СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

В. В. Минин, Г. С. Гришко, В. Ю. Клешнин

Методология инновационного проектирования наземных транспортно-технологических комплексов

Учебное пособие

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

УДК 629.3.001.63(07)
ББК 39.94-022я73
М618

Р е ц е н з е н т ы:

В. И. Баловнев, доктор технических наук, профессор кафедры «Дорожно-строительные машины» Московского автомобильно-дорожного государственного университета, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, академик Российской академии транспорта, почетный профессор Сианьского университета транспорта и связи (КНР);

А. Г. Савельев, доктор технических наук, профессор кафедры «РК-4» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана

Минин, В. В.

М618 Методология инновационного проектирования наземных транспортно-технологических комплексов : учеб. пособие / В. В. Минин, Г. С. Гришко, В. Ю. Клешнин ; под общ. ред. В. В. Минина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – 108 с.

ISBN 978-5-7638-4457-3

Рассмотрены теоретические положения и практические аспекты инновационного проектирования наземных транспортно-технологических комплексов и их подсистем для строительства и содержания дорог и аэродромов, а также освоения северных территорий и Арктики.

Предназначено для магистрантов направления подготовки 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Электронный вариант издания см.:
http://catalog.sfu-kras.ru

УДК 629.3.001.63(07)
ББК 39.94-022я73

ISBN 978-5-7638-4457-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1

Взаимосвязи параметров машин и их системная оценка на первых стадиях инновационного проектирования

Оптимальность технического решения при инновационном проектировании наземных транспортно-технологических комплексов означает наилучший вариант по значению критерия оценки при множестве допущений и ограничений в постановке задачи моделирования. Задача выбора конструктивной схемы вновь создаваемых образцов техники, представляемой в виде сложной системы с большим количеством взаимосвязей технико-эксплуатационных и конструктивных параметров, осуществляемого на основе безразмерных комплексов их взаимосвязей, обеспечивает требуемую точность расчета значений и приводит к повышению производительности машин при рациональном использовании материальных и энергетических ресурсов.

1.1. Методика определения структуры математической модели

При изучении механических явлений вводится ряд таких понятий, как энергия, скорость, напряжение и т. п., которые характеризуют рассматриваемое явление и могут быть заданы с помощью чисел. Все вопросы о движении и равновесии формулируются как задачи об определении некоторых функций и численных значений для величин, характеризующих явление, причем при решении таких задач законы природы и различные геометрические соотношения представляются в виде функциональных уравнений − обычно дифференциальных. Однако в случае определения эффективности работы машины математическая постановка задачи не сводится к описанию названных уравнений и задач линейного и нелинейного программирования.

При этом мы имеем дело как с детерминированными, так и со стохастическими рабочими процессами.

В этом случае на практике для определения рациональных параметров хорошо себя зарекомендовали статистические методы и метод размерностей. Анализ размерностей конструктивных и эксплуатационных параметров, входящих в целевую функцию (критерий) оценки степени совершенства (эффективности), позволяет определить структуру математической модели в виде зависимости между безразмерными комбинациями, составленными из этих параметров.

Под размерностью величины понимают произведение степеней независимых единиц измерения физических величин, принятых в качестве основных. В Международной системе единиц СИ приняты следующие единицы измерения: длины – метр, массы – килограмм, времени – секунда.

Согласно теории подобия сформулированы хорошо зарекомендовавшие себя в практике моделирования теоремы.

Первая теорема подобия. Явления, подобные в том или ином смысле (математическом, физическом и т. д.), имеют некоторые одинаковые сочетания параметров, называемые критериями подобия.

Вторая теорема (π-теорема). Всякое полное уравнение физического процесса, записанное в определенной системе единиц, может быть представлено зависимостью между критериями подобия, т. е. уравнением, связывающим безразмерные величины, полученные из участвующих в процессе параметров.

Разработан компьютерный программный комплекс для автоматизации получения безразмерных критериев взаимосвязи параметров машин, реализующий следующий алгоритм.

Примем величину a, которая является функцией независимых между собой размерных величин $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$:

$$a = F(a_1, a_2, a_3, \ldots, a_k, a_{k+1}, \ldots, a_n)\ , \qquad (1.1)$$

где $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ – параметры, участвующие в процессе, причем первые из величин имеют независимые размерности. Примем их за основные и введем обозначения для их размерностей

$$[a_1] = A_1,\ [a_2] = A_2\ \ldots,\ [a_3] = A_3.$$

Размерности остальных параметров будут

$$[a] = A_1^{m_1} A_2^{m_2} \ldots A_k^{m_k}\ ,$$

$$[a_{k+1}] = A_1^{p_1} A_2^{p_2} \dots A_k^{p_k} \ ,$$

....

....

$$[a_n] = A_1^{q_1} A_2^{q_2} \dots A_k^{q_k} \ ,$$

Изменив единицы измерения величин a_1, a_2, a_3, …, a_k в α_1, α_2, …, α_k раз, получим значения этих величин и величин a, a_{k+1}, …, a_n в новой системе единиц:

$$a_1' = \alpha_1 a_1, \qquad a' = a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_k^{m_k} a \ ,$$

$$a_2' = \alpha_2 a_2, \qquad a_{k+1}' = \mathrm{a}_1^{\mathrm{p}_1} \mathrm{a}_2^{\mathrm{p}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{p}_\mathrm{k}} a_{k+1}$$

……………… ………………………………

……………… ………………………………

$$a_k' = \alpha_k a_k \qquad a_n' = \mathrm{a}_1^{\mathrm{q}_1} \mathrm{a}_2^{\mathrm{q}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{q}_\mathrm{k}} a_n$$

Тогда исходное соотношение (1.1) записывается в виде

$$a' = a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_k^{m_k} = a_1^{m_k} F(a_1, a_2, \dots a_n) =$$
$$= F\left(a_k a_k, \mathrm{a}_1^{\mathrm{p}_1} \mathrm{a}_1^{\mathrm{p}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{p}_\mathrm{k}} a_{k+1}, \mathrm{a}_1^{\mathrm{q}_1} \mathrm{a}_2^{\mathrm{q}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{q}_\mathrm{k}} a_n\right).$$

Выберем систему единиц измерения так, чтобы значения первых k аргументов у функции Ф в правой части соотношения (1.1) имели фиксированные постоянные значения, равные единице, т. е. $\alpha_1 = 1/a_1$, $\alpha_2 = 1/a_2$, …, $\alpha_k = 1/a_k$.

В относительной системе единиц измерения численные значения параметров, a, a_{k+1}, ..., a_n определяются по формулам

$$\Pi = \frac{a}{a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_k^{m_k}} \ ,$$

$$\Pi_1 = \frac{a}{\mathrm{a}_1^{\mathrm{q}_1} \mathrm{a}_2^{\mathrm{q}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{q}_\mathrm{k}}} \ ,$$

....

....

$$\Pi_{n-k} = \frac{a_n}{\mathrm{a}_1^{\mathrm{q}_1} \mathrm{a}_2^{\mathrm{q}_2} \dots \mathrm{a}_\mathrm{k}^{\mathrm{q}_\mathrm{k}}} \ .$$

Здесь значения П, $П_1$, ..., $П_{n\text{-}k}$ не зависят от выбора системы единиц измерения A_1, A_2 ..., A_k и не зависят от выбора тех единиц измерения, через которые выражаются a_1, a_2, a_3, . .. a_k. Следовательно, эти величины являются безразмерными.

Пользуясь полученной системой единиц, соотношение (1.1) можно записать в виде

$$\Pi = F(1{,}1, \dots, \Pi_1 \dots \Pi_{n-k}).$$

Связь между $n + 1$ размерными величинами a_1, a_2, a_3, ..., a_n, независимая от выбора системы единиц измерения, принимает вид соотношения между $n + 1–k$ величинами П, $П_1$, ..., $П_{n\text{-}k}$, представляющими собой безразмерные комбинации из $n + 1$ размерных величин.

Функциональная связь для исходной функции между параметрами a_1, a_2, a_3, …, a_k, ak+1, …, a_n $a = Ф(a_1, a_2, a_3, …, a_k, a_{k+1}, ..., a_n)$.

С учетом известных размерностей в системе основных единиц A_1, A_2, ..., A_k записываются в виде

$$[a_1] = A_1^{S_{11}} A_2^{S_{12}} \dots A_k^{S_{1k}} \, ,$$

$$[a_2] = A_1^{S_{21}} A_2^{S_{22}} \dots A_k^{S_{2k}} \, ,$$

....

....

$$[a_n] = A_1^{S_{n1}} A_2^{S_{n2}} \dots A_k^{S_{nk}} \, .$$

Согласно π-теореме количество критериев должно быть $n – k$. Найдем их из

$$\Pi_1 = a_1^{X_{12}} a_2^{X_{12}} \dots a_1^{X_{1k}} a_{k+1} \, ,$$

$$\Pi_2 = a_1^{X_{21}} a_2^{X_{22}} \dots a_1^{X_{2k}} a_{k+2} \, ,$$

.... (1.2)

....

$$\Pi_{n-k} = a_1^{X_{k1}} a_2^{X_{k1}} \dots a_k^{X_{kk}} a_n \, .$$

Заменив физические величины их размерностями и приравняв показатели степеней при соответствующих единицах измерения A_1, A_2, ..., A_k, запишем для каждого i-го критерия соответствующую систему уравнений:

$$\begin{cases} S_{11}X_{i1} + S_{21}X_{i2} + \cdots + S_{k1}X_{ik} + S_{(k+i)1} = 0\,, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots . \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ S_{1k}X_{i1} + S_{2k}X_{i2} + \cdots S_{kk}X_{ik} + S_{(k+i)(k+1)} = 0. \end{cases}$$

Решив системы методом Гаусса, подставив значения X_{ij} в формулы (1.2), находим искомые уравнения критериев.

Рассмотрим методику получения комплексных показателей качества на основе использования теории размерностей и подобия. Введем традиционные обозначения основных единиц измерения величин: L – метр, M – килограмм, T – секунда.

В обобщенной форме для наземной транспортно-технологической машины математическая модель взаимосвязи конструктивных и эксплуатационных параметров записывается в виде

$$\Phi = \Phi'\big(H,\ G,\ Z,\ Q,\ \ N\big), \tag{1.3}$$

где Z – грузоподъемность (грузоподъемная сила), $[Z] = LMT^{-2}$; H – показатель назначения, имеющий линейный размер, $[H] = L$; Q – производительность машины, $[Q] = LMT^{-3}$; N – установочная мощность двигателя, $[N] = L^2MT^{-3}$; G – эксплуатационная масса (сила тяжести) машины, $[G] = M$.

В формулу (1.3) входят пять аргументов, размерность которых выражается посредством трех основных единиц измерения.

Согласно π-теореме число критериев будет равно двум. Тогда имеем следующую систему критериальных уравнений:

$$\begin{cases} \pi_1 = H^{x_1} G^{y_1} Z^{z_1} Q, \\ \pi_2 = H^{x_2} G^{y_2} Z^{z_2} N. \end{cases} \tag{1.4}$$

Заменив физические величины их размерностями и приравняв показатели степеней при соответствующих единицах измерения M, L, T, запишем для каждого из π-критериев соответствующую систему уравнений:

для π_1

$$\begin{cases} M\colon\ Y_1 + Z_1 + 1 = 0, \\ L\colon\ X_1 + Z_1 + 1 = 0, \\ T\colon\ -2Z_1 - 3 = 0; \end{cases}$$

для π_2

$$\begin{cases} M\colon\ Y_2+Z_2+1=0, \\ L\colon\ X_2+Z_2+2=0, \\ T\colon\ -2Z_2-3=0. \end{cases}$$

Решив эти системы уравнений, найдем

$$X_1=1/2,\quad Y_1=1/2,\quad Z_1=-3/2;$$

$$X_2=-1/2,\quad Y_2=1/2,\quad Z_2=-3/2.$$

Тогда функциональные связи критериев примут вид

$$\Phi=\Phi'\left(Q\sqrt{\frac{GH}{Z^3}},\ N\sqrt{\frac{G}{HZ^3}}\right). \qquad (1.5)$$

Выбрав систему критериальных уравнений вида

$$\begin{cases} \pi_1=H^{x_1}G^{y_1}Q^{z_1}Z, \\ \pi_2=H^{x_2}G^{y_2}Q^{z_2}N \end{cases} \qquad (1.6)$$

и проведя аналогичные преобразования, получим:

для π_1

$$\begin{cases} M\colon\ Y_1+Z_1+1=0, \\ L\colon\ X_1+Z_1+1=0, \\ T\colon\ -3Z_1-2=0; \end{cases}$$

для π_2

$$\begin{cases} M\colon\ Y_1+Z_1+1=0, \\ L\colon\ X_1+Z_1+1=0, \\ T\colon\ -3Z_1-3=0. \end{cases}$$

Решения этих систем уравнений имеют следующий вид:

$$X_1=1/3,\quad Y_1=-1/3,\quad Z_1=-2/3;$$

$$X_2=1,\quad Y_2=0,\quad Z_2=-1.$$

Функциональные связи примут вид

$$\Phi = \Phi'\left(Z\sqrt[3]{\frac{Q^{-2}}{HG}},\ \frac{N}{HQ} \right). \tag{1.7}$$

Рассмотрим еще один вариант системы критериальных уравнений:

$$\begin{cases} \pi_1 = H^{x_1} G^{y_1} N^{z_1} Z, \\ \pi_2 = H^{x_2} G^{y_2} N^{z_2} Q. \end{cases} \tag{1.8}$$

Тогда для π_1

$$\begin{cases} M\colon Y_1 + Z_1 + 1 = 0, \\ L\colon X_1 + 2Z_1 + 1 = 0, \\ T\colon -3Z_1 - 2 = 0; \end{cases}$$

для π_2

$$\begin{cases} M\colon Y_2 + Z_2 + 1 = 0, \\ L\colon X_2 + 2Z_2 + 1 = 0, \\ T\colon -3Z_2 - 3 = 0. \end{cases}$$

Решения этих систем уравнений имеют следующий вид:

$$X_1 = 1/3,\quad Y_1 = -1/3,\quad Z_1 = -2/3;$$

$$X_2 = 1,\quad Y_2 = 0,\quad Z_2 = -1.$$

Функциональные связи критериев выразим уравнением

$$\Phi = \Phi'\left(Z\sqrt[3]{\frac{H}{GN^2}},\ \frac{QH}{N} \right). \tag{1.9}$$

Уравнения взаимосвязи конструктивных параметров в обобщенном (единственном) виде получим путем деления π_1 на π_2 для выражений (1.5), (1.7) и (1.9).

Тогда безразмерные комплексы выражаются следующим образом:

$$\pi_H = \frac{QH}{N};$$

$$\pi_Z = \frac{Z}{NG}\sqrt[3]{QH^2G^2};$$

$$\pi_G = \frac{Z}{QG}\sqrt[3]{\frac{NG^2}{H^2}}.$$

Для учета физико-механических свойств разрабатываемого материала (грунта) принят удельный коэффициент сопротивления A в виде отношения силы воздействия на разрабатываемую среду к площади этого воздействия (энергоемкость разработки одного кубического метра материала): $[A] = L^{-1}MT^{-2}$.

Принимая производительность Q размерностью $[Q] = L^3T^{-1}$, в обобщенной форме модель взаимосвязи параметров машины записывается в виде

$$\Phi = \Phi'\left(H, G, A, Q, N\right). \tag{1.10}$$

В формулу входят пять аргументов, размерность которых выражается посредством трех единиц измерения. Согласно π-теореме число критериев будет равно двум. Поэтому имеем следующую систему критериальных уравнений:

$$\begin{cases} \pi_1 = H^{x_1}G^{y_1}A^{z_1}Q, \\ \pi_2 = H^{x_2}G^{y_2}A^{z_2}N. \end{cases} \tag{1.11}$$

Заменив физические величины их размерностями и приравняв показатели степеней при соответствующих единицах измерения M, L, T, запишем для каждого π-критерия соответствующую систему уравнений:

для π_1

$$\begin{cases} M\colon\ Y_1 + Z_1 = 0, \\ L\colon\ X_1 - Z_1 + 3 = 0, \\ T\colon\ -2Z_1 - 1 = 0; \end{cases}$$

для π_2

$$\begin{cases} M\colon\ Y_1 + Z_1 + 1 = 0, \\ L\colon\ X_2 - Z_2 + 2 = 0, \\ T\colon\ -2Z_2 - 3 = 0. \end{cases}$$