



О.И. Малыхина, М.С. Глуговский, Ю.В. Захарова

## МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТАРТА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ В ЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА NASTRAN

(АО «РКЦ «Прогресс»)

Современным стандартом в ракетно-космической отрасли является применение для проведения расчётов, связанных с анализом нагружения ракет-носителей (РН) программного комплекса Nastran. Одним из наиболее трудоёмких и вместе с тем важных расчётных случаев является случай старта РН [1].

Для расчётного случая «Старт» характерно наличие нелинейности в соответствующих данному случаю уравнениях движения, которая обусловлена рядом факторов: искривление оси под действием ветра, различная жесткость опор на растяжение и сжатие, изменение граничных условий в момент отделение РН от стартового стола. Соответственно, при проведении расчёта нагрузок с использованием программного комплекса Nastran, наиболее очевидным является выбор решателя Sol 129, который используется для проведения нелинейного анализа переходных процессов. Однако применение данного типа расчёта является весьма трудоёмким как на этапе подготовки расчётной модели, так и на этапе анализа полученных результатов. Это связано с необходимостью выбора параметров итерационного процесса и частоты пересчёта матрицы жёсткости, задания функций изменения параметров нелинейных элементов. В результате возрастает вероятность появления ошибок на этапе подготовки расчётной модели, а также расхождения решения при неверной интерпретации и некорректном задании расчётных параметров. В этой связи ставится вопрос о применении для решения поставленной задачи решателя Sol 109, который, вообще говоря, применяется для решения линейных систем дифференциальных уравнений.

В данной работе рассмотрен вопрос адаптации линейного расчёта для проведения анализа корпусных нагрузок РН в расчётном случае «Старт».

В соответствии с принципом освобождаемости от связей [2] ракета-носитель, на которую наложены связи в виде стартовых опор может быть рассмотрена как свободное тело, если действие этих связей заменить соответствующими реакциями. Учитывая вышесказанное, линейный динамический расчёт для случая «Старт» необходимо проводить в 2 этапа:

- Этап 1: расчёт для закреплённой модели РН (с целью определения закона изменения по времени реакций связи в опорах);
- Этап 2: расчёт для незакреплённой модели РН (с учётом реакций связей, полученных на первом этапе и приравняваемых нулю в момент времени, соответствующему отделению РН от стартового стола).

Реакции в каждой из опор должны быть определены по всем шести степеням свободы для каждой опоры, после чего должны быть сформированы со-



ответствующие таблицы в формате Nastran для использования в качестве исходных данных на втором этапе. Число таблиц равно числу опор, умноженному на шесть (число степеней свободы). Указанные таблицы могут быть сформированы средствами препроцессора, однако данный способ является весьма трудоёмким и включает в себя ряд операций, которые необходимо повторить для каждой таблицы. По этой причине разработана специальная программа преобразования массивов в математическом пакете MathCad, которая позволяет выполнить все операции в автоматическом режиме для любого числа таблиц. Указанная программа переводит массив, состоящий из двух столбцов (в первом из которых содержится время, во втором – значение функции) в формат функции *Table* программного комплекса Nastran (набор строк вида  $t_1, f_1, t_2, f_2, \dots$  в соответствии с [3]). Методика получения исходного массива данных приведена в работе [4]. Программа преобразования массива состоит из двух программ-функций. Первая программа-функция *Pro* (рисунок 1) предназначена для формирования полей данных в формате строк нужной длины (с числом символов  $ChZn$ ) из произвольных числовых или строковых данных  $Z$ . Блок-схема, соответствующая этой части программы представлена на рисунке 2.

Вторая программа-функция *Prog2* (рисунок 3) предназначена для формирования из данных, содержащихся в массиве  $id$  таблицы с порядковым номером  $TID$  в узком (при  $zn = 8$ ) или широком (при  $zn = 16$ ) формате карты *Table* программного комплекса Nastran [3]. В случае, когда программа выдаёт сообщение об ошибке, необходимо выбрать широкий формат представления данных.

```
Prog1(Z, ChZn) := | Text ← Z if IsString(Z) = 1
                  | if IsString(Z) = 0
                  |   | Tch ← search(num2str(Z), ".", 0)
                  |   | Text ← num2str(round(Z, ChZn - Tch - 1)) if Tch ≥ 0
                  |   | Text ← concat(num2str(Z), ".") if Tch < 0
                  | DL ← strlen(Text)
                  | if DL < ChZn
                  |   | probelov ← ChZn - DL
                  |   | p1 ← ""
                  |   | for i ∈ 2..probelov if probelov > 1
                  |   |   | pi ← concat(pi-1, p1)
                  |   | Text1 ← concat(Text, prows(p))
                  | Text1 ← Text if DL = ChZn
                  | Text1 ← "Îøéâè" if DL > ChZn
                  | Text1
```

Рисунок 1 – Программа-функция *Prog1*



Рисунок 2 – Блок-схема программы-функции *Prog1*

```

Prog2(TID, id, zn) :=
  id ← stack[id, ("ENDT" "" )]
  cs ← 0.5 · (80 - 16) · zn-1
  d ← cs · ceil(rows(id) · cs-1) - rows(id)
  for k ∈ rows(id) + 1 .. rows(id) + d if d ≠ 0
    (idk,1 idk,2) ← (" " " ")
  for j ∈ 1 .. ceil(rows(id) · cs-1)
    S1 ← Prog1("", 8) if zn = 8
    S1 ← Prog1("*", 8) if zn = 16
    for i ∈ 2 .. cs + 1
      Si ← concat[Si-1, concat[Prog1[idi-1+cs·(j-1), 1, zn], Prog1[idi-1+cs·(j-1), 2, zn]]]
    SSj ← concat(Scs+1, Prog1("", 8))
  stack(concat("Tabled1 ", num2str(TID)), SS)
  
```

Рисунок 3 – Программа-функция в MathCad



В программе-функции *Prog2* первоначально массив исходных данных *id* дополняется строкой, содержащей обязательное слово *ENDT*.

Затем, в соответствии с выбранным форматом и соответствующим числом символов  $zn$  в каждом поле таблицы, определяется число полей данных в каждой строке формируемой таблицы, равное  $2 \cdot cs$ . Массив исходных данных дополняется пустыми строками так, чтобы число строк этого массива было кратно числу  $2 \cdot cs$ .

Подготовленные таким образом данные разбиваются на группы по  $cs$  пар  $(t_i, f_i)$ . Данные в каждой группе обрабатываются функцией *Prog1* и объединяются в общую строку, а также с первым и последним текстовыми полями в соответствии с требованиями формата карты *Table*. Полученные таким образом строки присваиваются элементам матрицы-столбца  $S$ . Объединяя матрицу  $S$  со строкой, содержащей название карты и номер соответствующей таблицы, получаем требуемый результат, который может быть записан в текстовый файл и импортирован в расчётную модель Nastran с помощью функции *include*.

Описанные выше программы-функции могут применяться для быстрого перевода любых табличных данных в формат Nastran.

Разработанная методика применения линейного динамического расчёта для случая «Старт» может быть использована для подтверждения достоверности подходов, применяемых к созданию расчётной модели, предназначенной для проведения нелинейного анализа, путём сравнения результатов, полученных с помощью двух указанных подходов.

### Литература

1. Кармишин А.В., Лиходед А.И., Паничкин Н.Г., Сухинин С.Н. Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций. М.: Машиностроение, 2007. 480 с.
2. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики. СПб., М., Краснодар.: Лань. 2007. 729 с.
3. MSC.NASTRAN – Quick Reference Guide. Файл документации.
4. Автоматизация обработки результатов конечно-элементного анализа нагружения конструкций ракетно-космической техники // Сборник статей VII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов Центра управления полётами. – г. Королёв, М.О.: ЦНИИМаш, 2017. – С. 427-434