

УДК 621.01

О НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В МАШИНАХ

© Владимир Константинович Асташев

Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения

им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия

v_astashev@mail.ru

***Аннотация.** Приводится обзор научно-технических направлений, посвященных вопросам реализации резонансных и авторезонансных режимов работы вибрационных машин, а также поршневых машин, в частности, компрессоров и двигателей внутреннего сгорания.*

***Ключевые слова:** колебания, автоколебания, поршневая машина, компрессор, двигатель, резонанс, авторезонанс, разгрузка.*

Практически все вибрационные машины различного назначения: вибрационные транспортеры, строительно-дорожные машины, вибрационные грохоты и просеивающие машины и т.д. работают, как правило, в далеких от резонанса до- или зарезонансных режимах [1], хотя общеизвестно, что резонансные режимы являются наиболее эффективными. Это объясняется тем, что резонансные режимы весьма чувствительны к изменению технологической нагрузки и требуют постоянной подстройки частоты возбуждения. Ситуацию радикально меняет использование эффекта авторезонанса [2], позволяющего автоматически удерживать резонансное состояние машины при изменении технологической нагрузки в широких пределах.

Авторезонанс – это резонанс при возбуждении колебаний силами, зависящими от движения колебательной системы. Иными словами – это резонанс в автоколебательной системе. Собственно термин «авторезонанс» был предложен А. А. Андроновым, А.А. Витом, С.Э. Хайкиным [3], которые при исследовании генерации автоколебаний в электрическом контуре обнаружили, что режим автоколебаний возбуждается на собственной частоте контура и полностью аналогичен резонансному режиму при вынужденных колебаниях. Поэтому по аналогии с резонансом при вынужденных колебаниях такой автоколебательный режим был назван авторезонансным.

Однако в реальных машинах возбуждение автоколебаний возможно не только на собственных частотах колебательной системы, как в случае, рассмотренном в [3] и в других исследованиях, посвященных возбуждению автоколебаний, когда создаваемая сила при механических или напряжении при электрических колебаниях оказываются синфазными со скоростью или током возбуждаемой системы. Дело в том, что в реальных системах цепь обратной связи вносит фазовые искажения обрабатываемого сигнала, результатом которых

является отклонение возбуждаемой частоты от собственной, т.е. резонансной частоты колебательной системы. В [4] показано, что изменением фазы в цепи обратной связи можно реализовать всю амплитудно-частотную характеристику колебательной системы. Это свойство особенно интересно проявляется при возбуждении колебаний нелинейных систем, так как в этом случае изменением фазы колебаний удастся реализовать все ветви амплитудно-частотной характеристики, в том числе и неустойчивые, т.е. нереализуемые в режимах вынужденных колебаний.

Уникальные характеристики авторезонансных систем позволяют существенно повысить эффективность вибрационных машин. Проведенные в [5] оценки показывают возможность многократного снижения мощности и металлоёмкости машин при повышении производительности и многократном увеличении КПД. В настоящее время создаются высокоэффективные ультразвуковые технологические устройства [6] и расширяется поле использования авторезонанса для возбуждения колебаний в специальных машинах, станках, приборах и инструментах.

В этой связи особо хотелось бы отметить появившееся в последние годы новое направление исследований по использованию преимуществ авторезонанса в поршневых машинах: компрессорах и двигателях внутреннего сгорания [7-10]. Эти интересные работы, проводятся группой учёных Российского государственного открытого технического университета путей сообщения (РГОТУПС), возглавляемой доктором технических наук, профессором И.А. Алейниковым.

Идея применения авторезонанса в поршневых двигателях была высказана в Институте машиноведения им. А. А. Благодирова в 1987 году, когда И.А. Алейников был ещё аспирантом. Его диссертационная работа была связана с исследованием автоколебаний в тепловозных и судовых энергетических установках. Речь в работе шла не о полезных и эффективных автоколебаниях, а о таких, с которыми необходимо бороться. Возникающие автоколебания снижают усталостную прочность материала и могут привести к нарушениям нормальных эксплуатационных режимов работы двигателей транспортных средств. Во время обсуждения этой работы профессор В.И. Бабицкий высказал предположение о том, что в поршневом двигателе возможно использование и эффективных авторезонансных режимов. В результате эта идея «заразила» молодого исследователя, и он продолжил работу в указанном направлении.

В статьях и патентах на изобретения [8 -10] показана возможность осуществления резонансных режимов поршневых машинах, в которых сжимаемый газ создает двусторонние восстанавливающие силы, действующие на поршни. Схема такой машины показана на рис. 1,а. Здесь жестко соединенные поршни 1 связаны шатунами 2 с шатунными шейками коленчатого вала 3.

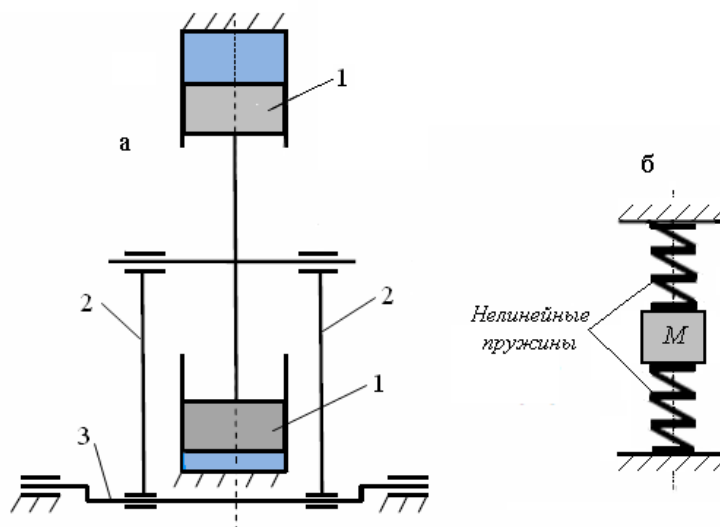


Рис. 1

Предположим, что шатуны не связаны с коленчатым валом. Если потери отсутствуют, то при начальном отклонении поршней от среднего положения на величину a поршни будут совершать колебания с амплитудой a и некоторой угловой частотой ω . Колебания такой системы могут быть описаны с помощью простой модели, показанной на рис 1,б, в которой масса M поступательно движущихся частей a совершает близкие к гармоническим колебания на нелинейных пружинах, моделирующих упругость газа в замкнутых полостях цилиндров. Если бы пружины были линейными, то коленчатый вал, имеющий эксцентриситет a шатунных шеек, при вращении с угловой скоростью ω был бы полностью разгружен от действия взаимно уравновешенных инерционных и упругих сил. Из-за нелинейности происходит уравновешивание первых существенно преобладающих гармоник этих сил. Здесь мы имеем дело с весьма специфическим случаем резонансной разгрузки кривошипно-шатунного механизма, которая осуществляется с помощью присоединения механических упругих элементов [11].

Такого рода резонансная разгрузка коленчатого вала возможна как в компрессорных установках, так и в двигателях внутреннего сгорания. Принципиальное различие проявляется лишь в способе компенсации неизбежных потерь энергии и затрат энергии на совершение полезной работы.

В компрессорах компенсация производится внешним двигателем, например электрическим, вращающим коленчатый вал. Поэтому компрессор с описанной резонансной разгрузкой является резонансной машиной, работающей в режиме вынужденных колебаний с кинематическим возбуждением путем принудительного вращения коленчатого вала.

В двигателе внутреннего сгорания компенсация энергии осуществляется в результате сгорания топлива, поступление которого в цилиндры регулируется движением поршней. Таким

образом, двигатель внутреннего сгорания является автоколебательной системой, а двигатель, настроенный на режим резонансной разгрузки, является авторезонансной системой.

Для пояснения возможности реализации резонанса в поршневом двигателе рассмотрим его индикаторную диаграмму (Рис. 2).

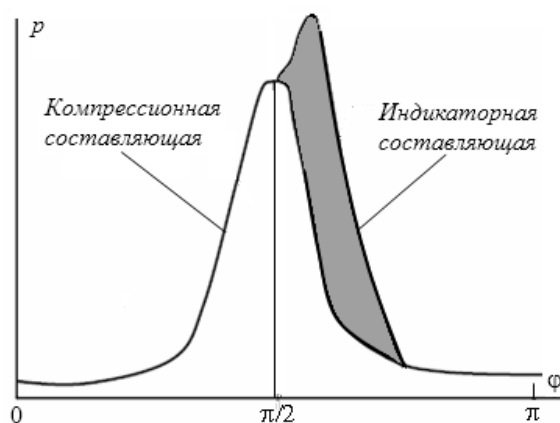


Рис. 2

В работах [7,9,10] индикаторная диаграмма двухтактного дизеля представляется суммой двух составляющих частей: симметричной относительно угла поворота кривошипа $\varphi = \pi/2$, соответствующего положению поршня в верхней мёртвой точке, называемой авторами *компрессионной составляющей*, и *индикаторной составляющей*, которая отвечает за совершение работы мотором и порождается топливом, впрыскиваемым в цилиндр. Сила, соответствующая компрессионной составляющей, создает упругое сопротивление, моделируемое на рис. 1, а нелинейными пружинами, и именно эта сила определяет скорость вращения коленчатого вала в авторезонансном режиме работы двигателя. В авторезонансном режиме сила, возникающая в результате сгорания топлива, используется наиболее эффективно. Реализуемая при этом мощность определяется величиной площади затемненной фигуры, заключенной между границами компрессионной и индикаторной составляющих.

Авторезонансный режим работы двигателя достаточно просто было бы реализовать при работе с постоянной скоростью вращения коленчатого вала. Но условия эксплуатации, как правило, изменяются, что делает настройку на резонанс весьма сложным делом. В работах [7-10] даны рекомендации по решению этой проблемы как для случая поршневого двигателя, так и для поршневого компрессора. Для дизеля, например, увеличение давления наддува, приводит к увеличению жёсткости компрессионной составляющей. В этом случае частота свободных колебаний возрастает, и резонанс смещается в сторону более высоких угловых скоростей вращения коленчатого вала. Для компрессора, с целью поддержания эффективного резонансного режима, можно изменять объём мёртвого пространства, несколько увеличивая или уменьшая жёсткость компрессионной пружины.

Приведенная на рис 1. схема поршневой машины напрямую пригодна для реализации резонансных режимов работы компрессоров двойного действия и двухтактных двигателей внутреннего сгорания. При этом авторы работ [8-10], совершенно справедливо полагая, что осуществление авторезонанса в поршневых машинах возможно только при наличии двусторонней восстанавливающей силы, считают невозможным получение положительного эффекта от уравнивания компрессионных (газовых) и инерционных сил в традиционных машинах, например, с однорядным расположением цилиндров. Такое утверждение делается на основании того, что упругая сила в этих машинах направлена по отношению к поршню всегда в одну сторону и не помогает поршню перемещаться на этапе сжатия воздуха.

Автору настоящей заметки это утверждение представляется не вполне корректным, поскольку, по его мнению, следует учитывать не направление сил по отношению к поршню, а направление моментов этих сил относительно оси коленчатого вала. В сказанном легко убедиться, рассмотрев показанную на рис. 3 схему двухцилиндровой поршневой машины.

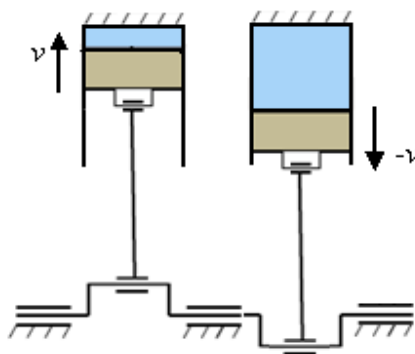


Рис. 3

Здесь в результате противофазного движения поршней создаются моменты упругих сил, направленные в одну сторону. Поэтому представляется, что приведенная схема динамически эквивалентна рассмотренной ранее и позволяет эффективно использовать принципы резонансной и авторезонансной настройки в более широком классе поршневых машин, включая четырехтактные двигатели внутреннего сгорания.

Возможно, что идеи работ [7,8] наиболее эффективно могут быть использованы для многоступенчатых компрессоров, так как их схемы наилучшим образом подходят для резонансной настройки, а компрессионные силы в их индикаторных диаграммах весьма значительны. В таком случае можно ожидать проявления «острого» резонанса и, следовательно, значительного положительного эффекта.

В заключение хотелось бы пожелать группе И.А. Алейникова продолжить эту интересную и, на наш взгляд, важную работу по расширению сферы применения эффективных авторезонансных технологий на перспективную область поршневых машин.

Литература

1. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение. 1969. 362 с.
2. Асташев В.К., Бабицкий В.И., Герц М.Е. К синтезу авторезонансных систем // Научные труды Высших учебных заведений Лит. СССР. Вибротехника. 1973. №3(20). С. 253-258.
3. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.
4. Асташев В.К. О нелинейной динамике ультразвуковых технологических процессов и систем // Вестник научно-технического развития. 2007. №2 С.18-25.
5. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications. Springer. 2007. 330 p.
6. Антипов В.И., Асташев В.К. О принципах создания энергосберегающих вибрационных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. №4. С. 3-8.
7. Алейников И. А., Лисицин Р. Е., Мицкевич В. Г. Резонансные поршневые машины.// Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем. Труды XV симпозиума. Москва - Звенигород. 2006. С. 2-4.
8. Алейников И. А. Космодамианский А. С. И др. Поршневая резонансная машина: Патент РФ на изобретение. N 2274755. Б.И.2006 N 11.
9. Алейников И. А. Космодамианский А. С. И др. Поршневая резонансная машина: Патент РФ на изобретение. N 2264540 Б.И. 2005 N 32.
10. Алейников И. А., Лисицин Р. Е., Параметры резонансного режима работы поршневого двигателя// Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2006, N 3. С100-104/
11. Astashev V.K.; Babitsky V.I.; Kolovsky M.Z. Dynamics and Control of Machines. Berlin: Springer, 2000. 233 p.

Поступила: 30.06.11.