УДК 621.015

ТЕОРИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СБОРКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2014 Ф.В. Гречников, С.Ф. Тлустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 25.12.2014

Автоматизация процессов синтеза, анализа и оценки вариантов технологических процессов сборки летательных аппаратов (ЛА) при переходе к бесплазовому способу их производства на базе электронных моделей изделий позволяет значительно увеличить число разрабатываемых в автоматизированных системах проектов технологий сборочных процессов. Разработана методика совершенствования способов перебора вариантов сборки с использованием предлагаемых моделей выбора состава, построения структуры и схем при технологической подготовке агрегатно-сборочного производства, где задачу определения эффективности операций сборки можно свести к общей задаче расчета адекватных передаточных функций введением в модель сборки в виде смешанного графа подмножеств соотношений входных и выходных переменных по комплексам варьируемых параметров и факторов.
Ключевые слова: комплексный критерий, топологическое описание, сборка, автоматизация, итерационные процедуры, проектирование, схемные функции, взаимозаменяемость, технологические процессы, маршруты, методы, способы оптимизации, моделирование.

В условиях автоматизации технологической подготовки агрегатно-сборочного производства летательных аппаратов (ЛА) необходимо дифференцировать виды и последовательности сборочных операций с выделением и группировкой отдельных структурных элементов в самостоятельные сборочные единицы по некоторому множеству признаков и критериев. Соответственно можно построить некоторое множество моделей по результатам объединения деталей планера в узлы, панели, отсеки и агрегаты, что требует совершенствования теоретических основ расчета параметров технологических схем сборки, в частности, в виде методик расчёта передаточных функций элементов технологического комплекса сборки различного уровня иерархии и степени сложности. Такой подход позволяет получать эффективные оценки получаемых решений при автоматизированном проектировании технологических процессов. Предлагаемая методика топологического описания и анализа вариантов технологического комплекса (ТК) на уровне формализованного представления предполагает построение обобщённого связного графа непосредственно по виду модели ТК. На основе последнего, в свою очередь, можно ввести в модель варьируемое число переходов и операций сборки, а затем для каждого из них найти искомую передаточную функцию $T_{ky} = x_k / q_y$, равную последовательно отношению основной входной переменной x_k из допустимого множества $\{k_i\}$ для одного из подграфов схемы к значению q_y выхода для произвольного технологического задающего источника в виде: $T_{ky} \Leftrightarrow q_y$. При этом в зависимости от выбранного характера переменных x_k и q_y передаточная функция $T_{ky} = x_k / q_y$ определяет следующие характеристики технологической системы, например, по значению коэффициента обратной связи К:

1) при $K_n = n_k/n_i > 1$; где $x_k = n_k$ и $q_y = n_i$, К – коэффициент передачи на уровне вход-выход проектируемой технологической подсистемы (или её ячейки) по показателю роста числа деталей, обработанных на технологической линии;

2) при $K_n = n_{вх} / n_{вых\ i} > 1$, $x_k = n_{вх}$ и $q_y = n_{вых}$ – рост скорости потока деталей, узлов;

3) при $K_n = n_k/n_{вых\ i} > 1$, $x_k = n_k$ и $q_y = n_{вых}$ – коэффициент увеличения передачи по числу деталей;

4) при $Kn := n_{вх} / n_{ki} > 1$, $x_k = n_{вх}$ и $q_y = n_{ki}$ – коэффициент передачи по росту скорости реализации потока деталей в сборочные единицы ЛА.

Тогда методика постановки и решения задачи практической реализации процедуры топологического расчета передаточных функций схем ТК может быть решена двумя основными способами:

1. На основе графа общего вида с вершинами-истоками.

2. На основе однородного графа, не содержащего вершин-истоков.

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением. E-mail:gretch@ssau.ru
Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: titan250@mail.ru

Рассмотрим их последовательно. Для первого случая граф общего вида может содержать произвольное число вершин-истоков, отображающих задающие источники деталей и скорости потоков. Поэтому, чтобы найти по виду такого графа передаточную функцию $T_{ky} = x_k / q_y$, достаточно ввести в смешанный граф схемы ТК задающий источник числа деталей или скорость потока q_y и выделить в этом графе ветвь, отображающую переменную x_k. При этом, если входящая в искомую передаточную функцию переменная x_k не совпадает ни с одной входной переменной реальных многополюсных элементов схемы ТК, необходимо ввести в граф G_x соответствующим образом включенную дополнительную ветвь x_k, отображающую основную переменную фиктивного двухполюсника по аналогу нулевого сопротивления при $x_k = n_{вхk}$ и с нулевой проводимостью при $x_k = n_k$.

Такой подход позволяет построить затем в соответствии с общей методикой обобщенный связной граф схемы G и получить структуру, которая содержит вершину-исток q_y, отображающую задающий источник q_y, и взвешенную вершину x_k, отображающую основную входную переменную одного из многополюсников схемы x_k Соответственно искомая функция $T_{ky} = x_k / q_y$ находится по виду этого графа на основании топологической формулы передачи, т.е. на основании соотношения:

$$T_{ky} = \frac{x_k}{q_y} = \frac{\sum_s P_{ky}^{(s)} \Delta^{(s)}}{\Delta}, \qquad (1)$$

где Δ – определитель графа G; $P_{ky}^{(s)}$ – вес s-го пути в вершину x_k из вершины q_y; $\Delta^{(s)}$ – определитель графа, не касающегося s-го пути.

В тех случаях, когда необходимо определить некоторую совокупность (подмножества) схемных функций $\{T_{ky}\}$, следует сразу ввести в граф G_x адекватную совокупность (подмножества) задающих источников $\{q_y\}$ и выделить в них вариативную совокупность ветвей $\{x_k\}$, соответствующую оптимальному технологическому переходу. При этом обобщенный сигнальный граф будет включать в себя совокупность вершин-истоков $\{q_y\}$ и совокупность взвешенных вершин $\{x_k\}$, что позволит по виду одного и того же графа G найти все искомые функционалы для отдельных схемных функций.

Во втором случае при анализе схем ТК часто бывает неизвестен полный перечень передаточных функций $\{T_{ky}\}$, которые подлежат определению. Или же этот перечень устанавливается последовательно, по мере анализа свойств схемы ТК на основе уже определенных передаточных функций. Как правило, при этом заранее неизвестна полная совокупность всех задающих источников $\{q_y\}$, которые необходимо ввести в смешанный граф схемы ТК для нахождения полного набора искомых передаточных функций $\{T_{ky}\}$. В таких случаях расчет передаточных функций на основе графа общего вида может оказаться достаточно сложным и трудоёмким вследствие необходимости повторного топологического описания схемы ТК по мере введения в рассмотрение новых задающих источников элементов сборок.

Относительно просто аналогично поставленные задачи можно решать по следующей методике. Строится и вводится в технологическую схему однородный граф схемы ТК. Такой граф не содержит вершин-источников, а все его вершины являются взвешенными. При этом в зависимости от условий задачи в качестве задающего параметра может приниматься любая отображенная в графе переменная x_y. Тогда соответствующая передаточная функция $T_{ky} = x_k / q_y$ находится по виду и структуре проекта комплекса сборочных операций в виде однородного графа.

Следовательно, построив смешанный и обобщенный сигнальный графы анализируемой схемы ПК, не содержащей задающих источников, можно затем отождествить с задающим источником любую отображенную в этих графах переменную. При этом искомая передаточная функция $T_{ky} = x_k / q_y = x_k / x_y$ определяется по виду однородного графа на основании соотношения:

$$T_{ky} = \frac{x_k}{x_y} = \frac{\sum_s P_{ky}^{(s)} \Delta^{(s)}}{\Delta_{\bar{y}}}, \qquad (2)$$

где $P_{ky}^{(s)} = \Delta_{\bar{y}}\, x_y$; $\Delta_{\bar{y}}$ – определитель однородного графа $G_{\bar{y}}$ с устраненной вершиной x_y;

Параметр $P_{ky}^{(s)}$ – вес s-го пути в вершину x_k от вершины x_y; $D^{(s)}$ – определитель графа, не касающегося s-го пути.

Из этого следует, что в условиях вариативного проектирования технологии сборки и выполнении практических расчетов передаточных функций с последующей их оптимизацией можно применять в совокупности оба рассмотренных подхода. Так, выполняя расчет передаточных функций на основе графа общего вида, содержащего вершины-истоки, отображающие задающие источники потоков в схемах ТК, можно одновременно с расчетом передаточных функций $T_{ky} = x_k / q_y$ находить по виду данного графа и передаточные функции указанного вида $T_{ky} = x_k / q_y$. Последние, очевидно, равны отношению переменных x_k и x_y, отображенных в графе соответствующими взвешенными вершинами, при этом одна из таких переменных отождествляется с задающим источником. Это существенно расширяет возможность топологического анализа реальных схем ТК в связи с вариацией характера возможных задающих источников по их весовым коэффициентам.

Исходя из вышеизложенного, отметим, что при расчете схем ТК в ряде случаев может возникнуть задача определения передаточной функции $T_{ky} = x_k / q_y$, равной отношению второстепенной входной переменной $\overline{x}_k$ к задающему источнику q_y. Такая задача может быть решена путем использования уравнения связи k-го входа многополюсника $\overline{x}_k = \sum\limits_i \omega_{ki} x_i$, позволяющего выразить второстепенную переменную $\overline{x}_k$ этого входа через параметры многополюсника ω_{ki} и его основные переменные x_i. Используя указанное уравнение, получаем:

$$\overline{T}_{ky} = \frac{\overline{x}_k}{q_y} = \frac{\sum\limits_i \omega_{ki} x_i}{q_y} = \sum\limits_i \omega_{ky} T_{iy}, \qquad (3)$$

где $T_{iy} = x_i / q_y$ – передаточная функция, равная отношению основной входной переменной x_i к задающему источнику q_y и определяемая топологическим путем согласно изложенной выше методике.

Относительно просто указанная задача решается, если переменная $\overline{x}_k$ является второстепенной переменной двухполюсника. В этом случае на основании (3) получим

$$\overline{T_{ky}} = \frac{\overline{x}_k}{q_y} = \frac{V_k x_k}{q_y} = V_k T_{ky}, \qquad (4)$$

где $\overline{T}_{ky} = \dfrac{\overline{x}_k}{q_y}$ передаточная функция, равная отношению основной переменной двухполюсника x_k к задающему источнику q_y; V_k – проводимость двухполюсника по условиям реализации технологического процесса.

Соответственно можно сделать вывод о том, что задачу определения передаточной функции $\overline{T}_{ky} = \dfrac{\overline{x}_k}{q_y}$ можно свести к общей задаче расчета передаточной функции T_{ky} введением в смешанный граф дополнительной ветви, которая отображает фиктивный двухполюсник с нулевой проводимостью, включенный таким образом, чтобы основная переменная этого двухполюсника совпадала с второстепенной переменной, входящей в искомую передаточную функцию $\overline{T}_{ky} = \dfrac{\overline{x}_k}{q_y}$.

При проектировании схем ТК часто возникает необходимость приближенной оценки передаточных функций с учетом имеющихся соотношений между параметрами многополюсных элементов. При этом на различных этапах проектирования могут использоваться различные степени такого приближения.

Возможность приближенного представления передаточных функций обеспечивается, с одной стороны, наличием среди параметров многополюсных элементов таких, которые пренебрежимо малы, а с другой стороны, тем, что некоторые из параметров многополюсников имеют относительно большие численные значения. Поскольку подход к приближенному расчету передаточных функций для указанных ситуаций различен, рассмотрим каждую из них отдельно.

В первом случае, если какие-то параметры многополюсных элементов пренебрежимо малы, их можно положить равными нулю. Это допущение может быть сделано либо до выполнения топологического описания схемы ТК, если известно, что на всех этапах ее проектирования значения таких параметров не будут превышать допустимых возможных предельных величин, либо после выполнения такого описания в противном случае.

Далее строится матрица связей элементов сборок в структуре соответствующего связного графа, и если параметр многополюсного элемента, являющийся недиагональным коэффициентом матрицы его параметров, стремится к нулю, то из топологического описания схемы ТК устраняется соответствующая дуга, весовой коэффициент которой определяется этим параметром. Устранение некоторой совокупности дуг из графа схемы ТК, очевидно, упрощает расчет ее передаточных функций, так как при этом исключается из рассмотрения ряд контуров и путей графа. Методика расчёта схемы ТК в значительной степени определяется процедурой вычисления определителя графа.

Если равным нулю полагается параметр многополюсника, являющийся диагональным коэффициентом матрицы его параметров, то в графе компонентов обращается в нуль весовой коэффициент соответствующей вершины. При этом структура обобщенного сигнального графа схемы ТК остается неизменной, и указанная ситуация не приведет к упрощению процедуры топологического расчета передаточных функций.

Для упрощения расчета передаточных функций для такой ситуации проведем разложение графа по вершине x_i с нулевым весом $t_{ii}= 0$. При этом получим выражение для определителя графа в виде

$$\Delta = t_{ii}\Delta_{\bar{i}} + \sum_s L_{ii}^{(s)}\Delta^s = \sum_s L_{ii}^{(s)}\Delta^s, \quad (5)$$

где $L_{ii}^{(s)}$ – вес s-го контура, проходящего через вершину x_i; $\Delta^{(s)}$ – определитель графа, не касающегося s-го контура.

Таким образом, процедура вычисления определителя существенно упрощается, так как из рассмотрения исключаются все элементарные графы, не содержащие контуров, проходящих через выделенную вершину x_i с нулевым весом.

Если граф содержит совокупность вершин $\{x_i\}$ с нулевым весом, то, осуществляя последовательно его разложение по таким вершинам, получим соотношение вида

$$\Delta = \sum_s L_{\{ii\}}^{(s)}\Delta^s, \quad (6)$$

где $L_{\{ii\}}^{(s)}$ – s-ное произведение весов контуров, проходящих через все вершины совокупности $\{x_i\}$; $\Delta^{(s)}$ – определитель графа, не касающегося s-ных контуров, входящих в s-ное произведение.

Аналогично, при наличии в графе вершин с нулевым весом, упрощается и вычисление числителя передаточной функции. При стремлении к бесконечности какого-либо коэффициента матрицы последняя перестает иметь смысл и не может существовать, а допущение о весьма больших значениях параметров многополюсников можно ввести только после осуществления топологического описания схемы ТК. Выполнив описание ТК при таком подходе, можно по обоснованиям положить, что значения весовых коэффициентов некоторых дуг и вершин стремятся к бесконечности.

Положив, что значение весового коэффициента t_{ij} какой-либо дуги (x_i, x_j) стремится к бесконечности, можно провести разложение графа по этой дуге, следовательно, записать:

$$\Delta = \Delta^0 + (-t_{ij})\sum_s P_{ji}^{(s)}\Delta^s \approx -t_{ij}\sum_s P_{ji}^{(s)}\Delta^s, \quad (7)$$

где $P_{ji}^{(s)}$ – вес s-го пути в j-ую вершину из i-той вершины; $\Delta^{(s)}$ – определитель части графа, не касающейся s-го пути.

Если при разложении графа взять за основу соотношение

$$\Delta = \Delta^0 + \sum_s L_{ij}^{(s)}\Delta^s \approx -t_{ij}\sum_s P_{ji}^{(s)}\Delta^s, \quad (8)$$

где Δ^0 – определитель графа G^0, образуемого из исходного графа удалением дуги (x_i, x_j); $L_{ij}^{(s)}$ – вес s-го контура, включающего выделенную дугу (x_i,x_j); $\Delta^{(s)}$ - определитель части графа, не касающейся s-го контура, то получим приближенное выражение в виде

$$\Delta \approx \sum_s L_{ij}^{(s)}\Delta^s, \quad (9)$$

где $L_{ij}^{(s)}$ – вес s-го контура, включающего в себя выделенную дугу (x_i,x_j); $\Delta^{(s)}$ – определитель графа, не касающейся s-го контура.

В случае, когда в графе содержится некоторая совокупность дуг $\{x_i, x_j\}$, весовые коэффициенты которых достаточно велики, в результате выполнения последовательного разложения по таким дугам можно получить на основании (8) приближенное соотношение вида

$$\Delta \approx \sum_s L_{\{ij\}}^{(s)}\Delta^s, \quad (10)$$

где $L_{\{ij\}}^{(s)}$ – произведение весов s-ой системы. не касающихся контуров, включающих в себя все дуги выбранной совокупности; $\Delta^{(s)}$ – определитель графа, не касающегося s-й системы контуров.

Если же устремляется к бесконечности весовой коэффициент t_{ii} вершины x_i, то, проводя разложение по этой вершине, можно записать

$$\Delta = t_{ii}\Delta_{\bar{i}} + \sum_s L_{ii}^{(s)}\Delta^s \approx t_{ii}\Delta_{\bar{i}}, \quad (11)$$

где $\Delta_{\bar{i}}$ – определитель графа с устраненной вершиной x_i.

При наличии ситуации, когда в графе можно выделить некоторую совокупность вершин $\{x_i\}$, весовые коэффициенты которых стремятся к бесконечности, задача приближенного расчета передаточных функций технологической подсистемы может быть решена последовательным разложением весов путей по совокупности системных вершин, что дает:

$$\Delta \approx t_{\{ii\}}\Delta_{\{\bar{i}\}}, \quad (12)$$

где $t_{\{ii\}}$ – произведение весов вершин, входящих в совокупность $\{x_i\}$, $\Delta_{\{\bar{i}\}}$ – определитель графа, образуемого из исходного устранением всех вершин, входящих в совокупность $\{x_i\}$. Для этого необходимо выполнить процедуры расчётов по следующей методике.

Пусть ω – произвольный параметр одного из многополюсников схемы ТК, представленный в ее обобщенном сигнальном графе элементом с весовым коэффициентом t_{ij}. При этом таким элементом может быть либо дуга (x_i, x_j), направленная в вершину x_i из вершины x_j и имеющая вес t_{ij} (случай, когда $j \neq i$), либо вершина x_i с весом t_{ii} (случай, когда $j = i$). Очевидно, что в первом случае выбранный параметр ω определяет передаточные свойства многополюсника, а во втором – его входные характеристики (по сопротивлению технологическому потоку). Для такой ситуации необходимо ввести понятие функции чувствительности S. Из всех возможных форм представлений функций чувствительности для целей топологического анализа удобнее всего использовать формы, не зависящие от размерности варьируемого параметра, т.е. относительную чувствительность передаточной функции T_{ky} к вариации параметра (весового коэффициента графа t_{ij}):

$$S = \frac{\partial T_{ky}}{\partial \omega}\frac{\omega}{T_{ky}}. \qquad (13)$$

Чтобы получить топологическую формулу для расчета относительной чувствительности, запишем передаточную функцию T_{ky} в билинейной форме относительно варьируемого параметра w:

$$T_{ky} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{B}} = \frac{\mathrm{A}_0 + \omega \mathrm{A}_1}{\mathrm{B}_0 + \omega \mathrm{B}_1}. \qquad (14)$$

Дифференцируя это выражение по параметру ω, получим

$$S = \frac{\partial T_{ky}}{\partial \omega}\frac{\omega}{T_{ky}} = \omega \frac{A_1 B - B_1 A}{AB}. \qquad (15)$$

С учетом того, что $\mathrm{A}_1=(\mathrm{A}-\mathrm{A}_0)/\omega$ и $\mathrm{B}_1=(\mathrm{B}-\mathrm{B}_0)/\omega$, последнее выражение примет вид

$$\mathrm{S} = \frac{\mathrm{B}_0}{\mathrm{B}} - \frac{\mathrm{A}_0}{\mathrm{A}}. \qquad (16)$$

Сопоставляя билинейную форму с общим видом топологической формулы передачи, можно записать:

$$A = \sum_s P_{ky}^{(s)} \Delta^{(s)};\ \mathrm{B} = \Delta;\quad \mathrm{B}_0 = \Delta\Big|_{\omega=0}; \qquad (17)$$

$$A_0 = \left(\sum_s P_{ky}^{(s)} \Delta^{(s)} \right)\Bigg|_{\omega=0}; \qquad (18)$$

Очевидно, что к виду, аналогичному соотношениям (8-12), можно привести во всех рассматриваемых случаях и числитель передаточной функции T_{ky}. Если при этом все устремляемые к бесконечности параметры войдут как в числитель, так и в знаменатель передаточной функции, то после их сокращения получим предельное значение передаточной функции, к которому последняя стремится при неограниченном возрастании значений таких параметров. В противном случае пределом рассматриваемой передаточной функции будет ее нулевое или бесконечное значение.

Таким образом, одной из важнейших характеристик схем ТК является чувствительность характеризующих их передаточных функций к вариации параметров технологической системы сборки ЛА, или многополюсных элементов в её модели.. Поэтому в дальнейших разработках моделей ТК представляет существенный интерес эффективная методика топологического расчета чувствительности передаточных функций по виду их обобщенных сигнальных графов.

Следовательно, методика приведения компонент ТК к многополюсникам при системном подходе позволяет в проектах технологических систем АСП получать достаточно достоверные значения параметров их функционирования, что позволяет автоматизировать процессы проектирования ТК на базе разработанного аналитического аппарата, в том числе при проектировании и оценке эффективности различных схем ТК, когда непосредственная обработка данных по существующим методикам связана со значительными затратами времени при невысокой точности результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калачанов В. Д., Джимай Е. В.* Формирование и оптимизация ресурсного обеспечения программ авиастроительного производства // Авиакосмическая техника и технология. 2005. № 4. С. 44-49.
2. *Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисийцев Н.К. и др.* Проектирование самолетов [под ред. С.М. Егера]. М.: Логос,

2005. 648 с.
3. *Чумадин А.С., Ершов В.И., Барвинок В.А.* Основы технологии производства летательных аппаратов. М.: Наука и технологии, 2005. 912 с.

METHODOLOGY SYSTEMS APPROACH IN MODELS OF TECHNOLOGICAL SUBASSEMBLY IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

© 2014 F.V. Grechnikov, S.F. Tlustenko,

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Automation of processes of synthesis, the analysis and assessment of options of technological processes of assembly of the aircraft (A) upon transition to a nonplaz way of their production on the basis of electronic models of products allows to increase considerably number the automated systems of projects of technologies of assembly processes developed in. The technique of improvement of ways of search of options of assembly with use of the offered models of a choice of structure, creation of structure and schemes by technological preparation of modular and assembly production where the problem of determination of efficiency of operations of assembly can be reduced to the general problem of calculation of adequate transfer functions by introduction to assembly model in the form of mixed the column of subsets of ratios of entrance and output variables on complexes of the varied parameters and factors is developed.

Keywords: complex criterion, topological description, assembly, automation, iterative procedures, design, circuit functions, interchangeability, technological processes, routes, methods, ways of optimization, modeling.

Fyodor Grechnkov, Member-Correspondent of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Metal Forming Department.
E-mail: gretch@ssau.ru
Stanislav Tlustenko, Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Metal Forming Department.
E-mail: titan250@mail.ru