

AUS DER ERFAHRUNG DER ANALYSE VON BEANSPRUCHUNGSKRITERIEN

T. K. Zabolotskih

Ziel der Arbeit ist es, die Anwendbarkeit des reduzierten Modells eines Raumfahrzeugs für die Fernerkundung der Erde zur Berechnung von Belastungen am Beispiel von AIST-2D zu bestätigen. Es wurde das dynamische Reduktionsverfahren für das AIST-2D-Raumschiff berücksichtigt. Das Raumschiff wurde um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduziert. Eine Analyse ihrer eigenen Schwingungen, deren Formen und Frequenzen wurde durchgeführt. Die Ergebnisse von statischen und dynamischen Belastungen wurden für ein Finite-Elemente-Modell erhalten, das um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduziert wurde. Die Berechnungen wurden mit der MSC NASTRAN-Software und dem Computerkomplex durchgeführt.

Stichworte: der FEM, das reduziertes Modell, das Raumschiff, die Reduktion.

Derzeit werden Modelle mit einer sehr großen Anzahl von Freiheitsgraden zur Berechnung komplexer Systeme nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Sehr oft erreichen ihre Dimensionen bis zu mehreren Millionen Freiheitsgraden. Es ist ratsam anzunehmen, dass das Spektrum dieser mathematischen Modelle die gleiche Anzahl von Eigenschwingungen aufweist. Für praktische Berechnungen sind jedoch in den meisten Fällen nur die niedrigeren Frequenzen innerhalb eines bestimmten Bereichs von Bedeutung. Aus diesem Grund bleibt das Problem des Reduzierens des ursprünglichen Modells relevant, um Zeit zu sparen, die für digitale Berechnung eines bestimmten Komplexes aufgewendet wird.

In diesem Artikel betrachten wir das Finite-Elemente-Modell des Raumfahrzeugs AIST-2D. Das dynamische Reduktionsverfahren wird im Rahmen von MSC.NASTRAN angewendet.

Im ersten Teil werden der Begriff und das Finite-Elemente-Modell des Raumfahrzeugs AIST-2D erörtert. Strukturelemente werden auch in den Knoten beschrieben, deren Ergebnisse gesteuert werden.

Der zweite Teil analysiert und testet das vollständige Finite-Elemente-Modell des AIST-2D-Raumfahrzeugs unter statischen und dynamischen Belastungen am Eingang zum Raumfahrzeug.

Im dritten Teil wird das Finite-Elemente-Modell des Raumfahrzeugs AIST-2D anhand der Methode der dynamischen Reduzierung um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduziert. Reduzierte Modelle werden auch analysiert und geprüft. Die um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduzierte Modelle wurden statisch und dynamisch belastet.

Der vierte Teil enthält eine Vergleichsanalyse des Finite-Elemente-Modells des Raumfahrzeugs, das um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduziert wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden das KEM-Raumfahrzeug und reduzierte Modelle analysiert und getestet. Das Korrelationsmuster der erhaltenen Ergebnisse für die angegebenen Varianten des dynamischen Modells wurde nachgewiesen.

1 Kleines Raumschiff AIST-2D

Betrachten wir das AIST-2D, ein Raumschiff für die Fernerkundung der Erde (Abb.1).

Das optisch-elektronische Raumschiff AIST-2D wurde von den Wissenschaftlern der Nationalen Forschungsuniversität Samara entwickelt. Es wird für die Fernerkundung der Erde, wissenschaftliche Experimente, zum Testen und Zertifizieren neuer Ziel- und wissenschaftlicher Geräte, unterstützender Systeme und ihrer Software bestimmt [1].



Abb. 1. Gesamtbild AIST-2D

Tabelle 1

Eigenfrequenzen einer freien Konstruktion

Frequenzenreihenfolge	Frequenz, Hz
1	3,22E-04
2	2,32E-04
3	1,16E-04
4	1,37E-04
5	3,79E-04
6	4,71E-04
7	1,06E+01
8	1,15E+01
9	1,62E+01
10	2,01E+01

Die Fernerkundung der Erde zielt auf Beobachtung und Überwachung der Erde, und trägt dazu bei, ihre Ressourcen effizient zu nutzen und zu verwalten. Man kann auch Naturkatastrophen vorhersagen, beobachten und bewerten, darunter Vulkanausbrüche, Waldbrände, Überschwemmungen, Hurrikane usw.

Fernerkundungstechnologien sind auch für die Landwirtschaft erforderlich.

Die meisten Fernerkundungsdaten bestehen aus Bildern, die es ermöglichen, Informationen über ein Objekt in Form von Bildern in digitaler oder analoger Form zu erhalten [2].

2 Berechnung des vollständigen Finite-Elemente-Modells AIST-2D

2.1 Analyse und Prüfung des vollständigen Finite-Elemente-Modells. Eine Modalanalyse wird durchgeführt, um die Frequenzen und Formen natürlicher Schwingungen von Strukturen zu bestimmen. Die Modalanalyse kann auch

der erste Schritt für andere Arten der dynamischen Analyse sein, wie z. B. Transientenanalyse, Oberschwingungs- und Spektralanalyse. Die Modalanalyse geht davon aus, dass das System linear ist. Kontakte bleiben je nach Ausgangszustand offen oder geschlossen. Es wird angenommen, dass externe Kräfte und Dämpfungen gleich Null sind [3].

Eine Modalanalyse wurde mit dem Ziel durchgeführt, Frequenzen und Formen der natürlichen Schwingungen der Struktur zu bestimmen. Tabelle 1 zeigt die ersten 10 Frequenzen.

2.2 Statische Belastung. Eine Belastung, deren Größe, Richtung und Anwendungspunkt sich im Laufe der Zeit geringfügig ändern, wird als statistische Belastung bezeichnet. Beschleunigungen der Partikel aus der statischen Belastung sind gering, und daher können die daraus resultierenden Trägheitskräfte vernachlässigt werden. Abb. 2 zeigt einen Zeitplan der statischen Belastung [4].

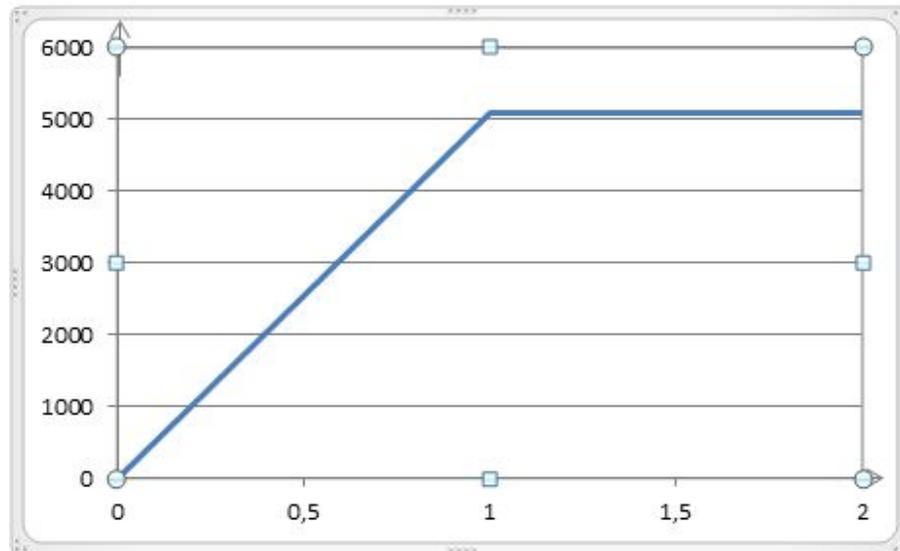


Abb. 2. Statische Belastung

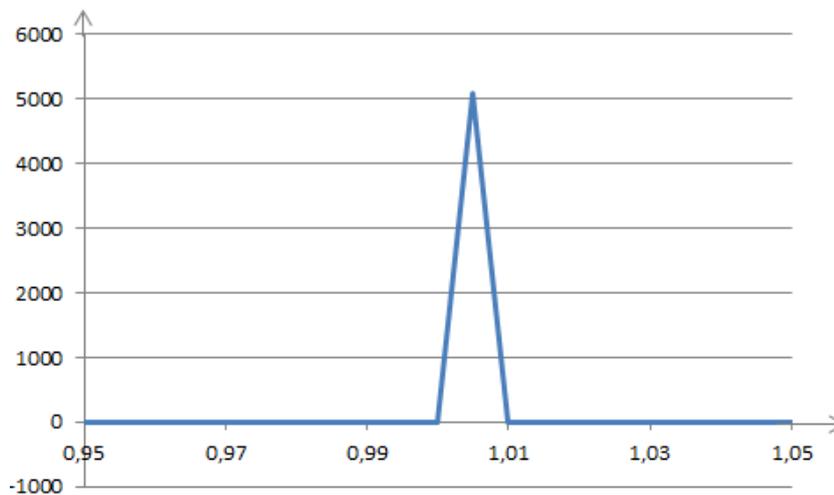


Abb. 3. Dynamische Belastung

Wenn dieser Prozess am Eingang des Raumfahrzeugs entsteht, erhält man Verschiebungen zum Zeitpunkt 2 s in dem Element, das die Kopplung des Raumfahrzeugs mit dem Adapter simuliert.

2.3 Dynamische Belastung. Eine Belastung, deren Wert, Richtung oder Angriffspunkte sich zeitlich sehr schnell ändern und Trägheitskräfte in den Strukturelementen verursachen, wird als dynamische Belastung bezeichnet.

Bei der Berechnung brauchen wir die Anwendung einer dynamischen Belastung, um die erforderliche strukturelle Festigkeit festzustellen und signifikante Deformationen zu verhindern [4].

Unter dynamischer Belastung wird jedes Strukturelement zu jedem Zeitpunkt betrachtet, als ob es sich im Gleichgewicht befindet, sogar wenn äußere Kräfte wirken, d.h. benachbarte

Elemente und Trägheitskräfte. Abb. 3 stellt eine dynamische Belastung grafisch dar.

3 Verfahren zur dynamischen Reduzierung von KEM AIST-2D

3.1 Dynamische Reduzierung oder Craig-Bampton-Methode. Dynamische Reduzierung ist ein numerisches Verfahren, mit dem MSC.NASTRAN dynamische detaillierte FEM bis ein Modell mit weniger Freiheitsgraden reduzieren kann [5].

3.2 Reduzierung des Modells um 10 Frequenzreihenfolgen. Wir reduzieren FEM AIST-2D um 10 Frequenzreihenfolgen auf einem Knoten. Bei der Reduktion erhielten wir eine Beschleunigungs-Transformations-Matrix und eine Verschiebungs-Transformations-Matrix für drei interne Knoten.

```

      16      16      6      2КАА      1P,3E22.15
      1      1      1
4. 320765705773184E+03
      2      2      1
5. 061323116220437E+03
      3      3      1
1. 029770151534123E+04
      . . . . .
      16      11      6
3. 487926020202606E-04-1. 628159948279695E-03 4. 074636094209341E-05
3. 634092142564480E-04 1. 373872876440311E-04-2. 685546875000000E-03]
    
```

Abb. 4. Steifheitsmatrix

```

1.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 4.787142604040819E-02 2.958594386843092E+00
5.852901754764422E-02-4.314715874103471E-01-1.065959391685502E-01
5.922991722629622E+00
      2      2      15
1.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
-3.989002303242699E-02-2.652049376477495E+00 4.732196516109718E-02
3.544305514994970E-01-1.074618770046161E-01-5.139708667425523E+00
      . . . . .
      16      1      16
5.922991722629622E+00-5.139708667425523E+00-2.422410086924442E+00
2.829535533965699E+01-1.961816459474781E+00-4.996802913451958E-02
-1.201651594123151E-01 5.620486345921937E-02 3.911374758665976E+00
7.124470038303413E-01 1.768840622846549E+00 5.763410835111962E+02
-9.783662686362831E-09-2.213903618230048E+00 6.200648040446716E+00
8.959576708427732E+02
    
```

Abb. 5. Massenmatrix

```

      16      24      2      2MUG1      1P,3E22.15
      1      1      18
2.472218766342849E-04 3.428714815527201E-03-2.243202470708638E-05
-3.261793754063547E-04 1.161623222287744E-04 2.588882111012936E-03
-1.969882659614086E-02 6.310737691819668E-03 7.468077092198655E-05
1.429972122423351E-03-6.490223854780197E-02 1.419472992420197E-01
2.288099192082882E-02 5.613610148429871E-03-3.856734838336706E-04
-2.772055158857256E-04 2.965741045773029E-02 2.968567982316017E-02
      2      1      18
-2.973114605993032E-04-3.491787705570459E-03 1.709485804894939E-04
3.949652309529483E-04-2.495109220035374E-04-2.626414177939296E-03
2.633567666634917E-03-5.346699152141809E-03 1.363100018352270E-04
4.485160752665251E-04-8.933375589549541E-03-3.482327796518803E-03
-1.769110560417175E-02-5.571631249040365E-03 3.617439360823482E-04
2.860635577235371E-04-2.301432006061077E-02-2.493839897215366E-02
      . . . . .
      16      1      24
9.799999743700027E-02 1.352200031280518E+00-1.802391569327710E-11
-3.014727356642766E-11 2.577937863179613E-12 1.000000000000000E+00
-6.029260158538818E-01 2.009999990463257E+00-2.857588471405492E-11
-2.536691516563661E-11 8.054038685978426E-11 1.000000000000000E+00
2.038930058479309E-01 2.045500040054321E+00-2.986887646938552E-12
-2.241918282963606E-11-1.667444238240279E-10 1.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00 1.000000000000000E+00
    
```

Abb. 6. Beschleunigungs-Transformations-Matrix

```

      16      6      2      2MEF1      1P,3E22.15
      1      1      6
-2.068412170410156E+02-1.278339355468750E+04-2.528901672363281E+02
 1.864287597656250E+03 4.605760803222656E+02-2.559185937500000E+04
      2      1      6
 2.018963012695312E+02 1.342287890625000E+04-2.395117492675781E+02
-1.793887573242188E+03 5.438992919921875E+02 2.601372656250000E+04
      .      .      .      .      .
      16      1      6
 3.487926151137799E-04-1.628159894607961E-03 4.074635944562033E-05
 3.634092281572521E-04 1.373872946714982E-04-2.664535306394100E-03

```

Abb. 7. Belastungs-Transformations-Matrix

Tabelle 2

MTZE des um 10 Frequenzreihenfolgen reduzierten Modells

Masse, kg	X, m	Y, m	Z, m	$I_x, kg \cdot m^2$	$I_y, kg \cdot m^2$	$I_z, kg \cdot m^2$
509,8	1,13	0,00	0,00	124	885	896

Tabelle 3

Resultierender Verschiebungsvektor für die Zeit $t = 2$ s

F_x	1864,31
F_y	0,66
F_z	32,59
M_x	2,46
M_y	-16,06
M_z	0,49

Wir bekommen eine Massenmatrix und eine Steifheitsmatrix. Die Matrixdaten werden im Format der Nastran-Software und des Computerkomplexes aufgezeichnet. Die Matrixdaten sind in Abb. 4 ... 7 dargestellt.

3.3 Analyse und Prüfung des reduzierten Modells um 10 Frequenzreihenfolgen. Um das reduzierte Modell zu verifizieren, wurde eine Modalanalyse durchgeführt, um Frequenzen und Formen natürlicher Schwingungen von Strukturen zu bestimmen.

Überprüfung des reduzierten Modells des AIST-2D-Raumfahrzeugs zeigt, dass die Hauptmerkmale (Masse, Trägheitsmomente, Schwerpunktkoordinaten, niedrigere Eigenfrequenzen) den Merkmalen des KEM-Raumfahrzeugs ähnlich sind.

Die wichtigsten Massenträgheits- und Zentrierungseigenschaften des Raumfahrzeugs in Bezug auf das Stoßelement sind in Tabelle 2 dargestellt.

3.4 Statische Belastung des um 10 Frequenzreihenfolgen reduziertes Modells. Wir belasten das um 10 Frequenzreihenfolgen reduzierte Modell so, wie es in 2.2., Abb. 16 beschrieben wurde. Wir ermitteln einen Spaltenvektor der Lösung für die Zeit $t = 2$ s. Die Zeit $t = 2$ s wird aus dem Zustand der stationären Schwingungen des Systems nach Erreichen des erforderlichen Modus entnommen. Die Kraft ist statisch, aber die Aufgabe wird in einer dynamischen Variante mit Zugriff auf den erforderlichen Modus von 5098 H im Zeitintervall von 0 - 1,00 s gelöst. Als Ergebnis erhalten wir einen Spaltenvektor für die Zeit $t = 2$ s.

Die Verschiebungen in den internen Knoten der Struktur entstehen, indem die Krafttransformationsmatrizen links mit dem Spaltenvektor der Lösungen der Differentialbewegungsgleichung für die Zeit $t = 2$ s multipliziert werden.

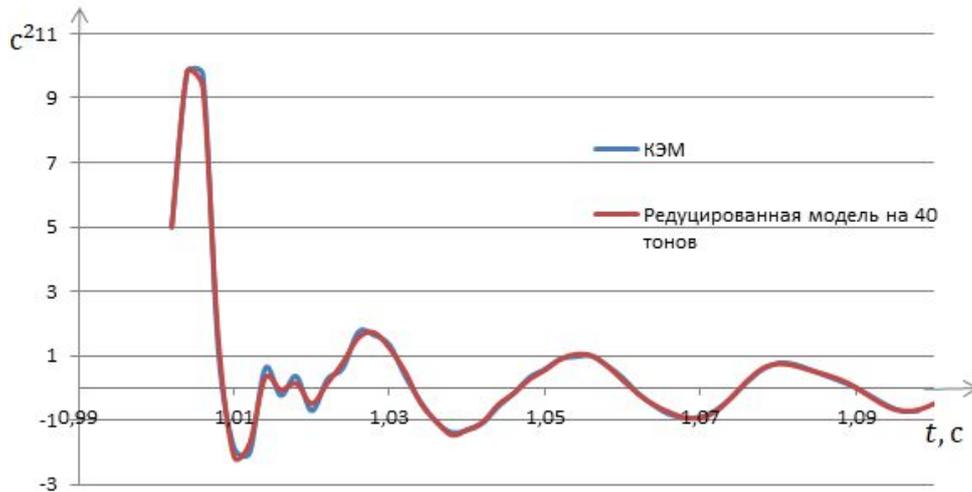


Abb. 8. Beschleunigungsdiagramm von FEM und des um 40 Frequenzreihenfolgen reduziertes Modells

Wenn wir die Matrizen multiplizieren, ermitteln wir einen resultierenden Verschiebungsvektor, der in Tabelle 3 dargestellt ist.

Basierend auf einer vergleichbaren effektiven Gesamtmasse für alle Freiheitsgrade können wir schließen, dass das erhaltene Modalmodell korrekt ist.

$$F_x = 1864,31 \text{ H};$$

$$P = 5098 \text{ H};$$

$$\frac{F_x}{P} \cdot 100 \% = \frac{1864,31}{5098} \cdot 100 \% = 36,57 \%,$$

dabei ist P das Gewicht des Raumfahrzeugs; 36,57 % ist die Summe der effektiven Massen.

3.5 Dynamische Belastung des um 10 Frequenzreihenfolgen reduziertes Modells.

Wir belasten das um 10 Frequenzreihenfolgen reduzierte Modell so, wie es in 2.3., Abb. 18 beschrieben wurde. Wir ermitteln einen Spaltenvektor der Lösung für jeden Zeitpunkt, von 1 Sekunde bis 1,1 Sekunden.

Die Beschleunigung in den internen Knoten der Struktur ermitteln wir, indem wir die ATM-Matrizen (Acceleration Transformation) auf der linken Seite mit den Spaltenvektoren der Lösungen in Bewegungsgleichungen für jeden Zeitpunkt multiplizieren, beginnend mit 1–1,1 Sekunde mit Schritten von 0,002 Sekunden, d.h. nur 50 Werte.

Beim Multiplizieren ermitteln wir einen resultierenden Beschleunigungsvektor.

Eine ähnliche Arbeit wurde für das um 40 Frequenzreihenfolgen reduziertes Modell durchgeführt.

4 Vergleichende Analyse der Berechnungsergebnisse. Abb. 8 zeigt ein Beschleunigungsdiagramm des KEM, eines um 10 und 40 Frequenzreihenfolgen reduzierten Raumfahrzeugmodells.

Zusammenfassung

Aus der durchgeführten Arbeit ging hervor, dass das vollständige Finite-Elemente-Modell des Raumfahrzeugs und das reduzierte Modell des Raumfahrzeugs miteinander übereinstimmen und ein ähnliches dynamisches Verhalten aufweisen.

Folgende Anwendbarkeitskriterien wurden nachgewiesen:

1. Die Hauptmerkmale der reduzierten Modelle ähneln den Merkmalen des FEM-Raumfahrzeugs.

2. Die Bewegung des um 10 Frequenzreihenfolgen reduzierten Modells unter einer statischen Belastung stimmte mit der FEM um 35 % überein.

3. Die Bewegung des um 40 Frequenzreihenfolgen reduzierten Modells unter einer statischen Belastung stimmte mit der FEM um 95 % überein.

4. Die Beschleunigung des um 10 Frequenzreihenfolgen reduzierten Modells unter einer dynamischen Belastung stimmte mit der FEM um 56 % überein.

5. Die Beschleunigung des um 40 Frequenzreihenfolgen reduzierten Modells unter einer dynamischen Belastung stimmte mit der FEM um 95 % überein.

6. Die Gültigkeit der dynamischen Reduktionsmethode wurde nachgewiesen. Diese Methode ist relevant.

Schriftenverzeichnis

1. Opy`tno-technologicheskij maly`j kosmicheskij apparat «AIST – 2D» / A. N. Kirillin, R. N. Axmetov, E. V. Shaxmatov [et al.]. Samara: Izd-vo SamNCz RAN, 2017. 324 s.
2. Suty`rina E. N. Distancionnoe zondirovanie zemli : ucheb. Posobie. Irkutsk: Izd-vo IGU, 2013. 165 s.
3. Leont`ev N. V. Primenenie sistemy` ANSYS k resheniyu zadach modal`nogo i garmonicheskogo analiza: Uchebno-metodicheskij material po programme povu`sheniya kvalifikacii «Informacionny`e sistemy` v matematike i mexanike». Nizhnij Novgorod, 2006. 101 s.
4. Ry`chkov S. P. MSC. Visual Nastran dlya Windows. M.: NT Press, 2004. 552 s.
5. Zhidyaev K. A. Ispol`zovanie metoda dinamicheskogo sinteza (Krejga-Bemptona) v MSC. NASTRAN [E`lektronny`j resurs]: Metodicheskie materialy` MSC.Software. 1999. 23 s.

ИЗ ОПЫТА АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ НАГРУЖЕНИЯ

Т. К. Заболотских

Целью работы является подтверждение применимости редуцированной модели космического аппарата дистанционного зондирования Земли для расчёта нагрузок на примере АИСТ-2Д. В ходе работы рассмотрена процедура динамической редукции космического аппарата АИСТ-2Д. Космический аппарат был редуцирован на 10 и на 40 тонов колебаний. Был проведен анализ собственных форм и частот колебаний. Были получены результаты усилий и ускорений от статической и динамической нагрузок для конечно-элементной модели, редуцированной на 10 и 40 тонов колебаний. Расчёты проводились с использованием программно-вычислительно комплекса MSC. NAS-TRAN.

Ключевые слова: КЭМ, редуцированная модель, космический аппарат, редуцирование.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.