

УДК 681.513.54

А.А. ОЛЕЙНИК, С.В. ЕПИФАНОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ДВИГАТЕЛЯМИ
МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ПО КРИТЕРИЮ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ**

Рассмотрены возможности применения оптимального распределения нагрузки для повышения экономичности наземных и авиационных многодвигательных силовых установок. Приведено описание предлагаемого метода оптимизации, его возможности, проблемы, связанные с его применением, и пути их решения.

многодвигательная силовая установка, распределение нагрузки, экономичность, оптимизация, система автоматического управления, идентификация, эксплуатационная регистрация, модель текущего состояния

Введение

Многодвигательные силовые установки широко используются в авиации, энергетике и промышленности. Такие установки характеризуются высокой производительностью и, как следствие, высоким расходом топлива (потреблением энергии). Кроме того, большинство наземных установок работает в условиях непрерывной или интенсивной эксплуатации. В результате оплата потребляемого топлива составляет, как правило, основную статью эксплуатационных расходов наземной установки.

Актуальной задачей является повышение экономичности таких установок. Даже относительно небольшое снижение расхода топлива выражается в значительной сумме сэкономленных средств за год. Следует также отметить, что повышение экономичности установки, как правило, благоприятно сказывается на ее экологических характеристиках.

В настоящее время большинство многодвигательных установок управляется по принципу равного распределения нагрузки. Такая стратегия управления может обеспечить максимальную экономичность, только если характеристики агрегатов установки отличаются незначительно. Однако на практике характеристики агрегатов существенно отличаются вследствие индивидуальных особенностей

изготовления, различной степени износа и загрязнения проточной части и др.

1. Постановка задачи

Нами предложена более совершенная стратегия управления многодвигательной силовой установкой – оптимальное по критерию топливной экономичности распределение нагрузки. Сущность этого метода состоит в поиске такой конфигурации режимов работы агрегатов, при которой необходимая производительность установки будет достигаться с наименьшим общим расходом топлива (потреблением энергии). Этот метод позволяет наилучшим образом использовать имеющиеся ресурсы установки без внесения каких-либо конструктивных изменений.

Метод основан на использовании реальных (текущих) характеристик агрегатов, которые строятся по математическим моделям текущего состояния. Модели должны быть достаточно простыми для обеспечения высокого быстродействия и в то же время обеспечивать высокую точность соответствия реальным параметрам агрегата. Система оптимального распределения нагрузки должна быть способна автоматически обновлять (идентифицировать) модели текущего состояния по накопленным результатам эксплуатационной регистрации параметров. Т.к. за короткий период невозможно собрать представи-

тельную обучающую выборку данных, применение модели типа «черный ящик» для описания отклонения от нормального состояния нерационально. Необходимо выработать поправочные модели с минимальным числом неизвестных, что позволит достоверно идентифицировать модели по небольшому количеству эксплуатационных данных, зарегистрированных на любом режиме при любых внешних условиях.

2. Описание метода

Упрощенно оптимизацию распределения нагрузки можно рассматривать как достижение максимального КПД многодвигательной установки двумя следующими способами:

- 1) Выбором оптимального количества работающих агрегатов для обеспечения заданной производительности (рис. 1). При этом за счет уменьшения (или увеличения) количества используемых агрегатов, их рабочие точки смещаются в сторону оптимальных режимов, т.е. максимального КПД.
- 2) Перемещением нагрузки с менее экономичных (изношенных) агрегатов на более экономичные (рис. 2). При этом общий КПД установки смещается

от среднего по агрегатам значения в сторону КПД наиболее экономичного агрегата.

Первый способ эффективен для агрегатов с ярко выраженной зависимостью КПД от режима, второй, наоборот – для агрегатов с пологой зависимостью. В общем случае метод распределения нагрузки использует оба эти способа одновременно.

Косвенным результатом оптимизации распределения нагрузки может быть выравнивание степени износа (загрязнения) агрегатов, что в большинстве случаев позволит производить более эффективное планирование технического обслуживания.

В основе метода лежит использование текущих характеристик агрегатов – зависимостей расхода топлива (потребления энергии) G_i от нагрузки Q_i , которые строятся для заданных внешних условий по индивидуальным моделям текущего состояния. Зависимость прогнозируемых значений расхода топлива от нагрузки агрегата хорошо описывается полиномиальной функцией. Результаты аппроксимации функций $G_i = f(Q_i)$ используются при построении системы уравнений для определения минимума функции суммарного расхода топлива. Система уравнений составляется и решается для каждого

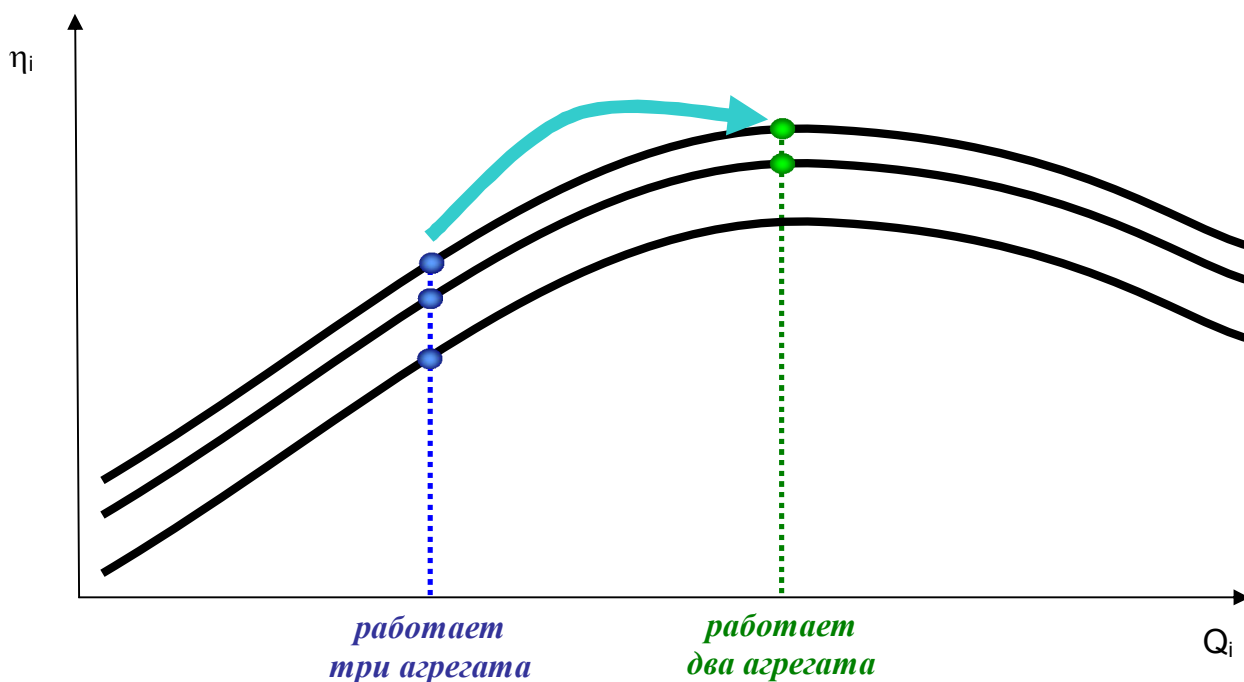


Рис. 1. Увеличение экономичности путем выбора оптимального множества работающих агрегатов

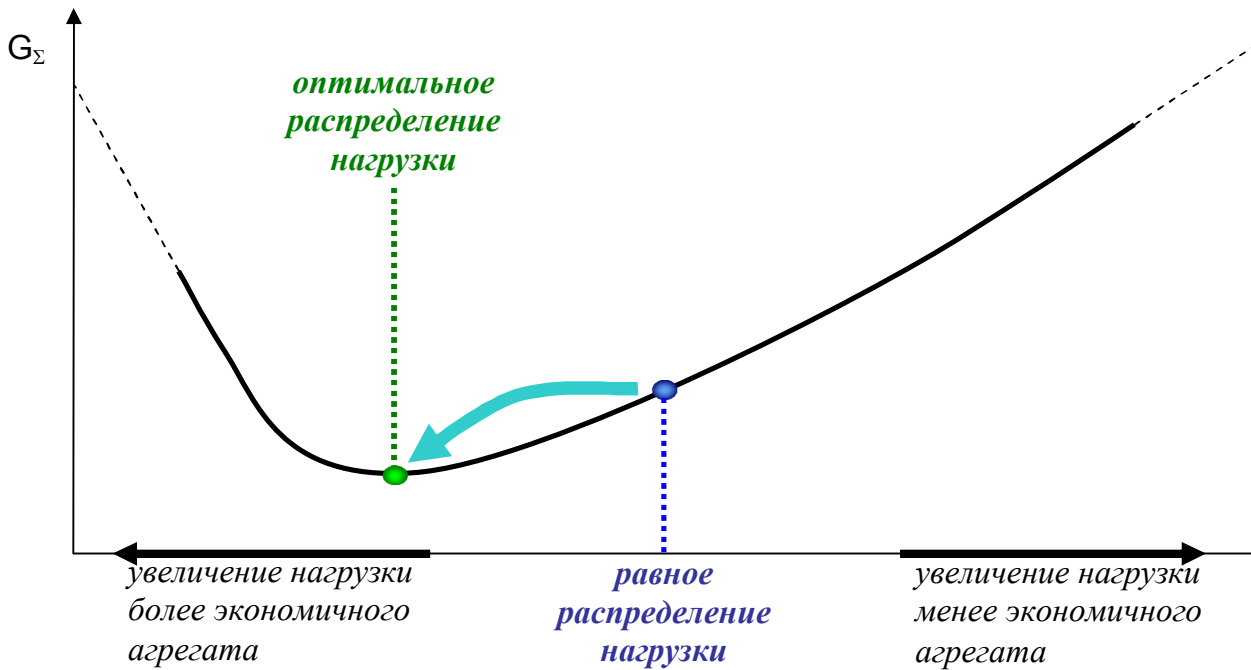


Рис. 2. Увеличение экономичности путем перемещения нагрузки на более экономичные агрегаты

допустимого множества работающих агрегатов, в результате чего отбирается наиболее экономичная конфигурация.

Метод позволяет накладывать широкий спектр возможных ограничений на искомые результаты оптимизации, например:

- 1) задавать, какие агрегаты недоступны для включения в работу, т.к. находятся в ремонте или техническом обслуживании;
- 2) задавать особые фиксированные режимы работы для специальных агрегатов;
- 3) избегать частого включения-выключения агрегатов при кратковременных изменениях требуемой производительности;
- 4) обеспечивать совместимость с конкретной САУ и др. требованиями.

3. Обеспечение эффективности применения

Очевидно, что эффективность оптимизации определяется достоверностью используемых моделей агрегатов, т.е. степенью соответствия их реальным характеристикам агрегата на момент решения задачи. В то же время, модели должны быть достаточно простыми для обеспечения быстродействия при пе-

реходе от модели агрегата к характеристике $G_i = f(Q_i)$.

Предлагается использовать базовую (серийную) модель агрегата совместно с индивидуальными поправками (моделью нормального состояния) и поправками на ухудшение характеристик вследствие износа и загрязнения (моделью текущего состояния). В качестве базовой может использоваться модель высокого уровня или модель типа «черный ящик», идентифицированная по модели высокого уровня или представительной выборке результатов эксплуатационной регистрации параметров агрегата.

Для описания отклонений реального агрегата от базовой модели применение модели типа «черный ящик» нерационально, т.к. в эксплуатации невозможно собрать представительную выборку данных за короткий период, кроме того, идентификация поправок выполняется в автоматическом режиме без визуального контроля результатов пользователем. Поэтому необходимо выявить критерии подобию, которые сохраняются независимо от индивидуальных особенностей, износа, загрязнения агрегата и выработать поправочные модели с минимальным числом неизвестных, которые определяются при идентификации (идеально – с одной неизвестной). В

этом случае для успешного выполнения идентификации модели требуется небольшое количество точек, зарегистрированных на любом режиме, при любых внешних условиях.

Другим не менее важным фактором достоверности идентификации моделей является достоверность исходных данных. Регистрируемые параметры агрегата должны подвергаться проверке на исправность измерительной системы и определению установившегося режима. В качестве источника исходных данных для идентификации может использоваться система диагностирования агрегата, в которой такие проверки, как правило, выполняются.

4. Пути применения. Интеграция с САУ

Предложенный метод оптимального распределения нагрузки требует относительно большого объема вычислений и использует большие объемы обрабатываемой информации, что не позволяет на данном этапе говорить о возможности непосредственного включения его в системы автоматического управления. Однако возможности современных компьютеров позволяют решать задачу оптимизации в течение нескольких секунд, что вполне достаточно, так как оптимизация требуется на продолжительных установившихся режимах.

Таким образом, система распределения нагрузки является дополнением к САУ наземной многодвигательной силовой установки и выполняет решение задачи по запросу при изменении требуемой производительности или внешних условий, после чего переход к оптимальной конфигурации осуществляется под управлением САУ.

После выполнения начальной настройки система функционирует в автоматическом режиме и не требует вмешательства персонала. Гибкость системы и возможность накладывать ограничения позволяет адаптировать метод для решения различных задач, обеспечивать совместимость с САУ и программным

обеспечением, а также выполнение других требований.

В свою очередь САУ должна поддерживать совместимость с оптимальным распределением нагрузки. Прежде всего, необходимы интерфейсы или программное обеспечение для выполнения необходимого обмена данными. Кроме того, САУ должна быть способна обрабатывать переход к заданной конфигурации и поддерживать ее. Однако, даже если САУ не позволяет индивидуально задавать режим работы каждого агрегата, предложенный метод все же может применяться для выбора оптимального множества работающих агрегатов.

В случае авиационного применения, при невозможности использования системы на борту самолета, она может использоваться на земле для выработки рекомендаций по выполнению стандартных режимов работы многодвигательной силовой установки при различных высотных и климатических условиях полета.

Заключение

Метод оптимального распределения нагрузки позволяет максимально эффективно использовать многодвигательную установку – обеспечивать необходимую производительность с минимальным возможным расходом топлива (потреблением энергии), уменьшая потери от использования изношенных (загрязненных) агрегатов и снижения КПД агрегата при работе на неоптимальном (низком или высоком) режиме при использовании обычной стратегии управления. Таким образом, экономия от применения метода зависит от уровня отличия КПД отдельных агрегатов и уровня изменения КПД агрегата в зависимости от режима.

Поступила в редакцию 15.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.