}, \quad (1)$$

Выражение (1) является аналогом закона Ома для механической системы. Здесь V – аналог электрического тока, F – аналог электродвижущей силы, а X_m – аналог индуктивного реактанса.

Наиболее эффективным способом нейтрализации механического инертного реактанса является включение в кинематическую схему элемента, обладающего механическим упругим реактансом, равным по величине инертному и противоположным ему по знаку. В идеализированном варианте такая схема представляет собой пружинный маятник, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой внешнего воздействия (режим резонанса). Это обусловлено тем, что с такой частотой в маятнике могут происходить свободные гармонические колебания. При этом массивный элемент обменивается энергией с пружиной, а не с источником внешнего воздействия, что является основой механизма нейтрализации его реактанса.

Однако системы, включающие элементы, обладающие инертным и упругим реактансами, имеют фиксированную собственную частоту колебаний, что делает указанный метод компенсации реактансов неприемлемым на практике, поскольку масса решета вместе с ворохом зерна может существенно меняться в процессе работы, что при фиксированной упругости пружины приведет к разбалансировке колебательной системы. Этим определяется актуальность настоящего исследования, целью которого является установление возможности воз-

никновения свободных гармонических колебаний в механической системе с однородными (инертными) элементами, т.е. обладающей однотипными реактансами [1 - 3], во всем рабочем спектре частот, что обуславливается взаимной компенсацией реактансов. В такой системе инертные элементы (решета) должны обмениваться кинетической энергией друг с другом, а не с приводом.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований является решетный стан зерноочистительной машины.

Методами исследований в рамках настоящей работы являются методы теоретической механики, математического моделирования и анализа.

Результаты исследований

Синтез системы. Синтез системы осуществляется на основе двух исходных условий.

Первое исходное условие. Система содержит два инертных элемента – два груза (решета). Элементы совершают гармонические колебания:

$$x_1 = A \sin(\zeta + \zeta_1), \quad x_2 = A \sin(\zeta + \zeta_2),$$

где x_1, x_2 – текущие координаты 1-го и 2-го решета соответственно, м; A – амплитуда колебаний, м; ζ – фаза, рад; ζ_1, ζ_2 – начальные фазы, рад.

Второе исходное условие. Энергия системы при колебаниях не меняется

$$T_1 + T_2 = \text{const.}$$

Здесь T_1, T_2 – кинетическая энергия 1-го и 2-го решета соответственно, Дж.

Одновременный учет обоих исходных условий дает представление о характере связи между инертными элементами. Действительно,

$$\frac{m}{2} \left(\frac{dx_1}{dt} \right)^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 = \text{const},$$

$$\cos^2(\zeta_1 + \zeta_1) + \cos^2(\zeta_1 + \zeta_2) = \text{const.}$$

Последнее справедливо при условии:

$$\zeta_1 - \zeta_2 = \pm \pi/2.$$

Полученное соотношение позволяет определить связующее звено между инертными элементами (решетами).

Такое звено может быть выполнено по схеме, представленной на рисунке.

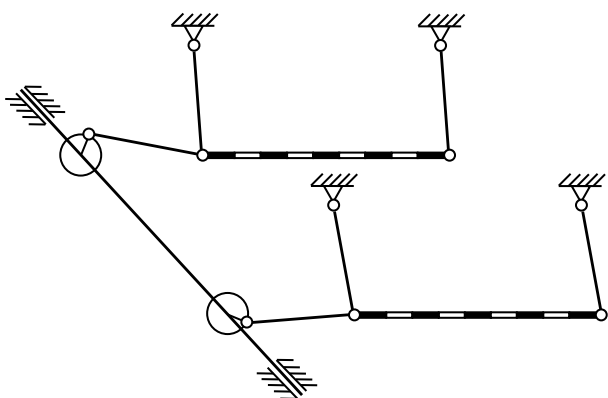


Рис. - Кинематическая схема решетчатого стана

Кривошипно-шатунный механизм, в отличие от кривошипно-кулисного или от механизма типа эллипсографа [4, 5], не обеспечивает гармонический характер колебаний в чистом виде, однако при сравнительно большой длине шатуна и малой амплитуде колебаний первая гармоника является несоизмеримо преобладающей. В соответствии с этим в дальнейших рассуждениях не учитываются высшие гармоники.

Анализ системы. Внешние усилия к грузам не приложены. Массы кривошипов, подвесов и трение не учитываются. Координаты грузов, соответственно,

$$\begin{aligned} x_1 &= l \cos \varphi, \\ x_2 &= l \cos(\pi/2 - \varphi), \end{aligned} \quad (2)$$

где l – амплитуда колебаний, м. В качестве обобщенной координаты удобно использовать φ – угол поворота одного из эксцентриков, рад. Система имеет одну степень свободы и уравнение Лагранжа второго рода для нее записывается в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q$$

Обобщенная сила $Q = 0$ Н, поскольку активные силы отсутствуют. Кинетическая энергия

$$T = \frac{m}{2} \left(\frac{dx_1}{dt} \right)^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 =$$

$$= \frac{ml^2}{2} \sin^2 \varphi \dot{\varphi}^2 + \frac{ml^2}{2} \cos^2 \varphi \dot{\varphi}^2 = \frac{ml^2}{2} \dot{\varphi}^2. \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = ml^2 \dot{\varphi},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = ml^2 \ddot{\varphi} = 0.$$

Решение последнего уравнения:

$$d\varphi/dt = C_1, \quad (4)$$

$$\varphi = C_1 t + C_2.$$

Пусть начальные условия:

$$\varphi(0) = \varphi_0,$$

$$\frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0.$$

Тогда

$$C_2 = \varphi_0,$$

$$C_1 = \omega_0. \quad (5)$$

При этом (2) принимает вид:

$$x_1 = l \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad x_2 = l \cos(\pi/2 - \omega_0 t - \varphi_0).$$

Таким образом, грузы массой m совершают свободные колебания со значительным преобладанием первой гармоники.

В рассмотренной колебательной системе происходит взаимный обмен кинетической энергией между инертными элементами. При $\varphi = 0$ кинетическая энергия первого груза равна нулю, а второго – максимальна. После этого первый груз начинает ускоряться за счет энергии второго груза, который приобретает отрицательное ускорение.

В соответствии с (3), (4) и (5) суммарная энергия решетчатого стана

$$T = \frac{ml^2}{2} \dot{\varphi}^2 = \frac{ml^2 \omega_0^2}{2}$$

и постоянна во времени. Частота колебаний решет тоже не меняется и определяется начальными условиями.

Из (1) следует: $\dot{X}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}}$

Применительно к рассматриваемому случаю $\dot{V} \neq 0$, $\dot{F} = 0$, следовательно $\dot{X}_m = 0$.

Таким образом, предложенная схема решетного стана с двумя решетками, смещенными друг относительно друга на четверть периода колебаний, позволяет взаимно нейтрализовать механические инертные реактансы первой гармоники для обоих решет. В соответствии с изложенным принципом может быть построена колебательная система с любым количеством инертных элементов (в данном случае – решет). Например, в трехэлементной схеме углы между эксцентриками должны составлять 120 градусов.

Выводы

Установлена возможность возникновения свободных гармонических колебаний в системах, состоящих только из инертных элементов, которая реализуется при обеспечении сдвига по фазе между колебаниями элементов.

В отличие от традиционных или смешанных [6 - 11] колебательных систем, в которых происходит преобразование энергии одного вида в энергию другого вида (кинетической в потенциальную или энергию электромагнитного поля), при энергообмене между однородными элементами представленной системы вид энергии не меняется. В рассмотренной системе происходит взаимный обмен кинетической энергией между инертными элементами. При этом суммарная энергия системы при колебаниях не изменяется.

Частота свободных колебаний системы с однородными элементами не зависит от параметров элементов и определяется исключительно начальными условиями, т.е. рассмотренная система может совершать свободные гармонические колебания с любой изначально заданной частотой без воз-

никновения резонанса.

При равенстве масс решет в зерноочистительных машинах, построенных по схеме, подобной рассмотренной, колебательные движения решет совершаются за счет энергии друг друга. Привод агрегата не подвергается биениям и служит лишь для восполнения потерь на трение. При этом суммарный момент на валу привода равен нулю и на его опоры периодические силовые воздействия не передаются.

Таким образом, схемы, подобные рассмотренной, разгружают привод, мощность которого может быть радикально уменьшена, нейтрализуют механические инертные реактансы, исключают биения и потери в питающей сети.

Библиографический список

1. Попов, И.П. Свободные гармонические колебания в электрических системах с однородными реактивными элементами / И.П. Попов // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 57–59.
2. Попов, И.П. Индуктивно-индуктивная колебательная система / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. – 2013. – Вып. 8. – № 2(29). – С. 78, 79.
3. Попов, И.П. Схема взаимной компенсации реактивной мощности фаз с симметричной нагрузкой / И.П. Попов, В.И. Чарыков, С.А. Соколов, Д.П. Попов // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 9-й Международной научно-технической конференции. – 2014. – Москва. ГНУ ВИЭСХ. – Ч. 1. Проблемы энергообеспечения и энергосбережения. – С. 148–151.
4. Попов, И.П. Колебательная система из трех пружин и кривошипно-кулисного механизма / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Вестник Курганской ГСХА. – 2013. – № 2 (6). – С. 65, 66.
5. Попов, И.П. О самонейтрализации реакции системы, состоящей из упругих элементов, на гармонические воздействия / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Зауральский научный вестник. – 2012. – № 2. С. –39–41.
6. Попов, И.П. Упруго-индуктивный ос-

циллятор / И.П. Попов // Российский научный журнал. – 2013. – № 1(32). – С. 269, 270.

7. Попов, И.П. Свободные гармонические колебания в системах с элементами различной физической природы / И.П. Попов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. – 2012. – Т. 18. – № 4. – С. 22–24.

8. Попов, И.П. Свободные гармонические колебания в упруго-емкостной системе / И.П. Попов // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки.

– 2011. – Вып. 4. – №2(21). – С. 87–89.

9. Попов, И.П. Инертно-индуктивный осциллятор / И.П. Попов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. – 2013. Вып. 8. – № 2(29). – С. 80, 81.

10. Попов, И.П. Упруго-индуктивные колебания в системах автоматики / И.П. Попов, Д.П. Попов, С.Ю. Кубарева // Вестник Курганской ГСХА. – 2013. – № 3 (7). – С. 57–59.

11. Попов, И.П. Инертно-емкостная колебательная система / И.П. Попов // Зауральский научный вестник. – 2013. – № 2(4). – С. 65, 66.