

УДК 621.412

В. А. САФОНОВ, И. Л. БЕЛЕЦКИЙ, П. Н. КУЗНЕЦОВ*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности***ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ С ЛИНЕЙНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ,
РАБОТАЮЩИЙ ПО ЦИКЛУ СТИРЛИНГА**

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований по оптимизации параметров термомеханического двигателя, работающего от внешнего источника тепла. Показан механизм преобразования высокочастотных механических колебаний в электрическую энергию при помощи линейного генератора. Сделаны замеры выходной мощности генератора при разных режимах работы двигателя. Исследовалась зависимость частоты колебаний рабочей мембраны двигателя от весовых характеристик отдельных элементов конструкции опытной установки. Сделаны первичные выводы относительно установок, преобразующих внешнюю тепловую энергию в механические колебания.

Ключевые слова: термомеханический двигатель, терморезонансный двигатель, линейный генератор, двигатель внешнего сгорания, двигатель Стирлинга

Постоянный мировой рост цен на энергоносители открывает широкую дорогу устройствам, преобразующим внешнее «дармовое» тепло в механическую и электрическую энергию. Подобные установки работают по циклу Стирлинга и известны уже достаточно давно. Однако сегодня их производство весьма мало по сравнению с двигателями внутреннего сгорания. Это обусловлено сложностью конструкции, высокими требованиями к материалам деталей и, соответственно, высокой ценой конечного продукта. К тому же, все эти двигатели имеют поршневую модель, что влечет за собой множественные потери полезной работы на трение в механизме привода. Изучив недостатки двигателей Стирлинга с поршневой группой [1, 2], еще в 60-х годах прошлого века, группой английских ученых, из центра атомной энергии в Харуэлле (Англия), была разработана новая концепция двигателя.

Вместо рабочего поршня они поставили металлическую мембрану из пружинной стали. Она совершает колебания под действием изменяющегося давления рабочего тела. С мембраной жестко связан постоянный магнит, который колеблется в обмотке генератора, возбуждая переменный электрический ток. Фактически машина состоит из вытеснителя и рабочей мембраны, которые пружинно подвешены относительно корпуса. Все движущиеся детали двигателя совершают резонансные колебания с частотой равной собственной частоте колебаний установки, но смещены по фазе. Фазовый сдвиг между вытеснителем и рабочей мембраной очень важен для установления положительной обратной связи.

В результате, получилась очень простая и надежная схема рис. 1, которая к тому же, легко гер-

метизируется и имеет длительный ресурс работы (более 100000 часов).

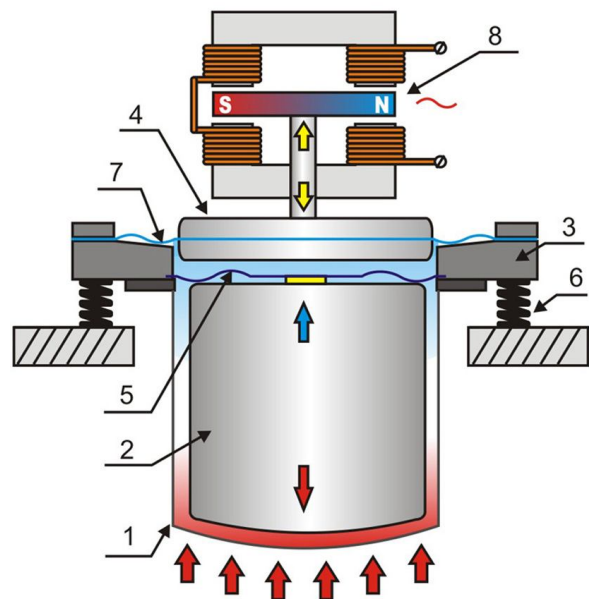


Рис. 1. Схема термомеханического генератора:
1 – нагреватель, 2 – вытеснитель, 3 – корпус,
4 – рабочая мембрана, 5 – пружина вытеснителя,
6 – пружинный подвес корпуса, 7 – пружинная
поверхность рабочей мембраны, 8 – линейный
генератор

Важной особенностью такой конструкции является ее самозапуск при достижении определенного градиента температур между нагревателем и холодильником. Это объясняется тем, что между основными деталями двигателя нет трения скольжения и они легко выходят из равновесия. Все это сильно удешевляет конструкцию.

Однако ни одна из ведущих компаний по производству стирлинг-генераторов не использует эту схему в своих изделиях. Это обусловлено тем, что преобразование механических низкоамплитудных колебаний в электричество, при помощи линейного генератора, не так эффективно, как преобразование кругового движения в генераторе вращения. И это верно, но если не гнаться за высокой мощностью установки и использовать «дармовое» тепло, то подобная конструкция находится вне конкуренции.

Авторами статьи был изготовлен опытный образец такого термомеханического генератора с подводом тепла от газовой горелки рис. 2.



Рис. 2. Опытная модель термомеханического генератора

На базе этой модели был проведен ряд исследований направленных на изучение принципа и параметров работы двигателя. Основным условием устойчивой работы такой установки является наличие общей частоты колебаний для всех движущихся деталей. В свою очередь, частота колебаний зависит от массы детали и жесткости ее подвеса, что выражается формулой:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

где k – жесткость пружины подвеса;
 m – масса детали.

Допустим, необходимо спроектировать установку, работающую на определенной частоте, тогда критерием ее оптимизации будет изготовление каждой движущейся детали с такой массой и жесткостью подвеса, которые обеспечат свободные колебания на частоте близкой к заданной. Другими словами, для максимального преобразования тепловой

энергии в механическую, корпус двигателя, вытеснитель и рабочая мембрана должны обладать близкими резонансными частотами. Главной деталью, задающей основную частоту колебаний двигателя, является вытеснитель. Он перемещает рабочее тело от нагревателя к холодильнику. От его правильной работы зависит стабильность работы всей установки. Между вытеснителем и рабочей мембраной нужно установить положительную обратную связь. Поэтому их частоты колебаний отличаются по фазе, вытеснитель обгоняет мембрану на 90 – 100 °С.

Самый простой способ - плавно регулировать их массы и следить за выходной мощностью. Этот же принцип применим и к оптимизации колебаний корпуса. На рисунках 3, 4 и 5 показана экспериментальная оптимизация опытной установки по массе ее деталей, не меняя пружинные подвесы.

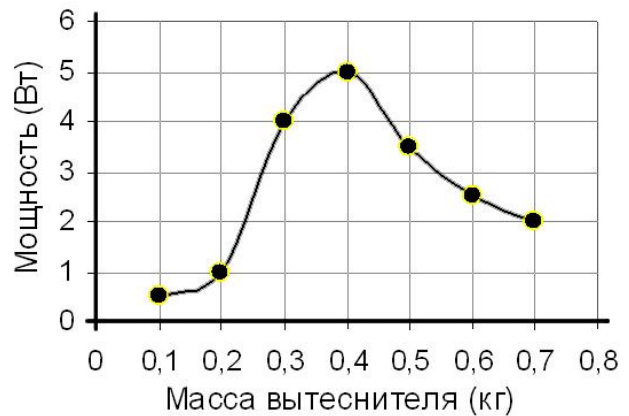


Рис. 3. Зависимость мощности двигателя от массы вытеснителя



Рис. 4. Зависимость мощности двигателя от массы рабочей мембраны

Проведя серию экспериментов, авторами статьи были сделаны выводы относительно положительных и отрицательных сторон такого двигателя.

Самый большой плюс этой конструкции в ее простоте и невысокой цене изготовления деталей. Сегодня, именно дорогая цена классических схем

Стирлинг-генераторов мешает их широкому распространению на рынке.

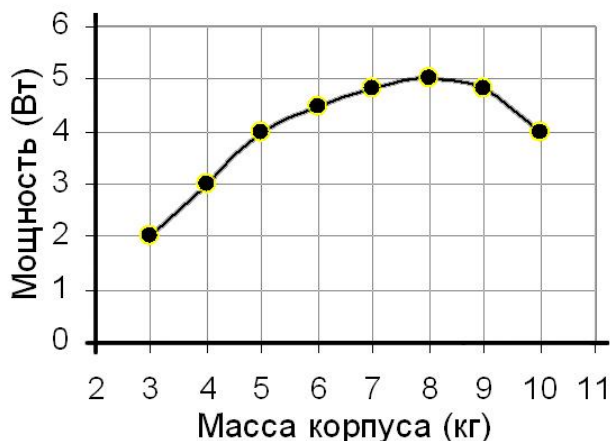


Рис. 5. Зависимость мощности двигателя от массы корпуса

Несомненным достоинством является огромный ресурс работы такого двигателя. Ведь отсутствие механического трения между движущимися деталями делает его практически “вечным”.

Еще одним полезным свойством, терморезонансного двигателя, можно считать его способность к самозапуску при нагреве до определенной температуры. Эта особенность значительно упрощает конструкцию, чем не могут похвастаться поршневые машины.

Такой двигатель легко герметизируется вместе с генератором и не требует частого обслуживания, что позволяет устанавливать его в труднодоступных местах.

Линейный генератор можно легко настроить на работу с любой удобной для потребителя частотой.

Термомеханический двигатель с резонансным принципом работы способен преобразовывать тепло в механическую работу в широком диапазоне температур. Чем выше разница температур между нагревателем и холодильником, тем выше частота работы двигателя. На низких частотах выгодно использовать эту установку как водяной насос, а на высоких — как генератор.

К недостаткам такого двигателя можно отнести сравнительно не большой КПД преобразования тепла в механическую работу, не более 10%. Это связа-

но с отсутствием регенератора и малым частым ходом вытеснителя, что не позволяет использовать большой объем рабочего тела, как у поршневых машин. Это является главным препятствием для постройки мощных Стирлинг-генераторов на этой схеме.

Такой же малый ход рабочей мембраны (1-3мм) не позволяет сделать высокоэффективным линейный генератор. Поскольку колебания магнита между сердечниками с катушками не приводят к полному исчезновению магнитного поля при смене его на противоположное направление, как в генераторах вращения.

Еще одной не приятной особенностью такой конструкции является изменение частоты работы двигателя в зависимости от количества подводимого тепла. С повышением градиента температур между нагревателем и холодильником частота увеличивается и наоборот. Это значит, что на заданный режим работы установка выходит не сразу, а когда установится определенный температурный режим. Получается, что стабильность работы двигателя в заданном режиме зависит от стабильности подвода тепла, что не всегда можно обеспечить простыми способами.

Но в целом, по мнению авторов статьи, если провести ряд усовершенствований, то машинам с резонансным принципом работы вполне можно найти полезное применение.

Литература

1. Ридер, Г. Т. *Двигатели Стирлинга [Текст] : моногр. / Г. Т. Ридер, Ч. К. Хупер. — пер. с англ. — Москва, 1986. — 464 с.*
2. Уокер, Г. *Двигатели Стирлинга [Текст] : моногр. / Г. Уокер. — пер. с англ. — Москва, 1985. — 408 с.*
3. Сафонов, В. А. *О возможностях использования флуктуаций в энергетических процессах [Текст] / В. А. Сафонов // Сб. науч. трудов СГУЯЭиП. — С. : СГУЯЭиП, 2012. — № 2. — С. 50-58.*
4. *Анализ цикла свободпоршневых машин типа Стирлинга с учетом динамики подвижных частей [Текст] / А. В. Синев, М. Я. Израйлович, В. Ф. Щербаков, Р. В. Кангун // Машиностроение и инженерное образование. — М., 2005. — № 2. — С. 19-36.*

Поступила в редакцию 10.10.2013, рассмотрена на редколлегии 10.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., руководитель севастопольского отделения научно-технического центра В. А. Герлига, НАЭК «Энергоатом» (СГУЯЭиП).

**ТЕРМОМЕХАНІЧНИЙ ДВИГУН З ЛІНІЙНИМ ГЕНЕРАТОРОМ,
ПРАЦЮЮЧИЙ ЗА ЦИКЛОМ СТИРЛІНГА***В. О. Сафонов, І. Л. Белецький, П. Н. Кузнецов*

У даній статті наведено результати експериментальних досліджень з оптимізації параметрів термомеханічного двигуна, працюючого від зовнішнього джерела тепла. Показано механізм перетворення високочастотних механічних коливань в електричну енергію за допомогою лінійного генератора. Зроблено виміри вихідної потужності генератора при різних режимах роботи двигуна. Досліджувалася залежність частоти коливань робочої мембрани двигуна від вагових характеристик окремих елементів конструкції дослідної установки. Зроблено первинні висновки щодо установок, що перетворюють зовнішню теплову енергію в механічні коливання.

Ключові слова: термомеханічний двигун, терморезонансний двигун, лінійний генератор, двигун зовнішнього згоряння, двигун Стірлінга.

**THERMOMECHANICAL ENGINE WITH LINEAR GENERATOR
WORKING FOR CYCLE STIRLING***V. A. Safonov, I. L. Bielecki, P. N. Kuznetsov.*

This article presents the results of experimental studies on optimizing the parameters of thermo-mechanical engine running from an external source of heat. The mechanism of transformation of high-frequency mechanical vibrations into electrical energy by means of a linear generator. Made measurements generator output at different engine operating modes. The dependence of the oscillation frequency of the working diaphragm motor weight characteristics of the individual elements of the design of a pilot plant. Make an initial conclusions about the plants that convert external thermal energy into mechanical vibrations.

Keywords: thermomechanical engine, termorezonansny engine, linear generator, engine is an external combustion, Stirling engine.

Сафонов Владимир Александрович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина.

Белецкий Игорь Леонидович – аспирант кафедры «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: Physicstoys@yandex.ru.

Кузнецов Павел Николаевич – аспирант кафедры «Энергосбережения и нетрадиционных источников энергии», Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь, Украина, e-mail: pasha_2@ukr.net.