

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 534.014.3

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

ИНЕРТНЫЕ РЕАКТАНСЫ ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН

Попов И.П.

Курганский государственный университет, Курган, Россия

Аннотация. Показано, что производной работы или соответствующей ей механической энергии является тепловая мощность, которую в электротехнике называют активной. Эта мощность является пульсирующей, но знакопостоянной, поскольку тепловой поток при механических колебаниях необратим. Производная кинетической энергии по времени является знакопеременной, поэтому ее аналоги в электротехнике называют реактивными. Большинство приводов машин и механизмов являются электромеханическими, поэтому реактивная механическая мощность при колебаниях массивных заготовок, деталей, узлов и т.п. в соответствии с законом сохранения энергии трансформируется в реактивную электрическую мощность питающей сети, существенно ухудшая качество тока и вызывая заметные потери в проводах при ее циркуляции. В этой связи задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной. **Цель работы** заключается в установлении взаимосвязи между активной, реактивной и полной мощностями при механических колебаниях. Реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину. Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной. Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно так же, как в электротехнике). Инертные и упругие реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания. В силу специфики работы вибрационных машин инертные реактансы являются одними из ключевых их параметров.

Ключевые слова: инертный, упругий реактансы, привод, активная, реактивная, полная мощности.

Введение

Колебания инертного тела характеризуются, в частности, работой, совершаемой при преодолении сил трения, и кинетической энергией, запасемой в теле. Производной работы или соответствующей ей механической энергии является тепловая мощность, которую в электротехнике называют *активной*. Эта мощность является пульсирующей, но знакопостоянной, поскольку тепловой поток при механических колебаниях необратим. Производная кинетической энергии по времени является знакопеременной, поэтому ее аналоги в электротехнике называют реактивными.

Большинство приводов вибрационных машин и механизмов [1, 2] являются электромеханическими, поэтому реактивная механическая мощность при колебаниях массивных заготовок, деталей, узлов и т.п. в соответствии с законом сохранения энергии трансформируется в реактив-

ную электрическую мощность питающей сети, существенно ухудшая качество тока и вызывая заметные потери в проводах при ее циркуляции (до 10% реактивной мощности).

В этой связи задача корректного учета как активной, так и реактивной механических мощностей для целей энергосбережения, а также силовых конструкторских расчетов является актуальной.

Целью работы является теоретическое описание разновидностей мощности вибрационных машин на основе представления о механических реактансах.

Задача заключается в аналитическом представлении энергетического аспекта вибрационных явлений.

Актуальность исследования обусловлена негативным влиянием механических реактансов на качество тока питающей сети (появление гармоники с частотой механических колебаний, трансформация механической реактивной мощности в электрическую реактивную мощность и др.).

© Попов И.П., 2019

Инертный реактанс и инерционная мощность

Пусть к массивному телу приложена синусоидальная сила

$$f = F_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где F_m – амплитуда, Н; ω – частота, рад/с.

В соответствии с основной аксиомой механики

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

Здесь m – инертная масса, кг; v – мгновенная скорость, м/с.

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

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

Из этого следует, что амплитуда имеет вид

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

Здесь X_m – инертный реактанс, кг·рад/с.

Полученное выражение можно представить в комплексном виде.

$$\dot{V} = -i \frac{\dot{F}}{\omega m} = \frac{\dot{F}}{i \omega m} = \frac{\dot{F}}{X_m}. \quad (2)$$

Знак « \rightarrow » обусловлен тем, что фаза мгновенной скорости отстает от фазы силы на $\pi/2$.

Комплексные величины, соответствующие синусоиде, обозначаются точкой сверху. Прочие – подчеркиваются снизу.

В соответствии с (2) инертный реактанс равен

$$\underline{X}_m = i \omega m.$$

Он характеризует свойство массивного тела оказывать сопротивление приводу, понуждающему его совершать колебания. Вполне закономерно, что он определяется не только массой, но и частотой.

В механику реактансы введены А.Г. Вебстером (Webster) в начале XX века.

Дуально-инверсным аналогом формулы (2) является закон Ома для участка электрической цепи. При этом V соответствует току, F – ЭДС, X_m – индуктивному реактивному сопротивлению.

В соответствии с выражением (1) вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплекс-

ной плоскости, поэтому в соответствии с формулой (2) вектор скорости ориентирован вдоль мнимой оси (т.е. скорость – чисто мнимая).

Мгновенное значение реактивной (инерционной) мощности равно

$$q_i = fv.$$

Эта величина является мнимой, поскольку является произведением мнимой величины v на действительную f .

Реактивная (инерционная) мощность в комплексном виде

$$\dot{Q}_i = \dot{F} \dot{V}. \quad (3)$$

В электротехнике величина реактивной мощности отождествляется с ее амплитудой [3, 4]. Аналогично этому, учитывая (2), реактивная (инерционная) мощность равна

$$Q_i = \frac{F^2}{X_m} = V^2 X_m.$$

Механический резистанс и тепловая мощность

Пусть сила трения определяется формулой

$$f = rv,$$

где r – коэффициент пропорциональности, Н·с/м.

Отсюда скорость равна

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

Дуально-инверсным аналогом этой формулы является закон Ома для участка электрической цепи. При этом v соответствует току, f – ЭДС, r – активному сопротивлению (электрическому резистансу).

Поскольку вектор силы ориентирован вдоль вещественной оси комплексной плоскости (см. (1)) и механический резистанс r – вещественная величина, величина v является тоже вещественной.

Мгновенное значение активной (тепловой) мощности равно

$$p = fv.$$

Активная мощность тоже вещественная величина, поскольку является произведением вещественных величин.

Активная (тепловая) мощность в комплексном виде

$$\underline{P} = \underline{F} \underline{V}.$$

В электротехнике величина активной мощности отождествляется с ее средним за период значением. Это положение обобщается и на механическую активную (тепловую) мощность P .

Полная механическая мощность

В соответствии с (3) и (2) реактивная (инерционная) мощность представляет собой чисто мнимую величину

$$\dot{Q}_i = \dot{F}\dot{V} = -i \frac{(\dot{F})^2}{\omega m}.$$

Активная (тепловая) мощность при любом характере движения, например, развиваемая силой трения скольжения, является вещественной величиной.

В этой связи реактивная и активная мощности являются условно «ортогональными». Следовательно, полная механическая мощность определяется выражением

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2}. \quad (4)$$

Упругий реактанс и упругодеформационная мощность

Эта мощность обусловлена способностью упругого тела запастись и возвращать потенциальную энергию упругой деформации [5–8]. Реактивная (упругодеформационная) мощность является чисто мнимой величиной. Ее знак противоположен знаку реактивной (инерционной) мощности.

Нетрудно показать, что формула упругого реактанса имеет вид

$$\underline{X}_k = -i \frac{k}{\omega}.$$

Здесь k – коэффициент упругости, Н/м. \underline{X}_k соответствует емкостному реактивному сопротивлению в электротехнике.

Реактивная (упругодеформационная) мощность определяется выражением

$$Q_d = \frac{F^2}{X_k} = V^2 X_k.$$

Полная мощность также вычисляется по формуле (4).

Резонанс

В механической системе, состоящей из пружины и груза, сумма реактансов равна

$$\underline{X} = \underline{X}_m + \underline{X}_k = i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0}.$$

Если она равна нулю, возникает резонанс.

$$i\omega_0 m - i \frac{k}{\omega_0} = 0,$$

откуда непосредственно следует

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Заключение

Активная и реактивная механические мощности, являясь условно «ортогональными», не складываются. Для полной мощности справедлив аналог теоремы Пифагора (точно так же, как в электротехнике).

Инертный и упругий реактансы характеризуют свойства массивного и упругого тел оказывать сопротивление приводу, понуждающему их совершать колебания.

В силу специфики работы вибрационных машин инертные реактансы являются одними из ключевых их параметров.

Список литературы

1. Попов И.П., Кубарева С.Ю. Автобалансировка вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144>
2. Попов И.П. Реактивная и полная механические мощности вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59>
3. Wang, X., Sun, G., Wang, L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.). 2016. Vol. 31. No. 4. P. 717–721.
4. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. Mater. Mech. 2015. No. 10. P. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezhen Xue, Xiangdong Ding and Turab Lookman. Phase transformations in Titanium: Anisotropic deformation of ω phase. Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.500. P. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042/
6. Lux, R., Kletzin, U., Geinzt, V., Beyer, P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire // Wire Journal International. Vol. 47, iss. 7, July 2014. P. 78–83.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process // Petrochemical Equipment. 2015. Vol. 44. P. 58–63.

8. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного тех-

нического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>

Поступила 24.09.19

Принята в печать 21.10.19

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

INERT REACTANCE OF VIBRATING MACHINES

Igor P. Popov – Senior Lecturer,

Kurgan State University, Kurgan, Russia. E-mail: ip.popov@yandex.ru

Abstract. It is shown that the derivative of the work or its corresponding mechanical energy is thermal power, which is called active in electrical engineering. This power is pulsating, but of constant signs, since the heat flux during mechanical vibrations is irreversible. The time derivative of kinetic energy is alternating in sign; therefore, its equivalents in electrical engineering are called reactive. Most drives of machines and mechanisms are electromechanical; therefore, in accordance with the energy conservation law, during vibrations of massive workpieces, parts, assemblies and other units reactive mechanical power is transformed into reactive electric power of the supply network, substantially worsening the quality of current and causing noticeable losses in wires during its circulation. In this regard, the task of correct accounting of both active and reactive mechanical power for energy-saving purposes, as well as power design calculations is relevant. The objective of the paper is to establish the relationship between active, reactive and full power during mechanical vibrations. Reactive (inertial) power is a purely imaginary value. Active (thermal) power at any nature of movement, for example, developed by the sliding friction force, is a real value. Active and reactive mechanical powers, being conditionally “orthogonal”, do not add up. For full power, a law similar to the Pythagorean Theorem is valid (just like in electrical engineering). Inert and elastic reactance characterizes the properties of massive and elastic bodies to resist the drive, which forces them to oscillate. Due to the special features of the operation of vibrating machines, inert reactance is one of their key parameters.

Keywords: inert, elastic reactance, drive, active, reactive, full power.

References

1. Popov I.P., Kubareva S.Yu. Autobalanced vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2018, no. 3, pp. 140–144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-140-144> (In Russ.)
2. Popov I.P. Reactive and full mechanical power of vibration machines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2019, vol. 17, no. 2, pp. 55–59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-55-59> (In Russ.)
3. Wang X., Sun G., Wang L., Ma Q., Cui J. A new approach for preparing SiC particle-reinforced aluminum matrix composites by applying electromagnetic field. *J. Wuhan Univ. of Technology (Mater. Sci.)*. 2016, vol. 31, no. 4, pp. 717–721.
4. Propescu M., Vagra B. Microstructure of aluminum alloys solidified by rotating electric field. *Mater. Mech.* 2015, no. 10, pp. 44–48.
5. Hongxiang Zong, Dezhen Xue, Xiangdong Ding, Turab Lookman. Phase transformations in Titanium: Anisotropic deformation of ω phase. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014, vol.500, p. 112042. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112042/
6. Lux R., Kletzin U., Geinitz V., Beyer P. Changes in mechanical parameters of stored patented cold-drawn steel wire. *Wire Journal International*, vol. 47, no. 7, July 2014, pp. 78–83.
7. Yu Y.-Q. Analysis of the tube head upsetting forming process. *Petrochemical Equipment*, 2015, vol. 44, pp. 58–63.
8. Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139> (In Russ.)

Received 24/09/19

Accepted 21/10/19

Образец для цитирования

Попов И.П. Инертные реактансы вибрационных машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №4. С. 52–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>

For citation

Popov I.P. Inert Reactance of Vibrating Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 4, pp. 52–55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-4-52-55>