

МЕТОДЫ СХЕМАТИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ЦИКЛА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЦИКЛОВ

© 2013 Д.Г. Федорченко, Д.К. Новиков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 03.12.2013

Схематизация сложных эксплуатационных циклов необходима для оценки исчерпания ресурса деталей авиационных двигателей. В работе выполнен анализ существующих методов схематизации и предложен свой метод. В предлагаемом методе, из последовательности экстремумов «max – min – max», при знании «глобального» минимума – (0), выделяется основной простой цикл нагружения и дополнительный цикл от минимума до наименьшего их двух максимумов. Разработан алгоритм выделения отдельных простых циклов нагружения в сложном эксплуатационном цикле, реализованный программно на языке Visual Basic for Applications в среде Excel'97.

Ключевые слова: нагружение, повреждение, простой, сложный, суммирование, цикл, эквивалентный, эксплуатация.

Экспериментальная оценка малоциклового долговечности в лабораторных условиях проводится, как правило, при «простой» форме циклов – симметричной или отнулевой. Поэтому для оценки исчерпания ресурса деталей, работающих при сложных программах нагружения, необходимо предварительно схематизировать сложный эксплуатационный цикл последовательностью простых симметричных или асимметричных циклов. Для этого служат методы схематизации сложных эксплуатационных циклов.

Их целью является замена «сложного» эксплуатационного цикла изменения напряжений некоторым количеством «простых» циклов, определение их амплитуды, частоты нагружения и степени вносимого повреждения по критерию исчерпания малоциклового долговечности. Под «простым» циклом здесь понимается цикл нагружения, повреждение от которого может быть оценено по результатам стандартных испытаний на малоцикловую усталость, а степень накопленного повреждения за эксплуатационный цикл определяться на основе гипотез суммирования повреждений.

Известно достаточно много методов приведения сложного цикла изменения нагрузки к эквивалентной последовательности простых сим-

метричных или асимметричных циклов, например [1]. При этом различные методы схематизации могут давать различные, существенно отличающиеся результаты, в случае оценки суммарного накопленного повреждения по критерию исчерпания усталости при случайном нагружении.

Поэтому метод схематизации эксплуатационного цикла ГТД должен отражать особенности его работы, давать объективные данные по степени исчерпания малоциклового долговечности его деталей и иметь возможность реализации в ЭВМ. При этом целесообразно, чтобы реализация метода проходила в режиме реального времени.

Основные методы схематизации сложного эксплуатационного цикла системой простых циклов приведены ниже.

МЕТОД МАКСИМУМОВ

При использовании метода максимумов за амплитуды напряжений простых циклов принимается все положительные максимумы «сложного» цикла изменения напряжений. При этом предполагается, что исходный цикл является симметричным относительно некоторого среднего уровня. Величина среднего может быть назначена директивно или определена как

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{max}}{2}.$$

Метод максимумов может давать существенно завышенные значения размахов цикла, что соответственно приведет к неоправданному завышению расчетной величины циклической нагрузки двигателя.

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

E-mail: kipdla@ssau.ru

Новиков Дмитрий Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

E-mail: kipdla@ssau.ru

МЕТОД ПЕРЕСЕЧЕНИЙ

При использовании метода пересечений за амплитуду «простого» цикла принимается наибольший экстремум между двумя пересечениями среднего уровня. Частота «простого» цикла принимается равной частоте пересечения среднего уровня исходным циклом. Метод пересечений не учитывает асимметричные циклы, полностью лежащие выше или ниже среднего уровня нагружения, что может привести к заниженной оценке эквивалентной циклической наработки.

МЕТОД АМПЛИТУД (МЕТОД РАЗМАХОВ)

При использовании метода амплитуд за амплитуду «простых» циклов принимается половина приращения между соседними экстремумами «сложного» цикла нагружения. При этом не учитываются средние напряжения «простых» циклов. Частота «простых» циклов нагружения принимается равной частоте появления одноименных экстремумов. Недостатком метода является то, что в некоторых случаях, например, при «пилообразном» или «ступенчатом» увеличении нагрузки, или в случае, когда перед выходом на взлетный режим выполняется один или несколько промежуточных циклов, этот метод не выделяет цикл нагружения от «глобального» минимума эксплуатационного цикла до его «глобального» максимума. Однако метод позволяет более точно учитывать небольшие изменения режимов работы двигателя.

МЕТОД ПОЛНЫХ ЦИКЛОВ (МЕТОД ПОСТЕПЕННОГО ИСКЛЮЧЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЦИКЛОВ)

При использовании метода полных циклов за амплитуду напряжений «простых» циклов принимается половина приращений «сложного» цикла между двумя соседними экстремумами (минимумом и максимумом процесса) при постепенном исключении промежуточных циклов с все более высокими значениями амплитуд напряжений. При этом регистрируются амплитуды и количество исключенных циклов. Средние напряжения циклов не учитываются. За частоту простых циклов нагружения принимается частота появления одноименных экстремумов.

МЕТОД ПОЛНЫХ ЦИКЛОВ С УЧЕТОМ СРЕДНЕГО

При использовании этого метода амплитуда и частота «простых» циклов нагружения определяются аналогично методу полных циклов, но учитываются средние напряжения «простых» циклов.

МЕТОД ПОЛУСУММ-ПОЛУРАЗНОСТЕЙ (МЕТОД РАЗМАХОВ С УЧЕТОМ СРЕДНЕГО)

Амплитуда и частота «простых» циклов нагружения при использовании этого метода определяются аналогично методу амплитуд. При этом учитываются средние напряжения циклов.

МЕТОД УКРУПНЕННЫХ РАЗМАХОВ

В соответствии с этим методом вычисляются и сравниваются повреждающее действие «простого» цикла, определенного по методу пересечений и совокупности промежуточных «простых» циклов, определенных по методу амплитуд. После сравнения выбирается вариант, оказывающий большее повреждающее действие.

МЕТОД «ДОЖДЯ»

Методы «дождя» и полных циклов наиболее качественно из всех рассмотренных методов выделяют «простые» циклы. Оба эти метода дают практически одинаковые результаты. Недостатком обоих этих методов является то, что для их применения необходимо знание всей истории нагружения. Поэтому методы «дождя» и полных циклов могут быть применены только для послеполетной обработки информации, записанной во время полетного или эксплуатационного цикла и не могут обеспечить оценку эквивалентной наработки в режиме реального времени.

В системах оценки исчерпания ресурса, работающих в реальном времени целесообразно использовать более экономные методы выделения простых циклов, например метод полусумм-полуразностей. Этот метод прост в реализации и требует минимальный объем памяти для хранения данных. Однако метод полусумм-полуразностей обладает таким же недостатком, как и метод амплитуд - он может не выделить основной цикл нагружения от «глобального» минимума до «глобального» максимума, который вносит основную повреждаемость сложного эксплуатационного цикла - его доля составляет, как правило, более 50% от всей эквивалентной малоцикловой наработки за полет. Это может произойти в случае, когда перед выходом на взлетный режим выполняется один или несколько промежуточных циклов. Подобный случай практически всегда имеет место, когда руление самолета на исполнительный старт осуществляется за счет маршевых двигателей.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СХЕМАТИЗАЦИИ СЛОЖНОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ЦИКЛА СИСТЕМОЙ ПРОСТЫХ ЦИКЛОВ

Учитывая недостатки известных методов схематизации сложного эксплуатационного цикла системой простых циклов и, соответственно, оценки эквивалентной циклической наработки в эксплуатации в режиме реального времени ниже предлагается описание разработанного метода схематизации эксплуатационного цикла ГТД последовательностью «простых» циклов, основанный на методе полусумм-полуразностей, который реализуется в режиме реального времени.

В предлагаемом методе под простым циклом нагружения принимается изменение нагрузки от минимума до следующего за ним максимума, при этом учитываются минимальные и максимальные напряжения циклов, см. рис.1.

При этом каждый «простой» цикл нагружения характеризуется своей температурой, продолжительностью выдержек при максимальных напряжениях, уровнем минимальных и максимальных напряжений, величиной наложенной вибрационной нагрузки.

Основной смысл предлагаемого метода заключается в том, что по информации о трех последовательных экстремумах случайного процесса (двух максимумах и одном минимуме), т.е. о двух потенциальных простых циклах, и известном значении «глобального» минимума – (0) достаточно надежно может быть выделен основной цикл нагружения и последовательность дополнительных простых циклов. Таким образом, в предлагаемом методе, из последовательности экстремумов «max – min – max», при знании «глобального» минимума - (0), выделяется основной простой цикл нагружения и дополнительный цикл от минимума до наименьшего их двух максимумов.

Процесс выбора основного и дополнительного простых циклов нагружения из последовательности трех экстремумов показан на рис. 2. Таким образом в предлагаемом методе, из последовательности экстремумов «max – min – max», при знании «глобального» минимума - (0), выделяется основной простой цикл нагружения и дополнительный цикл от минимума до наименьшего их двух максимумов. Повреждения выделенных циклов вычисляются, суммируются с уже

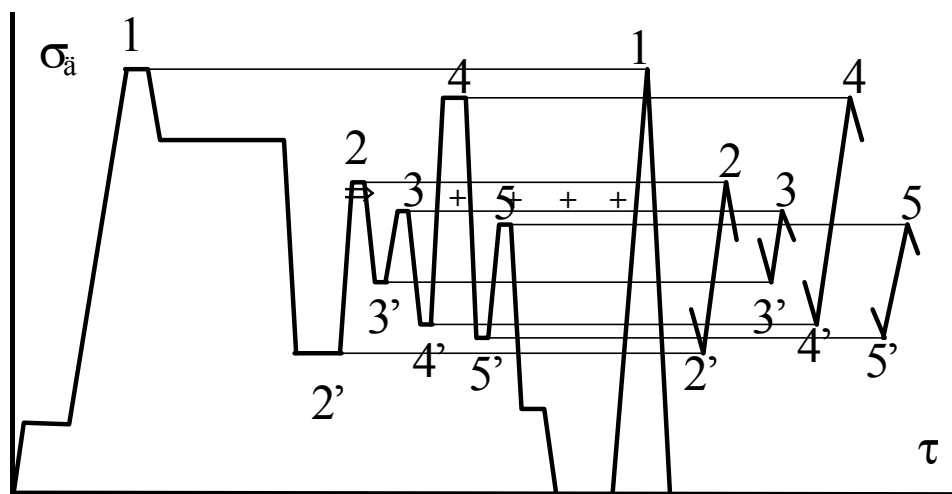


Рис. 1. Схематизация эксплуатационного цикла нагружения авиационного ГТД системой элементарных подциклов нагружения.

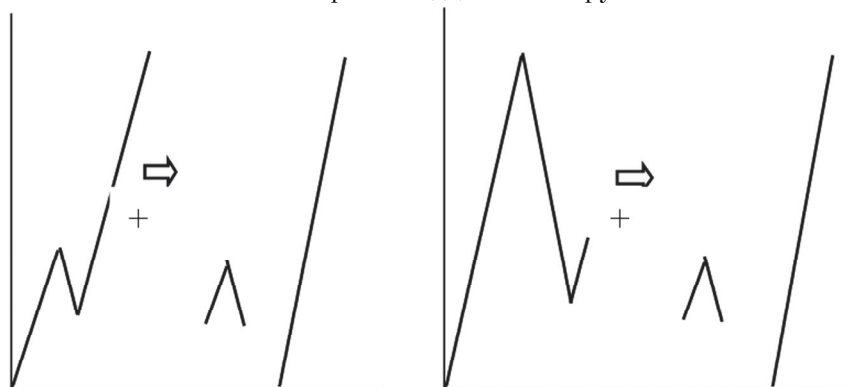


Рис. 2. Варианты выделения основного и дополнительного простого цикла из последовательности трех экстремумов

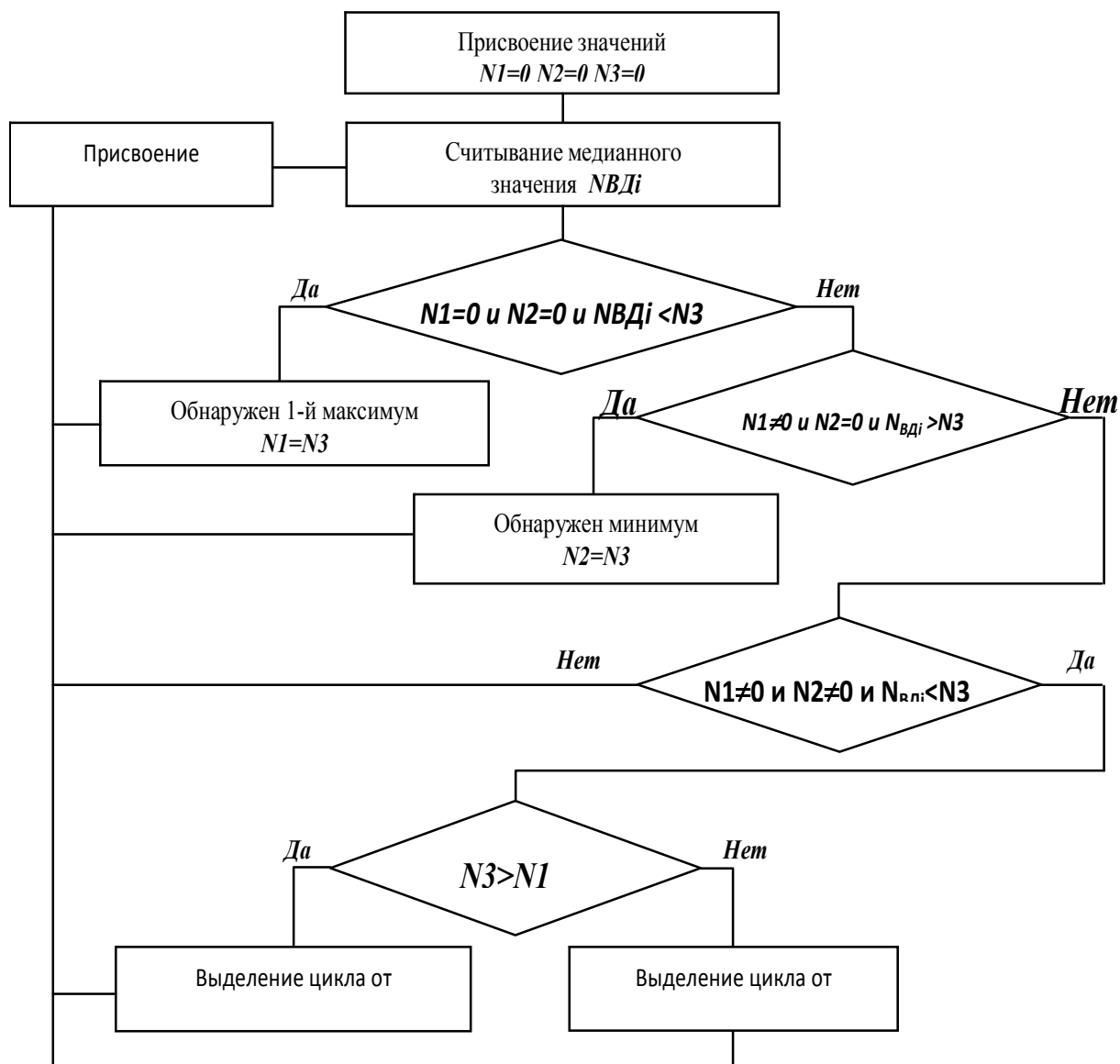


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выделения «простых» циклов

накопленным повреждением и информация о них «забывается».

Блок-схема алгоритма выделения отдельных простых циклов нагружения в сложном эксплуатационном цикле по предлагаемому методу показана на рис. 3.

Тестирование метода показывает, что он надежно выделяет «глобальный» максимум и практически всегда результаты расчетов по этому методу совпадают с расчетами по методу «дождя». При этом предлагаемый метод в отличие от метода «дождя» не требует информации обо всем эксплуатационном цикле и поэтому позволяет проводить выделение «простых» циклов в реальном масштабе времени. Кроме того, разработанный метод позволяет проводить раздельное суммирование по основным и дополнительным простым циклам, что регламентируется для ряда двигателей. Это оказалось возможным потому,

что глобальный экстремум может выделяться по окончанию обработки.

Алгоритм реализован программно на языке Visual Basic for Applications в среде Excel'97. Выбор языка программирования определен тем, что результаты замеров, как правило, обрабатываются в MS Excel, поэтому их обработка непосредственно в среде Excel позволяет избежать конвертирования больших объемов информации.

Рис. 3 является ключевым в предложенном методе и требует пояснений. На нем не видно глобального минимума, о котором так много говорилось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цейтлин В.И., Федорченко Д.Г. Оценка долговечности деталей при совместном действии повторно-статического и вибрационного нагружения // Проблемы прочности. 1980. №1. С. 14-17.

**METHODS SCHEMATIZATION OPERATING CYCLE
CHANGES SYSTEM STRESS ELEMENTARY CYCLE**

© 2013 D.G. Fedorchenko, D.K. Novikov

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Schematization complex operating cycles necessary for evaluating resource exhaustion of aircraft engine parts. In this paper, the analysis of existing methods and the proposed schematic his method. In the proposed method, the sequence of extrema «max - min - max», with knowledge of the «global» minimum – (0) stands basically just loading cycle and additional cycle from the minimum to the lowest of the two maxima. An algorithm for isolating individual simple loading cycles in a complex life cycle, software realizovanny language Visual Basic for Applications environment Excel'97.

Keywords: loading, damage, simple, complex, summation, cycle equivalent, operation.

*Dmitry Fedorchenko, Candidate of Technics, Associate Professor
at the Construction and Design of Aircraft Engines Department.*

E-mail: kipdla@ssau.ru

*Dmitry Novikov, Doctor of Technics, Professor at the
Construction and Design of Aircraft Engines Department.*

E-mail: kipdla@ssau.ru