

**Заключение.** Таким образом, разработанная программная система “Solo-Mid” обеспечивает выполнение визуализации первичной информации, полученной в ходе выполнения практического эксперимента по исследованию процесса механических воздействий на стержневые и пластинчатые конструкции РТУ, что обеспечивает ясность представления выбранных проектных решений и позволяет более глубоко понять системные связи проектируемых РТУ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юрков Н.К. Машинный интеллект и обучение человека. – Пенза: ИИЦ Пенз. гос. ун-та, 2008. – 226 с.
2. Юрков Н.К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы. – Пенза, 2010. – 304 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Белевцев.

**Ольхов Даниил Вадимович** – Пензенский государственный университет; e-mail: 552480265@qip.ru; 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40; тел.: 88412560863; кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; студент.

**Затылкин Александр Валентинович** – e-mail: al.zatytkin@yandex.ru; кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; старший преподаватель.

**Юрков Николай Кондратьевич** – e-mail: yurkov\_nk@mail.ru; кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Olhov Daniil Vadimovich** – Penza State University; e-mail: 552480265@qip.ru; 40, Red street; Penza; 440026; Russia; phone: +78412560863; the department of designing and radio equipment manufactures; student.

**Zatytkin Alexander Valentinovich** – e-mail: al.zatytkin@yandex.ru; the department of designing and radio equipment manufactures; senior teacher.

**Yurkov Nikolay Kondratyevich** – e-mail: yurkov\_nk@mail.ru; the department of designing and radio equipment manufactures; chief of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.5.03.23

**П.Н. Цибизов, П.Г. Михайлов, Т.В. Астахова, Д.А. Тютюников**

#### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

*Рассмотрены вопросы применения квалиметрического подхода при разработке моделей датчиков физических величин. При разработке моделей качества использованы методы квалиметрии и математический аппарат теории множеств, с помощью которых представлены основные показатели качества датчиков физических величин. При составлении моделей датчиков на основе квалиметрического подхода показано, что для аэродинамических испытаний маломасштабных моделей ракетно-космической и авиационной техники наиболее важными техническими характеристиками датчиков, определяющими информативность измерения акустических полей и полей пульсаций давлений, является частотный диапазон датчиков и их резонансная частота. Для других областей, к примеру, орбитальные космические аппараты, важными являются эксплуатационные и некоторые конструктивные характеристики.*

*В качестве примера приведены и использованы единичные показатели моделей качества для датчиков динамических давлений, используемых при стендовых и летных испытаниях изделий ракетно-космической техники.*

*Разработка моделей; датчик; качество; квалиметрический подход; оценочный критерий.*

**P.N. Tsibizov, P.G. Mihailov, T.V. Astakhova, D.A. Tutunikov**

### **MODELLING SENSORS BASED APPROACH QUALIMETRIC**

*The questions of qualimetric approach to the modeling of sensors of physical quantities. In the development of quality models used qualimetry methods and mathematical tools of set theory in which the main indicators of the quality of sensors of physical quantities. In drawing up the model-based sensor qualimetric approach shows that for aerodynamic testing of small-scale models of rocket and space and aviation technology the most important technical characteristics of sensors that determine the information content of the measurement of acoustic fields and pulsations of pressure is the frequency range of sensors and their resonant frequency. For other areas, for example, orbital space vehicles, are important operating and some design features. As an example, are given and used single indicators of quality models for the dynamic pressures sensors used in the bench and flight testing of products of rocket and space technology.*

*Modelling; sensor; quality; qualimetric approach; estimation criterion.*

Моделирование является эффективным методом исследования и оптимизации технических параметров сложных устройств. При этом в сложных объектах целесообразно проводить разработку уровневых моделей, охватывающих отдельные подсистемы устройства. Верхним уровнем системы таких моделей являются модели качества (МК), которые описывают наиболее общие характеристики (числовые и семантические) объекта, связанные определенными математическими зависимостями.

При разработке МК целесообразно использовать методы квалиметрии и математический аппарат теории множеств, с помощью которых можно компактно и достаточно информативно представить основные показатели качества различных объектов, в том числе и датчиков физических величин (ДФВ).

В МК отображаются частные и интегральные критерии эффективности того или иного объекта. В частности, в МК ДФВ, наряду с метрологическими, учитываются также эксплуатационные, конструктивные и технологические показатели [1, 2].

Категория «Качество датчика» является абстрактной величиной, которую количественно можно выразить только приближенно, ввиду вероятностного характера составляющих его элементов множеств и ограниченности характеристик описывающих свойства датчиков [3].

При рассмотрении критериев качества удобно использовать форму представления МК в виде функционала [4]:

$$R = F(A_i^{\gamma_i} i), \quad (1)$$

где  $F$  – преобразующая функция;  $A_i$  – элемент множества информационно-энергетических и конструктивных характеристик;  $\gamma_i$  – коэффициенты весомости (значимости) параметра  $A_i$ .

Принятая мультипликативная форма функционала может быть представлена

$$R = (A_1^{\gamma_1} \cdot A_2^{\gamma_2} \cdot \dots \cdot A_n^{\gamma_n}) = \sum(A_i^{\gamma_i} i). \quad (2)$$

Конкретные числовые значения элементов массивов  $A$  и  $\Gamma$  ( $A_i \in A$ ,  $\gamma_i \in \Gamma$ ) получают применительно к каким-либо конкретным типам датчиков, исходя из анализа результатов испытаний, заключения эксплуатационников и т.д.

Так, применительно к датчикам динамических давлений (ДДД) на основе данных, полученных при стендовых и полигонных испытаниях и из анализа технических требований заказчиков изделий ракетно-космической (РКТ) и летной техники (ЛТ), были сформированы массивы  $A$  (41 элемент) и  $\Gamma$  (219 элементов). При этом применение ДДД анализировалось в следующих областях [5, 6]:

- ◆ стендовые испытания масштабных моделей РКТ и ЛТ (продувки в трубах, испытания в аэрогазодинамических установках и т.п.);

- ◆ натурные испытания изделий РКТ;
- ◆ эксплуатация в составе штатных изделий РКТ (одноразовые изделия);
- ◆ эксплуатация в составе орбитальных космических объектов;
- ◆ многоразовые ракетно-космические системы;
- ◆ объекты народного хозяйства (комплексы для диагностики авиадвигателей);
- ◆ большие акустические камеры для испытания бортовой и наземной радиоэлектронной аппаратуры специального назначения на акустическую устойчивость.

Каждому элементу  $\gamma_i$  для указанных выше семи областей применения ДДД присваивается численный эквивалент от  $-1$  до  $+1$  в зависимости от весомости значения  $A_i$  для конкретной области применения. При этом тем характеристикам качества, которые способствуют увеличению качества  $|R \uparrow|$ , присваивается положительный знак, а тем, которые приводят к ухудшению качества  $|R \downarrow|$ , – отрицательный. Те характеристики, которые наиболее важны в заданной области, имеют и max/min ранг, равный  $\pm 1$ .

Так, например, для аэродинамических испытаний маломасштабных моделей РКТ и ЛТ наиболее важными техническими характеристиками (ТХ) датчиков, определяющими информативность измерения акустических полей и полей пульсаций давлений, является частотный диапазон датчиков и их резонансная частота, поэтому данным ТХ присваивается ранг  $+1$ . Показатель объема при этом принимают за  $-1$ .

Другие же ТХ (ресурс работы, вероятность безотказной работы, потребляемая мощность и т.д.) ранжируются в пределах от  $-0,1 \dots 0,2$ , так как они не имеют определяющего влияния на информативность испытаний. Прочие ТХ: время готовности, время хранения и ряд других в данном случае не имеют влияния на результаты испытаний и ранжируются нулем, превращая данную ТХ в выражении (2) для  $R$  в единицу.

Для других областей применения ДДД более важны иные ТХ. Так, для ДФВ, используемых в орбитальных космических аппаратах, наиболее важными являются эксплуатационные и некоторые конструктивные характеристики, а наименее важными служат входное и выходное сопротивление, цена. Кроме того, для изделий РКТ и ЛТ такие характеристики качества, как диапазон питающих напряжений, взаимозаменяемость и цена, имеют или нулевой ранг, или достаточно малый (для цены), что объясняется наличием стандартных бортовых напряжений, уникальностью и дороговизной самих объектов.

В противовес этому, для общепромышленных областей, таких как автомобилестроение, малая авиация, взаимозаменяемость и цена имеют значительно большую весомость, чем для областей РКТ и ЛТ.

В синтезе МК важное значение имеет процедура масштабирования характеристик  $A_i$ , имеющих различный порядок числовых значений. Особенно характерно это для ДФВ, у которых основная погрешность имеет значение  $\approx 10^{-2} \dots 10^{-1}$ , а диапазон частот и давлений, а также ресурс  $\approx 10^3 \dots 10^4$  и более. Поэтому для нормирования  $A_i$  предлагается смешанное масштабирование, в частности для  $A_i$ , имеющих или малую, или, наоборот, большую величину, применимо логарифмическое масштабирование:

- ◆ для надежности  $p$ :  $-1/\ln A_i$  ;
- ◆ для погрешностей  $\sigma$  и неравномерности амплитудно-частотной характеристики ( $\beta$ ):  $-1/\ln[1 - A_i]$  ;
- ◆ для ресурса работы  $T_0$ , диапазонов давлений  $\Delta P$ , частот  $\Delta f$  и температур  $\Delta t$ :  $-1/\ln[1 - 1/A_i]$  ;

- ◆ для сопротивления изоляции  $R_{из}$  и времени хранения  $t_{хр}$ :  $-\ln A_i$ ;
- ◆ для остальных  $A_i$  вполне приемлемо линейное масштабирование.

С помощью введенных соотношений могут быть получены некоторые частные критерии эффективности, в частности, такие как конструктивно-ценовой ( $R_{КЦ}$ ), габаритно-весовой ( $R_{ГВ}$ ), критерий комплексной устойчивости датчика ( $R_{КУ}$ ) и т.д., которые удобно использовать при оценке тех ДФВ, по которым нет достаточной информации.

В частности, для микроэлектронных датчиков, используемых при аэродинамических испытаниях маломасштабных изделий РКТ и ЛТ, указанные критерии могут быть представлены следующим образом:

$$R_{ГВ} = V^{-1} m^{-0,6}; \quad (3)$$

$$R_{КЦ} = V^{-1} m^{-0,6} \Pi^{-0,2}; \quad (4)$$

$$R_{КУ} = V^{-0,1} \cdot K_{рсм}^{-0,4} \cdot K_{i^0}^{-0,6} \cdot K_E^{-0,1} \cdot KH^{-0,1} \cdot CP_{CB}^{0,2} \cdot a_B^{0,2} \cdot a_y^{0,2} \cdot K_{CT}^{0,2} \cdot K_{AK}^{0,1} \cdot K_{AG}^{0,2}. \quad (5)$$

Еще один пример, но уже обобщенного критерия эффективности, для пьезоэлектрических датчиков, используемых в составе автоматизированных систем испытания радиоэлектронной аппаратуры ЛТ на акустическую устойчивость:

$$\begin{aligned} R7 = & \left[1/\ln(1-1/\Delta P)\right]^{0,3} \left[1/\ln(1-1/\Delta f)\right]^{-0,2} \left[1/\ln(1-\sigma_0)\right]^{0,8} \times \\ & \times S^{0,5} \left[1/\ln(1-\beta)\right] U_{Вmax}^{0,5} \cdot \left[1/\ln(1-1/T_0)\right]^{0,8} \left[1/\ln P\right]^{0,5} \left[1/\ln(1-1/f_0)\right]^{0,5} \times \\ & \times U_{III}^{-0,2} \cdot t_H^{0,6} \cdot K_{CT}^{0,8} \cdot K_{B3}^{0,4} \cdot \Pi^{-0,4}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из недостатков мультипликативной формы МК можно выделить сложность анализа и оптимизации отдельных составляющих модели.

Наряду с мультипликативной формой МК, на практике широко используется аддитивная форма, примером которой может служить критерий оценки качества измерительных приборов [7]:

$$\Psi_H(l) = \sum_1^n M_{il} C_{il}, \quad (7)$$

где  $\Psi_H$  – функция качества,  $M_{il}$ ,  $C_{il}$  – неявные оценочные критерии, первый из которых – нормированный коэффициент важности  $i$ -го параметра, а второй – дифференциальный коэффициент качества. Еще один характерный пример аддитивной формы – комплексный показатель качества аппаратуры  $Q_A$  [8]:

$$Q_A = \sum_1^m KB_i q_i / m, \quad (8)$$

где  $KB_i$  – групповой весовой коэффициент,  $q_i$  – групповой показатель качества,  $m$  – число показателей.

Недостатками аддитивной формы МК является необходимость расчета нормирующих коэффициентов (эквивалентов), связывающих отдельные показатели между собой (например, стоимость 1 кг или 1 см<sup>3</sup> выводимого на орбиту груза, материалоемкость и т.п.), что само по себе представляет сложную задачу, которую при большом числе характеристик качества практически невозможно разрешить.

Положительной же стороной аддитивной формы являются наглядность ее составляющих, что позволяет успешно проводить ее оптимизацию.

С другой стороны, мультипликативную форму можно преобразовать в аддитивную путем разложения в ряд:

$$K = \prod_1^l q_i^{\gamma_i} \approx 1 + \sum_1^l (q_i - 1) \gamma_i. \quad (9)$$

Из анализа различных форм МК можно сделать вывод, что мультипликативная форма является наиболее удобной при оценке эффективности ДФВ.

В качестве примера приводим единичные показатели МК для ДДД, используемых при стендовых и летных испытаниях изделий РКТ (элементы массива А), которые были получены на основе анализа технических заданий на разработку ДДД, протоколов результатов испытаний, каталогов измерительной аппаратуры отечественных и зарубежных изготовителей [1,5,6].

Такими основными показателями (единичными критериями) качества являются:  $A_1$  – диапазон акустических давлений ( $\Delta P_{ак}$ );  $A_2$  – диапазон рабочих частот ( $\Delta f$ );  $A_3$  – основная погрешность ( $\sigma_0$ );  $A_4$  – дополнительная погрешность ( $\sigma_d$ );  $A_5$  – виброэквивалент ( $V$ );  $A_6$  – диапазон рабочих температур ( $\Delta t_p^\circ$ );  $A_7$  – максимальная рабочая температура ( $t_{max}^\circ$ );  $A_8$  – чувствительность ( $S$ );  $A_9$  – неравномерность АЧХ ( $\beta$ );  $A_{10}$  – уровень выходного сигнала ( $U_{вых}$ );  $A_{11}$  – потребляемая мощность ( $W_n$ );  $A_{12}$  – ресурс работы ( $T_0$ );  $A_{13}$  – вероятность безотказной работы ( $p$ );  $A_{14}$  – объем ( $V$ );  $A_{15}$  – масса ( $m$ );  $A_{16}$  – коэффициент влияния статического давления ( $K_{p,ст.}$ );  $A_{17}$  – коэффициент влияния температуры ( $K_t^\circ$ );  $A_{18}$  – сопротивления изоляции ( $R_{из}$ );  $A_{19}$  – резонансная частота ( $f_0$ );  $A_{20}$  – виброустойчивость ( $a_v$ );  $A_{21}$  – перегрузочная способность ( $K_{пр}$ );  $A_{22}$  – коэффициент унификации и стандартизации ( $K_{ц}$ );  $A_{23}$  – цена ( $Ц$ ).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов П.Г. Разработка моделей качества датчиков физических величин // Контроль и диагностика. – 2003. – № 9. – С. 23-26.
2. Михайлов П.Г., Михайлов А.П. Контроль и диагностика чувствительных элементов датчиков // Контроль и диагностика. – 2003. – № 10. – С. 28-31.
3. Андрианов Ю.М., Субето Р.И. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1990.
4. Михайлов П.Г., Чернецов М.А. Разработка моделей качества датчиков физических величин // Надежность и качество. Труды международного симпозиума. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011.
5. Михайлов П.Г., Михайлова В.П., Лапшин И.О. Датчики для ракетно-космической и авиационной техники // Авиакосмическое приборостроение. – 2010. – № 3. – С. 16-21.
6. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник / Под ред. Е.Е. Багдайева, А.В. Гориша, Я.В. Малкова: В 2 т. – М.: ИПРЖР, 1998.
7. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968.
8. Игнатов А.И. Микроэлектронные устройства связи и радиовещания. – Томск: Радио и связь, 1990.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

**Цибизов Павел Николаевич** – ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко»; e-mail: paul-startatom@yandex.ru; 442960, Пензенская обл., г. Заречный, пр. Мира, 1; тел.: 88412582810; заместитель начальника научно-технического отдела.

**Михайлов Петр Григорьевич** – e-mail: p1otr110mpg@mail.ru; заместитель начальника отдела; д.т.н.; профессор.

**Тютюников Дмитрий Александрович** – e-mail: tyutyunikov@mail.ru; инженер.

**Астахова Татьяна Валерьевна** – ОАО «НИИФИ»; e-mail: tani2104@mail.ru; 440026, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10; тел.: 88412591987; инженер.

**Tsibizov Pavel Nikolaevich** – Federal State Unitary Enterprise Federal Research and Production Center Production Complex Start named after M.V. Protsenko; e-mail: paul-startatom@yandex.ru; 1, Mira prospekt, Zarechny, Penza Region, 442960; phone: +78412582810; deputy head of science and technology department.

**Mihailov Petr Grigoryevich** – e-mail: p1otr110mpg@mail.ru; deputy head; dr. of eng. sc.; professor.

**Tutunikov Dmitry Aleksandrovich** – e-mail: tyutyunikov@mail.ru; engineer.

**Astakhova Tatiana Valeryevna** – Limited Liability Company «Research Institute of Physical Measurements»; e-mail: tani2104@mail.ru; 8/10, Volodarskogo street, Penza, 440026; phone: +78412591987; engineer.

УДК 629.7.028.6

**Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко**

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АНТЕННА–ОБТЕКАТЕЛЬ**

*Выполнено моделирование характеристик антенны, укрытой обтекателем. Задача анализа системы антенна–обтекатель является достаточно сложной и многопараметрической. Антенные обтекатели имеют большие электрические размеры, что определяет выбор метода анализа таких структур. В статье рассмотрены вопросы моделирования системы обтекатель–антенна с использованием специализированного программного пакета **FEKO**. Методы, положенные в основу **FEKO**, позволяют эффективно решать задачи для структур больших электрических размеров. В приведенном примере размер зеркала составляет 7 длин волн, размер обтекателя – около 15 длин волн.*

*Проведено исследование распределения напряженности электрического поля в ближней зоне для системы антенна–обтекатель при различных электрофизических параметрах материала обтекателя.*

*Обтекатель; антенна; электромагнитное моделирование.*

**N.N. Kisel', S.G. Grishchenko**

### **NUMERICAL ELECTROMAGNETIC ANTENNA-RADOME SIMULATION**

*This article demonstrates the simulation of an antenna enclosed by a radome. Radome scattering is a very complex theory and appropriate radome design for weather radar has to include many parameters. The design and numerical results are courtesy and permission. Radomes are generally electrically large structures. The choice of simulation method of such structures is extremely important. The antenna was simulated using the **FEKO**. It is a specialist tool for the 3D electromagnetic simulation of high frequency components. **FEKO Solver** which is, as a result of its efficient memory scaling, ideal for such electrically large structures – the dish diameter in this example is approximately 7 wavelengths in size and dish of radome is approximately 15 wavelengths in size. The numerical studies for near field total electric field on the antenna with radome are shown.*

*Radome; antenna; electromagnetic design.*

Разработки бортовых и наземных антенн, укрытых обтекателем, в настоящее время невозможны без использования современных технологий проектирования, учитывающих разнообразную топологию структуры, включая возможности синтеза и оптимизации формы обтекателя и взаимного расположения обтекателя и антенной системы.

Основная задача при проектировании обтекателя – это обеспечение высокой радиопрозрачности, сохранение формы и ориентации диаграммы направленности антенны при всех углах сканирования антенны. Например, самолетные антенные обтекатели должны обеспечить высокую прозрачность для радиоизлучения в угловом диапазоне  $\pm 85^\circ$  от носового направления на обтекатель, одновременно являясь частью силового корпуса фюзеляжа. Даже качественно выполненные обтекатели уменьшают дальность действия антенных систем, поскольку коэффициент радиопрозрачности лежит в пределах 0,7...0,85, угловые ошибки определения направления на цель достигают десятков угловых минут.