

УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ МАШИН

Е.Ю. Глушков

glushkovvey@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены причины увеличения динамических нагрузок и уменьшения долговечности силового привода. С точки зрения волновой теории показано возникновение резонанса как сложение бегущих и отраженных волн, образующихся в результате отражения бегущих волн от неоднородностей крутильной системы. Рассмотрены различные способы уменьшения динамических нагрузок в колебательной системе, а также произвольная многомассовая система с применением способа уменьшения динамических нагрузок путем подбора инерционно-жесткостных характеристик элементов привода, что позволяет свести возникновение резонанса к минимуму. Проанализирована зависимость напряжений от количества циклов, которые в свою очередь напрямую связаны с долговечностью.

Ключевые слова

Долговечность, крутильные колебания, динамические нагрузки, бегущая волна, волновое сопротивление

Поступила в редакцию 29.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Долговечность силовых приводов машин в значительной степени зависит от динамической нагруженности, которая определяется уровнем напряжений и числом циклов их действий. Определенный вклад в нагруженность деталей силовых приводов при передаче крутящих моментов вносят крутильные колебания. Для снижения нагруженности необходимо избавиться от этих колебаний или уменьшить их амплитуды. Особенно сложно это сделать, если в силовом приводе есть источник возмущений крутильных колебаний, например, двигатель внутреннего сгорания или исполнительный орган, в котором циклически изменяются силы и моменты. В случае возникновения резонанса крутильных колебаний амплитуды напряжений могут быть очень большими, что приведет к уменьшению долговечности отдельных деталей а, следовательно, всей машины. Чтобы не допустить снижения расчетной долговечности машины вследствие крутильных колебаний, необходимо устранить возникающие от колебаний динамические нагрузки или уменьшить их [1–4].

Возможны следующие способы уменьшения динамических нагрузок в колебательной системе:

- 1) поглощение возмущений в местах их возникновения, благодаря чему исключается распространение энергии колебаний по системе;
- 2) установка в определенных местах крутильной системы устройств, поглощающих энергию колебаний;
- 3) оптимальный выбор инерционно-жесткостных параметров системы, не позволяющих возникать резонансу с большими относительными амплитудами.

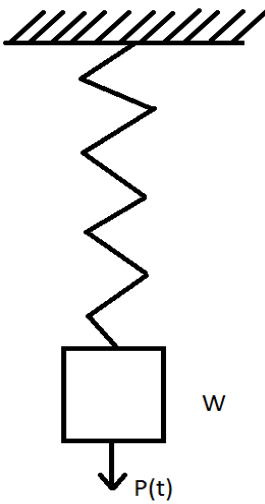


Рис. 1. Колебательная система:

W — подвешенный к пружине груз; $P(t)$ — действующая на груз вынуждающая сила

Первые два способа могут применяться в существующем приводе. В таких случаях можно при помощи дополнительных устройств предупредить возникновение больших амплитуд колебаний и снизить динамические нагрузки. Но это уже происходит на стадии испытаний и требует дополнительных материальных и временных затрат.

Последний способ позволяет уже на стадии проектирования подобрать такие инерционно-жесткостные характеристики элементов привода, которые уменьшают вероятность возникновения резонанса. В классической теории колебаний не объясняется физическая картина возникновения резонанса (образование очень больших амплитуд при определенных условиях).

Рассмотрим колебательную систему, состоящую из пружины с подвешенным к ней грузом весом W . На груз действует вынуждающая сила $P \sin \omega t$ (рис. 1).

Амплитуды вынужденных колебаний системы будут иметь вид [2]:

$$A = \frac{q}{p^2 - \omega^2},$$

где $q = \frac{Pg}{W}$; P — амплитуда вынуждающей силы; ω — частота вынужденных колебаний; p — частота собственных колебаний.

Из формулы видно, что резонанс возникает, когда частота вынужденных колебаний ω равна собственной частоте p . Однако, физической сути процесса в этих формулах нет.

В волновой теории колебаний понятие резонанса раскрыто более широко. Вынужденные колебания связаны с распространением по системе от источника возмущения бегущих волн, несущих энергию и импульс. В неоднородных системах бегущие волны отражаются от конца системы или любой ее неоднородности. Отраженные волны складываются с бегущими и, если полуволна укладывается в системе целое число раз, образуется стоячая волна: массы системы колеблются в фазе или противофазе, но с разными амплитудами. Возникает резонанс. Большие амплитуды возникают вследствие малого рассеяния энергии колебаний. Амплитуда не успевает уменьшиться, когда следующие волны приводят к ее увеличению.

В ограниченных однородных системах стоячая волна может возникнуть, если имеет место отражение бегущих волн от конца системы.

Однородной системе свойственны синусоидальные формы колебаний, например веревка, по которой пустили волну. В то же время, если на веревку повесить грузики некоторой массы и пустить волну, то после прибавления определенного грузика волна не будет распространяться. Такая система будет неоднородной, формы собственных колебаний которой образуют полный набор функций [3].

На рис. 2 изображена струна с разным количеством грузиков. Чем их больше, тем форма колебаний более схожа с синусоидальной. В этом случае систему можно рассматривать как квазиоднородную.

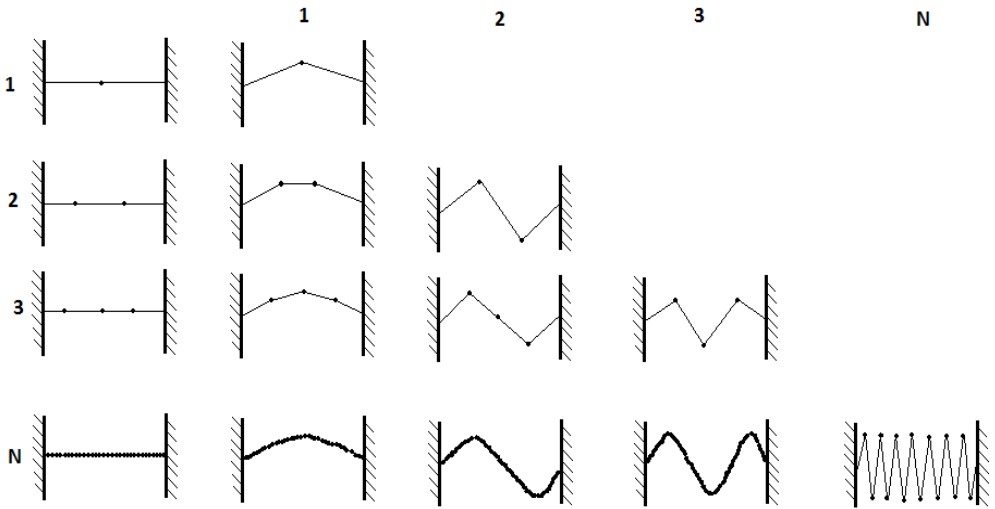


Рис. 2. Форма колебаний нагруженной струны:

1 — с одним грузом; 2 — с двумя грузами; 3 — с тремя грузами; N — с числом грузом равным N

Как уже отмечалось выше, бегущая волна переносит энергию. Например, если бросить камень в воду, то от места его вхождения в воду возникнут волны. И если на воде будет лежать палка, то она будет подниматься, таким образом, энергия бегущей волны будет переходить в потенциальную энергию палки.

Во время прохождения волны по системе, в случае если волна проходит через границу неоднородных участков происходит отражение, которое характеризуется коэффициентом отражения R :

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

где Z_1 и Z_2 — характеристические импедансы (волновые сопротивления) участков системы.

Коэффициент отражения принимает значения от -1 до 1 . При полном согласовании импедансов $Z_1 = Z_2$ отражение на границе не происходит, в системе только бегущая волна. Если $Z_2 \gg Z_1$, то происходит почти полное отражение бегущих волн. Суперпозиция падающей и отраженной волн в граничной точке дает нулевое значение смещения и скорости. Если $Z_2 \ll Z_1$, то бегущая волна отражается от свободного конца вала. В системе наблюдается стоячая волна с постоянным максимумом на конце. Если бесконечная система однородна, то отражения и стоячей волны (резонанса) не будет. На стадии проектирования можно составить однородную систему, которая будет иметь малую склонность к резонансу.

Для приведения системы к однородной, необходимо чтобы волновое сопротивление (импеданс) каждого участка было одинаковым. В крутильной системе импеданс $Z = \sqrt{cI}$, где I — момент инерции; c — жесткость (фазовая скорость бегущей волны $v = \sqrt{c/I}$).

При уравнивании импедансов система становится однородной для определенных длин бегущих волн, отражения которых происходит от конца. Эта проблема отражения решается, если поставить на конце системы гаситель, поглощающий бегущие волны.

При проектировании силовых приводов, используя метод выбора оптимальных инерционно-жесткостных параметров системы, следует изменять жесткостные параметры, так как моменты инерции элементов привода рассчитаны для работы в определенном режиме, при изменении которого необходимо пересчитывать параметры системы полностью. Изменение жесткостных параметров осуществляется за счет диаметров и длин валов или использования муфты с упругими элементами.

Рассмотрим систему, состоящую из 12 дисков, соединенных валами. В данном случае система неоднородная. Формы собственных колебаний первых трех частот показаны на графике (рис. 3, а). Каждый диск характеризуется динамическим моментом инерции.

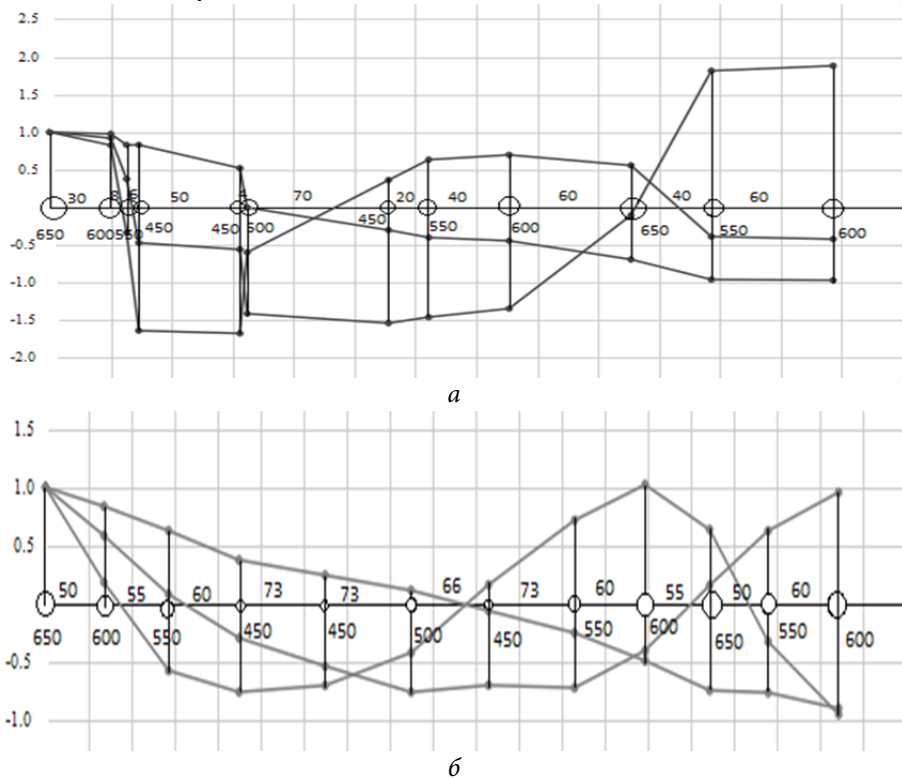


Рис. 3. Непреобразованная (а) и преобразованная (б) крутильные системы силового привода и формы собственных колебаний

При использовании метода оптимальных инерционно-жесткостных параметров приведем систему к однородной, уравнив импедансы участков. Расчет собственных частот был произведен в Mathcad матричным способом.

Преобразованная система имеет собственные формы колебаний (рис. 3, б). Как видно из рисунка, форма колебаний 1-й частоты стала близкой к синусоидальной. Таким образом, в данной системе не будет большой разницы относительных амплитуд. Соотношение амплитуд не превышает единицы. В непреобразованной системе (рис. 3, а), наоборот, имеет место большое отличие амплитуд инерционных масс, иногда в несколько раз, что приводит к большим динамическим нагрузкам (как известно, формы вынужденных колебаний соответствуют формам собственных колебаний [2]). Чем больше нагрузка на валы силового привода, тем меньше срок его службы, подтверждается кривой усталости, представленной на рис. 4. Таким образом, чем меньше напряжение, тем больше циклов система может полноценно работать.

При напряжении вала τ_1 система проработает N_1 циклов. Если напряжение вала τ_2 , он выдержит N_2 циклов. При $\tau_2 < \tau_1$ число циклов $N_2 > N_1$, то есть привод будет иметь больший моторесурс.

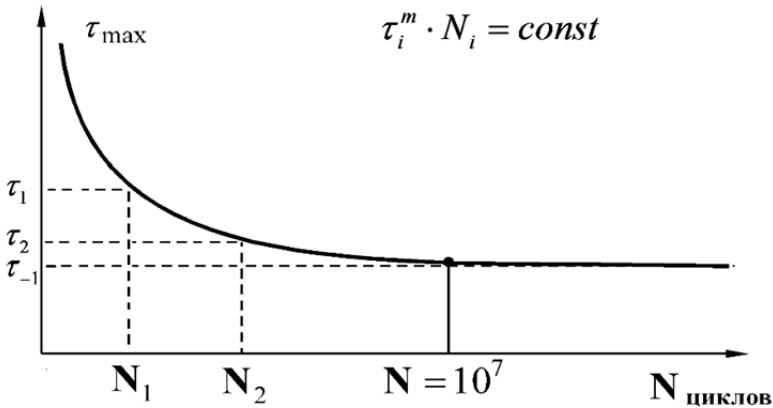


Рис. 4. Зависимость максимального напряжения вала от числа циклов до разрушения (кривая усталости)

Показано, что для повышения долговечности привода необходимо уменьшить нагруженность его крутильной системы. Если привести систему к квазиоднородной, то вероятность резонанса в ней уменьшится, следовательно, не будет больших амплитуд, то есть динамических нагрузок. Это, в свою очередь означает, что привод будет работать большее количество циклов.

Литература

[1] Зябликов В.М. Возможность повышения долговечности силовых приводов машин на стадии проектирования. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2010, № 3, с. 36–40.
 [2] Тимошенко С.П. *Колебания в инженерном деле*. Москва, Наука, 1967. 444 с.

[3] Крауфорд Ф. *Волны*. Москва, Наука, 1976. 528 с.

[4] Зябликов В.М., Смирнов В.Ф. Два подхода к анализу динамики механических систем и одно решение. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2012, № 9, с. 9–13.

Глушков Егор Юрьевич — магистрант кафедры «Основы конструирования машин», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — В.М. Зябликов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

INCREASING DURABILITY OF MACHINE ACTUATORS

E.Yu. Glushkov

glushkov@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study deals with the reasons why dynamic loads increase and actuator durability drops. We show that in terms of the wave theory resonance appears when the travelling and reflected waves combine, these waves forming as a result of the travelling waves reflecting from the irregularities of the torsional system. We consider various ways of reducing dynamic loads in an oscillating system, along with an arbitrary multi-mass system employing a dynamic load reduction method that consists of selecting the inertial and rigidity properties of the actuator elements, which makes it possible to minimise the probability of resonance. We investigated how the stresses depend on the number of cycles, which are in turn directly related to durability.

Keywords

Durability, torsional vibrations, dynamic loads, travelling wave, wave drag

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Zyablikov V.M. The long life of machine transmission can be increased already on design stage. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering journal with appendix], 2010, no. 3, pp. 36–40.
- [2] Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Oscillations in engineering]. Moscow, Nauka publ., 1967. 444 p.
- [3] Crawford F.S. *Waves*. McGraw-Hill, 1968. 600 p. (Russ. ed.: Volny. Moscow, Nauka publ., 1976. 528 p.).
- [4] Zyablikov V.M., Smirnov V.F. Two approaches to the analyses of dynamics of material systems and one decision. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering journal with appendix], 2012, no. 9, pp. 9–13.

Glushkov E.Yu. — Master' Degree student, Department of Machine Construction Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.M. Zyablikov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Machine Construction Principles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.