

О моделировании технологических операций методом построения электрических эквивалентов в технологическом обосновании процесса проектирования изделий машиностроения на заводе-изготовителе.

В. А. Прудников.

В сообщении отрабатывается метод создания электрических моделей-эквивалентов для анализа технологических операций в рамках технологического обоснования процесса проектирования изделий машиностроения на заводе-изготовителе. Моделирование рассматривается на примерах двух задач: транспортировки груза и настройки электроклапана на перекладку по предельному давлению. Показана возможность построения типовых решений и получения данных, не учитываемых в первоначальных требованиях. Применение предлагаемого подхода позволяет модельно проанализировать технологическую операцию более подробно.

Методологический подход к технологическому обоснованию процесса проектирования изделий машиностроения на заводе-изготовителе предполагает при проектировании процесса создания новых изделий использование наряду с традиционными принципами формирования техпроцессов – формализации и алгоритмизации, также и таких новых принципов как комплексное проектирование конструкции и технологии, параллельность, инверсии, сквозных технологий и технологичности [1]. Кроме этого, анализ сформированного технологического процесса должен проводиться с учетом подходов технологического прогнозирования, в рамках которых, строится модель отдельной проектируемой технологической операции. Результат анализа должен выражаться в конструктивно-технологических решениях (КТР). Эффективность внедрения найденных КТР может быть оценена по комплексным критериям готового изделия, таким как пригодность, оптимальность и превосходство. Сами же критерии, на этапе производства, могут формироваться в четырех основных направлениях: требования заказчика (клиента), уровне научно-технической разработки, используемых материалов и полуфабрикатов, а также возможностей производства.

Ключевым моментом анализа, в данном подходе, является построение моделей объекта исследования (в данном случае отдельных технологических операций). Подходы технологического прогнозирования, для описания объекта исследования, позволяют использование любых моделей (математических, физических и т. п.) и, в целом, подобны классическим методам проектирования.

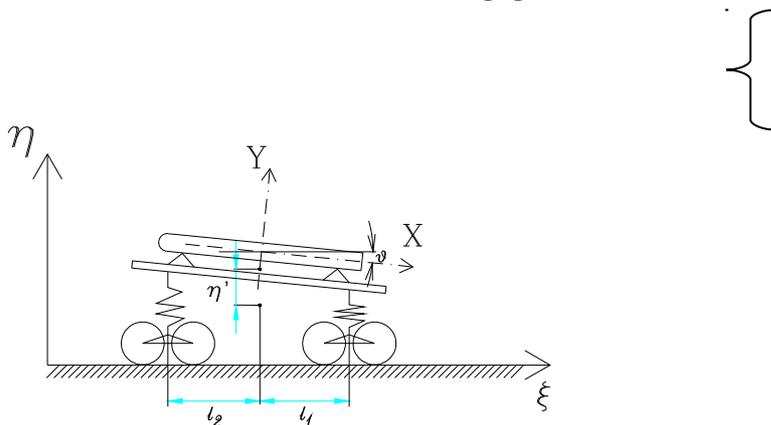
В работе В. С. Зарубина [2] уже рассматривался общий алгоритм построения эквивалентных электрических схем и математических моделей технических объектов. При этом отмечалось, что такие эквивалентные схемы могут быть построены в тех случаях, когда удастся разбить исходную модель на типовые элементы, сходные по своему описанию с математическим описанием резисторов, конденсаторов или индуктивностей. Такой подход иногда позволяет упростить расчеты, получить результаты поведения системы, используя известные решения или стандартные алгоритмы их нахождения.

Для построенной эквивалентной схемы можно было бы пойти и далее, проводя анализ исследуемого процесса на эквивалентной электрической схеме, а когда в этом есть необходимость, и в физическом эксперименте. При этом класс типовых элементов может быть значительно расширен, в зависимости от исследуемых характеристик системы.

Пример 1 (Суть метода). При транспортировке грузов, например полезной нагрузки к месту старта по железной или автомобильной дороге, возникает задача предохранения груза от чрезмерных вибраций, что накладывает определенные требования на скорость движения при доставке. Здесь обычно целесообразно учесть жесткость рессор передвижного средства, характер крепления груза на транспортировочной платформе, собственные частоты колебаний связанной системы и т. п.

В работе [3] рассматривалась математическая модель, описывающая колебания платформы А и груза В с рессорами жесткости G (Рис. 1).

В принятых там обозначениях, система уравнений представлялась в системе отсчета относительно неподвижной платформы:



$$\begin{aligned} (M_A + M_B) d^2 \eta / dt^2 &= -c(\eta + l_1 v) - c(\eta - l_2 v) \\ - (J_z^A + J_z^B) d^2 v / dt^2 &= c[l_1(\eta + l_1 v) - l_2(\eta - l_2 v)] \end{aligned}$$

Где M_A – масса аппарата, M_B – масса платформы с рессорами, η – величина вертикальной подвижки аппаратуры, v – угол наклона в горизонтальной плоскости по направлению движения,

Рис. 1

l_1 и l_2 – расстояние от центра масс до передней и задней рессор соответственно, J_z^A и J_z^B – моменты инерции аппарата и платформы относительно поперечной оси z.

При нахождении решений в виде $\eta = \eta_0 * \exp(i\omega t)$ и $v = v_0 * \exp(i\omega t)$, получалась система уравнений:

$$\begin{cases} [2c - (M_A + M_B)\omega^2]\eta_0 - cv_0(\ell_2 - \ell_1) = 0 \\ -c(\ell_2 - \ell_1)\eta_0 + v_0[c(\ell_2^2 - \ell_1^2) - \omega^2(J_z^A + J_z^B)] = 0 \end{cases}$$

Приравнявая нулю, определитель матрицы этих уравнений относительно переменных η_0 и v_0 , получалось уравнение:

$$a_2\omega^4 + a_1\omega^2 + a_0 = 0, \text{ где}$$

$$a_2 = (J_z^A + J_z^B)(M_A + M_B)$$

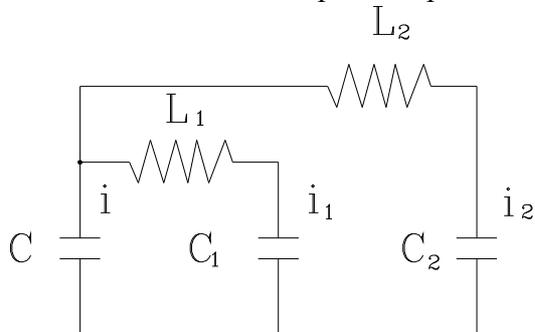
$$a_1 = -(J_z^B - J_z^A) \times 2c - c \times (M_A + M_B)(\ell_1^2 + \ell_2^2)$$

$$a_0 = c^2 \times (\ell_1 + \ell_2)^2$$

Решением такой задачи является два положительных корня биквадратного уравнения, соответствующие собственным частотам колебаний, причем одна из них отражает подпрыгивание системы при поступательном движении, а вторая – галопирование, соответствует вращению.

Однако более подробное рассмотрение влияния изменения параметров (например, M_A или J_A) на величины этих частот, хотя бы качественно, уже представляет громоздкую математическую задачу. Современные программные средства имитационного моделирования (например, в пакете MatCAD) позволяют легко проводить анализ подобных систем уравнений силами даже одного исследователя.

Однако такое рассмотрение можно проводить более углубленно, сведя задачу к



анализу схемы-эквивалента. Если рассматривать схему-эквивалент, представленную на рисунке 2, то окажется, что она соответствует тем же математическим формулам, но выражающимися уже через законы Кирхгофа. Действительно, для контуров C-C1-L1 и C-C2-L2:

Рис. 2

$$\begin{cases} L_1 d^2 i_1 / dt^2 + q_1 / c_1 = q / c \\ L_2 d^2 i_2 / dt^2 + q_2 / c_2 = q / c \\ i + i_1 = i_2 \end{cases}$$

В этих обозначениях c, c_1, c_2, q, q_1, q_2 – емкости конденсаторов и заряды на их обкладках; L_1, L_2 – индуктивности катушек; i, i_1, i_2 – значения токов в соответствующих ветвях.

После дифференцирования первых двух уравнений и подстановки в них третьего, учитывая, что $dq/dt = i$, можно получить:

$$\begin{cases} L_1 d^2 i_1 / dt^2 = -i_1 / c_1 + (i_2 - i_1) / c_1 = -(1/c + 1/c_1) i_1 + i_2 / c \\ L_2 d^2 i_2 / dt^2 = -(1/c_2 + 1/c) i_2 + i_1 / c \end{cases}$$

Если, аналогично предыдущей системе уравнений, искать решения в виде $i_1 = i_{10} * \exp(i\omega t)$ и $i_2 = i_{20} * \exp(i\omega t)$, то система уравнений относительно i_1 и i_2 преобразуется к аналогичному виду:

$$a_2 \omega^4 + a_1 \omega^2 + a_0 = 0, \text{ с той только разницей, что}$$

$$a_2 = L_1 + L_2$$

$$a_1 = L_1(1/c + 1/c_2) + L_2(1/c + 1/c_1)$$

$$a_0 = 1/c(1/c_1 + 1/c_2) + 1/c_1 c_2$$

Таким образом, для переменных $M_A, M_B, J_z^A, J_z^B, c, \ell_1, \ell_2$ и $L_1, L_2, 1/c, 1/c_1, 1/c_2$ возникает соответствие представленное в таблице, где коэффициенты a_0, a_1, a_2 выступают уже как коэффициенты преобразования:

a_0	$c^2(\ell_1 + \ell_2)^2$	$1/c(1/c_1 + 1/c_2) + 1/c_1 c_2$
a_1	$-(J_z^B - J_z^A)2c - c(M_A + M_B)(\ell_1^2 + \ell_2^2)$	$L_1(1/c + 1/c_2) + L_2(1/c + 1/c_1)$
a_2	$(J_z^A + J_z^B)(M_A + M_B)$	$L_1 + L_2$

Анализируя, далее, для конкретных значений поведение электрической схемы, можно, например, легко получить фактические значения для собственных частот колебаний, соответствующие различным значениям жесткости или положения рессор и колес в исходной схеме при неизменных значениях массы и моментов инерции аппарата и платформы. Результаты решения такой задачи могут содержать рекомендации по установке положения и жесткости рессор в зависимости от массогабаритных характеристик груза и требований по максимальной скорости передвижения при наличии ограничений по величине вибраций транспортируемого изделия. Этот пример является конкретным вариантом применения метода электрических схем-эквивалентов, причем, в данном случае, используется разложение исходной системы на типовые элементы [1]. Преимуществом такого подхода является то, что таким способом можно проанализировать поведение исходного объекта через анализ модели-эквивалента в широком диапазоне изменения ее параметров, причем провести такое исследование можно не только математически, но и, при необходимости, на натурной электрической

схеме. Более простой и “дешевый ” метод выполнения анализа можно провести, например, такими средствами программного обеспечения как Mat Lab или Lab View. Если массив таких задач составит значительное число – для их решения можно использовать уже отработанные в предыдущих задачах блоки. Таким образом, решение отдельной специальной задачи может быть сведено к отработанному способу решения для типовых элементов.

Ограничение данного подхода, обусловленное требованием представления исходной схемы в виде типовых элементов (подобных резистору, конденсатору или индуктивности), может, в некоторых случаях, быть снято и расширено на более сложные элементы.

Пример 2 (Использование нелинейных аналогов). При проектировании технологических процессов объект контроля и измерительная аппаратура иногда могут быть рассмотрены в едином представлении схемы-эквивалента, что позволяет точнее проанализировать некоторые характеристики измерительной аппаратуры.

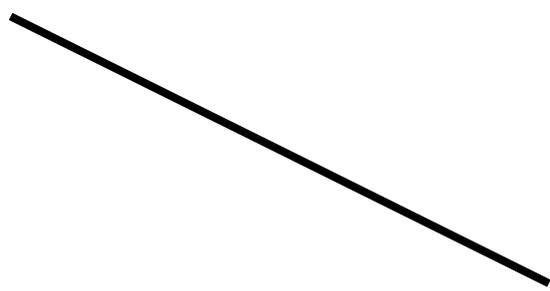


Схема электроиспытания электроклапана на предмет безотказности безотказной работы электропривода.
 $P_3 = P_1 \cdot (3 - 3 \cdot P_1 + P_1^3)$
 при $P_1 = 0.99$, $P_3 = 0.999999$ (P ~ 0.95-0.98)

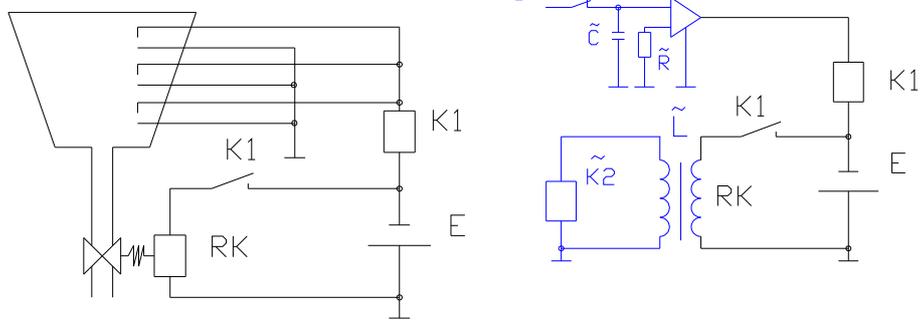


Рис. 3

На рисунке представлена схема клапана, электроуправляемого от датчика предельного давления. Часто при проведении оценок надежности данного устройства задаются оценкой надежности только по электрической схеме, которая, например, для датчика предельного давления (представляющая собой устройство замыкания сухих контактов) принимает весьма высокое значение (вероятность безотказной работы одного датчика $P_1 \sim 0,99$). В расчетах по безотказной работе схем с тройным резервированием, эта величина составит $P_3 \sim 0,999999$. В действительности же это устройство зависит от качества и надежности установки датчика в пневмо- или гидросистеме, от величины предельного давления, способа замыкания цепи и т. п. Такие особенности по оценке надежности можно учесть в модели, если перейти к схеме-эквиваленту изображенной на нижней части рисунка 2. Здесь уже вместо сухих контактов показана схема включения операционного усилителя по пороговому напряжению. Стоит заметить, что в современных микросхемах такие операционные усилители, в сериях различных исполнений, имеют вероятность безотказной работы ограниченную интервалом от $\sim 0,95$ до $0,98$. Оценка вероятности безотказной работы для тройного резервирования при $P_1 = 0,95$ дает $P_3 = 0,65$ (!), что более точно соответствует рассматриваемому нами датчику предельного давления, который устанавливается в испытываемой схеме. Аналогичным же образом можно учесть особенности конструкции и самого клапана, задав его не как обмотку индуктивности, а, например, через схему трансформаторного контура. Учет этого позволит провести оценки потребляемой от источника питания мощности по известным характеристикам выбранного типа трансформатора, которые обычно известны и могут быть выбраны. Заметим, что этого нельзя сделать, опираясь только на схему электрическую принципиальную изображенную на верхнем рисунке.

Таким образом, и в более сложных случаях, при подготовке механических, пневматических, гидравлических и иных подобных испытаний можно строить модели схем-эквивалентов объединяющих механические, пневматические или гидравлические части с электроизмерительной или управляющей аппаратурой в общей схеме-эквиваленте. При точном задании коэффициентов преобразования, параметры, получаемые в схеме-эквиваленте, будут соответствовать характеристикам измерительной или управляющей электрической схемы объекта исследования и могут быть использованы для проектирования.

На предложенных примерах показана возможность построения типовых решений и получения новых данных, не учитываемых первоначальной моделью. Применение предлагаемого подхода позволяет модельно анализировать технологическую операцию

более подробно. Это может быть целесообразным для проведения расчетов проектных параметров по конструктивно-технологическим решениям.

Список литературы:

1 Касаев К. С. и др. Новые наукоемкие технологии: Энциклопедия. Т14./ Под общей редакцией К. С. Касаева - М.:НЦИТЕХ, 1999, - 316 с.

2 Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. / Серия «Математика в техническом университете», Т XXI, заключительный выпуск - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001, - 496 с.

3 Сухов Г. М. и Сухов С. Г. Основы динамических систем конструкции ЛА. – М.: МГТУ им. К. Э. Циолковского, 1994, - 36с.

Сведения об авторе:

Прудников Виталий Анатольевич.

Место работы: ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, РКЗ.

должность: инженер-конструктор.

Аспирант заочной аспирантуры ГКНПЦ им. М.В. Хруничева,

по специальности: 05.07.07 "Испытание летательных аппаратов и их систем".

Телефон: 145-86-26; E-mail: Prudnikovs64@mail.ru .