

Цифровизация натурального эксперимента

Елизавета Каширская

В статье рассмотрена возможность и преимущества аналитического эксперимента по сравнению с натурным. Приведены два примера проведения аналитического эксперимента с последующим вычислительным этапом в качестве иллюстрации цифровизации аналоговой информации.

Введение

Часть экологической сферы Земли, содержащую технические, созданные людьми сооружения, принято называть техносферой. Цифровая трансформация техносферы включает в себя множество независимых процессов, одним из которых является замена натурального эксперимента вычислительным. Но даже в условиях цифровизации невозможно полностью отказаться от натуральных экспериментов при проектировании новых технических объектов и полностью перейти на проведение вычислительных экспериментов. Причина состоит в том, что вычислительный эксперимент всегда носит дискретный характер, в то время как моделируемые процессы по большей части являются непрерывными.

Основная часть

В процессе жизненного цикла промышленного изделия необходимо проводить различные виды экспериментов и испытаний, как над производимым изделием, так и над технологическим оборудованием. Подобные испытания достаточно трудоёмки и продолжительны, что серьёзно увеличивает сроки ввода нового изделия в производство, а также приводит к росту себестоимости изделия, особенно в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства.

Достаточно большое количество производственных испытаний тре-

бует определения граничных условий эксплуатации производственного оборудования и не требует более точных параметров. При этом натурные испытания элементов технологического оборудования требуют продолжительного времени и существенных ресурсов. Не всегда удаётся получить все требуемые параметры из-за физических ограничений по съёму данных с измерительных преобразователей. Таким образом, возникает необходимость замены классических натуральных экспериментов цифровыми.

Существует множество классификаций экспериментальных исследований. Эти классификации отличаются основанием деления на типы. По типу моделей, используемых в эксперименте, всевозможные эксперименты обычно разделяют на материальные и мыслительные (или мысленные).

Мы предлагаем несколько отличающуюся классификацию, не противоречащую ГОСТ [7] и Международному стандарту [8], представленную на рис. 1.

Рассматриваем три типа экспериментов. Опыт, в соответствии с [1], принято называть воспроизведение исследуемого явления в определённых условиях. Качественный эксперимент устанавливает только факт существования какого-либо явления, но при этом не даёт никаких количественных характеристик объекта исследования [9]. Количественный эксперимент [9] не только фиксирует факт существования того или иного явления, но и позволяет установить соотношения между количественными характеристиками явления и количественными характеристиками способов внешнего воздействия на объект исследования.

Количественные эксперименты можно подразделить на три вида. При натурном моделировании применяется довольно сложная методика планирования эксперимента с последующей громоздкой статистической обработ-

кой результатов проведения эксперимента. Несомненным преимуществом натурального моделирования является возможность охвата всего диапазона изменения параметров процесса или технического устройства.

При проведении вычислительного (компьютерного) эксперимента в силу его дискретности испытатель не может быть уверен в том, что им охвачены все возможные значения параметров и условий. Вполне возможна ситуация, при которой какие-то критические значения факторов могут оказаться не кратными шагу изменения параметров, в силу чего компьютерная программа получения результатов расчёта их может «проскочить».

В том случае, когда задача проектирования может быть полностью решена аналитически, необходимости в проведении экспериментов не возникает, но существует огромный класс задач, не поддающихся аналитическому решению, но допускающих упрощённое теоретическое решение с последующим получением по построенной модели числовых данных для любых возможных наборов параметров модели. Такой вид получения результатов исследования назовём аналитическим экспериментом.

Почему же подобное исследование мы называем аналитическим экспериментом, а не аналитическим расчётом? Дело в том, что при классическом аналитическом расчёте должны применяться известные или вновь создаваемые теоретические модели исследуемой системы. Мы же ведем речь о том, чтобы вместо теоретических (обоснованных и доказанных) моделей применить приближённую схему, абстрагирующуюся от целого ряда параметров системы, в целях быстрого получения результата. Использование подобного метода допустимо, если его сопровождать обширным вычислительным экспериментом, охватывающим значительную выборку входных параметров системы.

Вычислительный эксперимент, проводимый непосредственно после аналитического, позволяет с помощью большого разброса исходных данных получить цифровую картину исследуемого объекта, явления или процесса. Такое совокупное исследование мож-

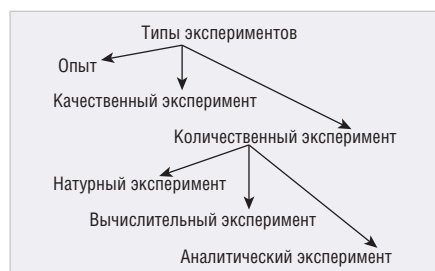


Рис. 1. Классификация экспериментальных исследований

но считать аналитико-вычислительным экспериментом.

Аналитико-вычислительный эксперимент (аналитический эксперимент, завершающийся вычислительным, то есть числовым экспериментом) может служить характерным примером цифровизации аналоговой информации.

Аналитический эксперимент, завершающийся вычислительным (числовым) экспериментом, является характерным примером цифровизации аналоговой информации.

Рассмотрим два примера проведения аналитического эксперимента.

Определение толщины стенок вакуумного баллона

Баллон представляет собой замкнутую оболочку, рассчитать напряжения и деформации которой – очень непростая задача из области теории оболочек. По этой причине обычно вместо расчёта с использованием зубодробительных формул проводится натурный эксперимент. Но для получения числовых результатов в любом диапазоне изменения параметров можно применить упрощённую схему расчёта, тем самым оцифровав аналитическое решение. Вакуумный баллон можно представить как цилиндр, на который со всех сторон действует внешнее давление p , Н/м² (рис. 2а).

Возьмём для примера вакуум 10^{-5} мм ртутного столба, что соответствует давлению порядка 10^{-8} атмосфер:

$$\frac{10^{-5}}{760} = 1,32 \times 10^{-8} \text{ атм} = 0,00134 \text{ Па.}$$

Пусть диаметр баллона составляет 80...100 мм (рис. 2б). Объём баллона будем считать равным 1800 см³, что соответствует высоте примерно от 20 до 30 см.

Максимальное нормальное напряжение в стенках баллона определяется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{pR}{\delta}, \text{ Па,} \quad (1)$$

где p – избыточное атмосферное давление на стенки баллона, Па,

R – радиус баллона, м,

δ – толщина стенок баллона, м.

Нужно без проведения натурного эксперимента определить минимальную толщину стенок баллона. Из формулы (1) получим:

$$\delta = \frac{pR}{[\sigma]},$$

где $[\sigma] = \frac{\sigma_m}{n}$ – допустимое нормальное напряжение в стенках баллона, Па, σ_m – предел текучести материала, Па,

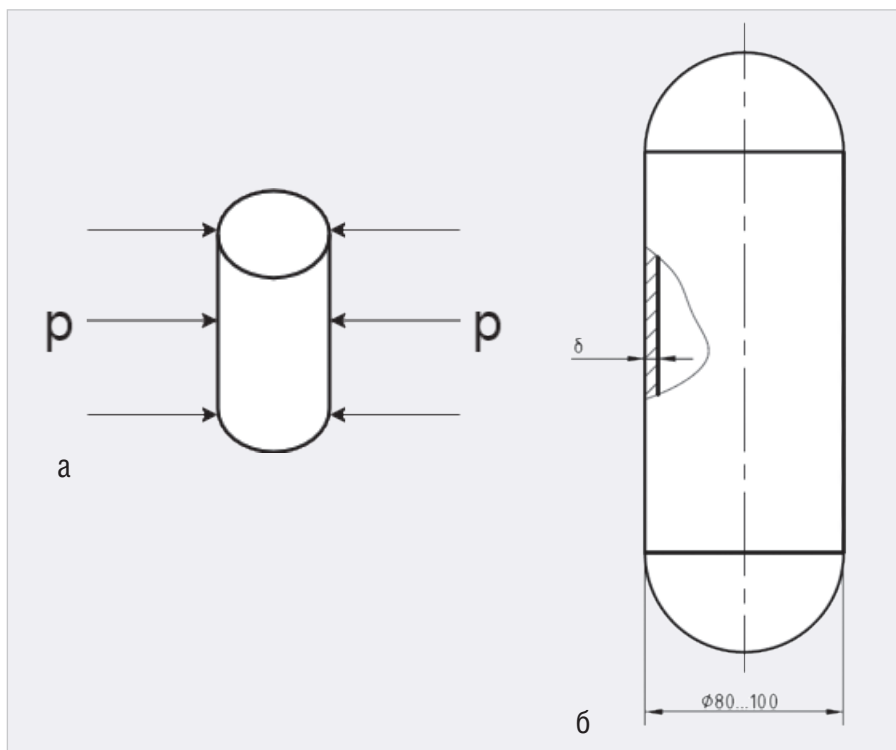


Рис. 2. Вакуумный баллон: а) схематичное представление, б) баллон в разрезе

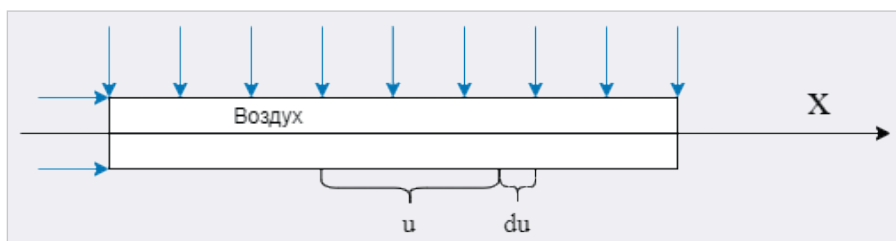


Рис. 3. Воздушный стержень

$n = 1,5$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести.

Для стали 40Х, рекомендуемой для изготовления резервуаров, $\sigma_m = 355 \text{ Н/мм}^2 = 3,55 \times 10^8 \text{ Па}$. В результате получим, что возможно использование тонкостенного баллона, толщина стенок которого может колебаться от 1,5 до 3 мм.

Таким образом, с помощью приближённых аналитических исследований (аналитического эксперимента) и числовых подсчётов удалось получить значение толщины стенок баллона, не прибегая к сложным законам теории оболочек и без проведения эксперимента. А взяв в качестве входных данных большой массив значений радиуса, давления и марок материала, мы можем получить цифровую картину изменения толщины стенок баллона в зависимости от исходных данных.

Воздушный стержень

Рассмотрим замкнутый объём воздуха под давлением, так называемый воздушный стержень (рис. 3).

Осевая сила, действующая на объём воздуха, находится по формуле:

$$N = EF \frac{\partial u}{\partial x},$$

где E – модуль упругости, Па,

F – площадь поперечного сечения, м²,

x – горизонтальная координата, м,

u – длина элементарного объёма воздуха, м,

$\frac{\partial u}{\partial x}$ – скорость перемещения объёма воздуха, м/с.

Давление на единицу площади поперечного сечения:

$$p = \frac{N}{F} = E \frac{\partial u}{\partial x}$$

при квадратном сечении со стороной 2 м $F = 2 \times 2 \text{ м}^2$.

Перемещение элементарного объёма воздуха:

$$U(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_0^l V_0 X_n dx}{\int_0^l X_n^2 dx} X_n \sin \omega_n t,$$

где V_0 – начальная скорость,

$X_n = \cos k_n x$ – n -я гармоническая составляющая перемещений,

$k_n = \frac{\pi(2n-1)}{2l}$ – закон изменения номеров гармоник,

$\omega_n = k_n \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – собственная частота n -й гармоники колебаний,

E – объёмный модуль упругости воздуха,

$\rho = 1,28 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при нормальных условиях,

t – время, с.

Так как $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость перемещения, то

$$p = E \frac{\partial u}{\partial x} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_0 \sin k_n l E}{\omega_n l} \sin k_n x \sin \omega_n t,$$

где $a_0 = 340 \text{ м/с}$.

Так как $E = \rho a^2$, при давлении в 1 атм (101 325 Па) и при скорости распространения упругих волн в воздухе (скорость звука в воздухе) $a_0 = 340 \text{ м/с}$ получим

$E = 1,28 \times 340^2 = 147,9 \times 10^3 \text{ Н/м}^2 = 14,8 \text{ Н/м}^2$ при давлении в 10 атмосфер (1 013 250 Па):

$$E = 64 \times 340^2 = 7,4 \times 10^6 \text{ Н/м}^2 = 740 \text{ Н/см}^2.$$

Так можно вычислить объёмный модуль упругости воздуха при разных условиях.

При $x = l$

$$p = p_{\max} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2EV_0}{\omega_n l} \sin \omega_n t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2EV_0 \sin \omega_n t}{\pi(2n-1) \sqrt{\frac{EF}{m_0}}},$$

где $m_0 = \rho F$ – масса единицы длины воздушного объёма. Тогда

$$p_{\max} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_0}{\pi} \sqrt{\frac{m_0 E}{F}} \times \frac{\sin \omega_n t}{2n-1} = \frac{4V_0}{\pi} \sqrt{\frac{m_0 E}{F}} \times \left(\frac{\sin \omega_1 t}{1} + \frac{\sin 3\omega_1 t}{3} + \dots + \frac{\sin n\omega_1 t}{n} + \dots \right).$$

В итоге получим

$$p_{\max} = \frac{4V_0}{\pi} \times \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{m_0 E}{F}} = V_0 \sqrt{E\rho} = V_0 a \rho,$$

где

$$\begin{cases} a = f(p, t) \\ \rho = f_1(p, t) \end{cases}.$$

При нормальных условиях $a = 340 \text{ м/с}$, $V_0 = 3000 \text{ м/с}$, $\rho = 1,28 \text{ кг/м}^3$ получим $p = 1,37 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Итак, при давлении, пропорциональном 10^5 Н/м^2 , и массе воздуха примерно 3 кг получим ускорение $3,3 \times 10^4$. Тогда

время и скорость перемещения воздуха при длине трубы 2 м составят соответственно:

$$t = \sqrt{\frac{2S}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 2}{3,3 \times 10^4}} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ с},$$

$$V = 3,3 \times 10^4 \times 1,1 \times 10^{-2} = 363 \text{ м/с}.$$

Итак, с помощью приближённых аналитических исследований (аналитического эксперимента) и числовых подсчётов удалось получить значение скорости и времени перемещения воздуха в воздушном стержне, не прибегая к сложным теоретическим зависимостям и без проведения эксперимента. А взяв в качестве входных данных большой массив размеров, давления и других исходных данных, мы можем получить цифровую картину изменения результатов расчёта в зависимости от входных параметров.

Приведённые примеры наглядно демонстрируют простоту проведения аналитического эксперимента по сравнению с натурными опытами.

Заключение

Современные тенденции рынка требуют от промышленных предприятий всё большей гибкости к номенклатуре производимых изделий, что, в свою очередь, требует минимизации времени ввода в производство новых изделий. Предлагаемый подход замены части натурных экспериментов и испытаний на цифровые позволит существенно решить задачу уменьшения времени как на разработку новых изделий, так и на технологическую подготовку производства. Предложенный подход является неотъемлемой частью цифровой трансформации производства.

Литература

1. Холопов В.А., Антонов С.В., Курнасов Е.В., Каширская Е.Н. Разработка и применение

цифрового двойника машиностроительного технологического процесса // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37–43.

2. Холопов В.А., Гантц И.С., Антонов С.В. Применение информационных технологий при решении задач мониторинга выполнения производственных процессов в концепции Индустрии 4.0 // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 4. С. 49–58.
3. Панайоти В.А., Мешков В.В., Курнасов Е.В. Технология снижения температуры при шлифовании быстрорежущей стали // Вестник машиностроения. 2020. № 1. С. 68–72.
4. Чижиков В.И., Курнасов Е.В. Математическая модель взаимодействия двух роботов при синхронном выполнении совместной работы // Вестник машиностроения. 2020. № 7. С. 11–15.
5. Холопов В.А., Каширская Е.Н., Шмелева А.Г., Курнасов Е.В. Интеллектуальная система мониторинга выполнения машиностроительных технологических процессов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2019. № 5. С. 98–112.
6. Холопов В.А., Каширская Е.Н., Соколов Ф.В., Сухастерин А.Б. Информационно-управляющая система для управления технологическим процессом посредством цифрового двойника // Промышленные АСУ и контроллеры. 2020. № 8. С. 46–50.
7. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. Библиографическое описание. М.: Изд-во стандартов, 1991. 70 с.
8. Международный стандарт ИСО 8402 Управление качеством и обеспечение качества. Словарь. М.: Изд-во стандартов, 1994. 20 с.
9. Чубинский А.Н., Рукавов Д.С., Батырева И.М., Варанкина Г.С. Методы и средства научных исследований. СПб., 2018. 109 с.



НОВОСТИ МИРА

Роскосмос: создание и запуск 380 спутников в рамках проекта «Сфера» обойдётся в 180 миллиардов рублей

Из этой суммы на ближайшие три года заложен 21 миллиард рублей, – написано в журнале.

Сейчас финансирование проекта многоспутниковой орбитальной группировки «Сфера» предполагает, что в течение 2022–2024 годов на проект будет выделяться по семь миллиардов рублей ежегодно.



Всего на орбиту будут выведены около 380 спутников. В систему войдут семь аппаратов «Экспресс», четыре «Экспресс-РВ», 12 спутников «Скиф» для широкополосного

доступа в интернет и 264 спутника «Марафон» для Интернета вещей. Также в «Сферу» войдут два спутника связи «Ямал», три спутника ДЗЗ «Смотр», 84 спутника оптического наблюдения «Беркут-О» (обзорный), «Беркут-С» (среднего разрешения) и «Беркут-ВД» (высокодетаальный), 12 аппаратов радиолокационного наблюдения «Беркут-Х» и «Беркут-ХЛР». Развёртывание всех группировок планируется начать в 2025 году.

www.ixbt.com