

УДК 681.3

ДЕКОМПОЗИЦИЯ СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ НА СБОРОЧНЫЕ ЕДИНИЦЫ

Муаммер Саер М.К., Рогова О.Б., Трещеткина Е.Ю.

Современное автомобильное производство в общем случае включает в себя все основные технологические переделы: заготовительное производство, обработку деталей, а также узловую сборку и общую сборку автомобиля. Особое место по своей важности и влиянию на ключевые стадии жизненного цикла автомобиля занимает общая сборка автомобиля.

Сборка автомобиля – это финальная стадия производственного цикла, на которой материализуется замысел конструкторов, и объективируются проблемы технологов. В то же время разработка технологии сборки всегда предшествует проектированию технологических процессов изготовления отдельных деталей. Можно сказать, что в этом случае реализуется стратегия так называемого нисходящего проектирования, когда генерация проектных решений, относящихся к верхним уровням иерархии системы или процесса, выполняется раньше проектирования подсистем, элементов или операций. В [7] отмечается: «Сборка – заключительный этап производственного процесса в машиностроении, однако технологические процессы механической обработки всегда оказываются подчиненными технологии сборки, поэтому технология производства любого изделия должна начинаться с проработки технологии сборки. Только рассматривая двигатель целиком, можно определить служебное назначение каждой отдельной детали, установить требуемую степень точности и шероховатости, назначить требования к поверхностному слою, определить предельные отклонения геометрической формы, то есть назначить технические условия на изготовление и сборку. Только изучив технологию процесса сборки машины и работу узлов и отдельных деталей в ней, можно назначать допуски на сопрягаемые размеры и решать вопросы с методами сборки». Та же мысль в [5] выражена более коротко и категорично: «В структуре производства изделий машиностроения сборочные процессы являются завершающим этапом, на котором проявляются особенности взаимодействия деталей. Сборка органически связана с предшествующими процессами, при создании машин высокого качества ей принадлежит решающая роль».

Разработка технологии сборки требует решения множества трудных и важных проблем, но ключевые задачи этой стадии – синтез схемы членения и генерация последовательности общей и узловой сборки изделия. Свойства расчленяемости и собираемости машины или прибора закладываются на стадии конструирования, выявляются на стадии технологической подготовки, а верифицируются и реализуются в производственной системе, полное описание которой может быть не известно конструкторам и технологам. Эта особенность процесса сборки вместе с конструктивной и поведенческой сложностью современных изделий служат главными

причинами того, что закономерности принятия рациональных проектных решений на этапе технологической подготовки сборочного производства еще не получили точного и полного описания.

Схемой членения или схемой разузлования называется способ декомпозиции изделия на сборочные единицы, которые собираются независимо на отдельных рабочих местах (рисунок 1).

В [6] отмечается: «Разбивка изделия на сборочные единицы – это основная работа при проектировании технологического процесса сборки». Данное проектное решение, без преувеличения, играет ключевую роль в процессе технической подготовки производства автомобилей, поскольку оно влияет на множество важнейших характеристик конструкции, технологического процесса и производственного цикла. От выбранного способа разбиения конструкции на сборочные единицы зависят: технологичность изделия в процессе сборки, организационная форма сборочного производства, реализуемость конструкторских размерных цепей, содержание технологической схемы сборки, схемы комплектования рабочих мест, возможность испытаний важнейших узлов и подсистем, допустимые последовательности установки деталей и сборочных единиц и др.

По ЕСКД сборочной единицей (СЕ) называется изделие, составные части которого подлежат соединению сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием и пр.).

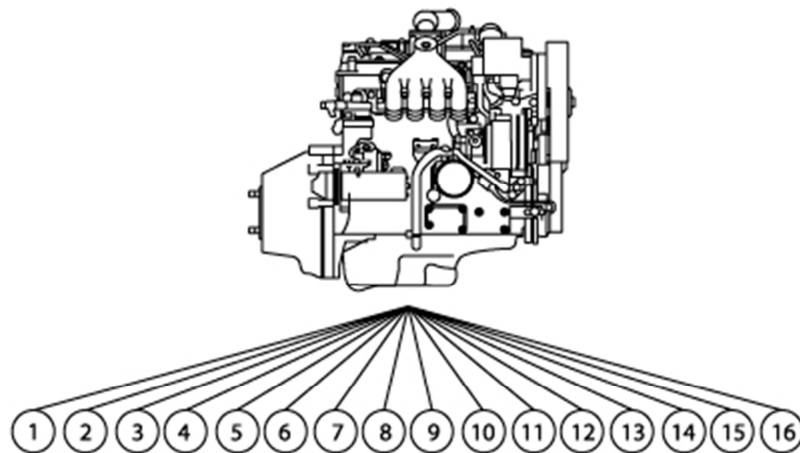


Рисунок 1 - Упрощенная схема разузлования дизельного двигателя:

1 – блок цилиндров; 2 – масляный фильтр; 3 – механизм газораспределения; 4 – головка цилиндров; 5 – газопровод; 6 – двигатель пусковой; 7 – регулятор пускового двигателя; 8 – термостат; 9 – регулятор топливного насоса; 10 – насос водяной и вентилятор; 11 – привод тахоспидометра; 12 – насос топливный; 13 – фильтр топливный; 14 – механизм передачи пускового двигателя; 15 – механизм кривошипно-шатунный; 16 – насос масляный

В этом определении, если отвлечься от технологического содержания сборочных операций, самым важным аспектом является возможность реализации сборочной единицы независимо от других структурных частей изделия. Из условия независимости сборки следует, что для каждой своей детали сборочная единица содержит комплект конструкторских баз, которые определяют ее положение с точностью и полнотой, требуемыми чертежами и техническими условиями.

Детали любой сборочной единицы образуют множество, которое обладает свойством замкнутости по многоместному отношению базирования. Легко понять, что это свойство является необходимым условием существования СЕ. Формулировка достаточного условия должна включать в себя многочисленные требования, которые накладываются на конструкцию, технологической и производственными системами.

Определенность базирования элементов сборочной единицы достигается реализацией механических связей: соединений и сопряжений, поэтому для разработки модели декомпозиции изделия нужен аппарат, который дает адекватное и точное описание совокупности механических связей конструкции. В многочисленных публикациях, см. например [4], для этих целей предлагалось использовать так называемый граф механических связей и его многочисленные модификации.

Пусть $X = \{x\}_{i=1}^n$ – множество деталей изделия, тогда в графе механических связей $G = (X, R)$ вершины из X соответствуют деталям, а ребро $r = \{y, z\} \in R$ соединяет вершины y и z тогда и только тогда, когда между деталями y и z существует механическая связь (соединение или сопряжение). На рисунке 2 показан чертеж зубчатой муфты, а на рисунке 3 представлено изображение графа механических связей этой простой конструкции.

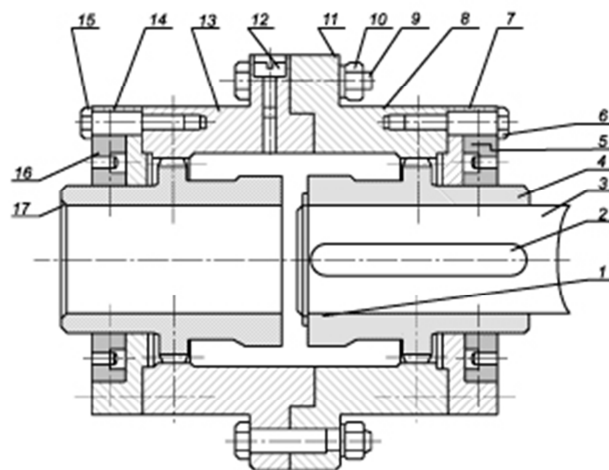


Рисунок 2 - Конструкция зубчатой муфты

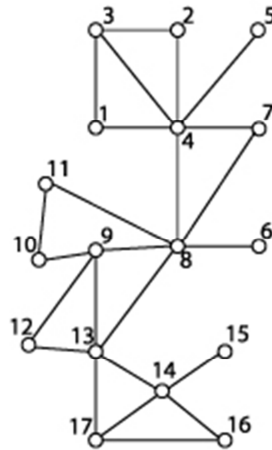


Рисунок 3 - Граф механических связей зубчатой муфты

Граф механически связей – очень интересная и содержательная модель. Она плодотворно используется для решения многих задач структурного анализа конструкций и задач синтеза конструкторских и технологических размерных цепей. К сожалению с ее помощью не удастся получить точное описание условий базирования, поскольку в графе этого типа не содержится сведений о комбинациях связей, доставляющих определенность геометрического расположения деталей. Так, степень вершины 13 в графе на рисунке 3 равна 6, а в оригинале соответствующая деталь («стакан») соединена с шестью другими деталями. Но графовая модель не позволяет установить отдельные связи или их комбинации, которые доставляют данной детали полную конструкторскую базу.

Предпринимались попытки модернизировать эту модель за счет взвешивания ребер графа величинами, которые задают число степеней свободы, отнимаемых данной механической связью [1]. Предполагается, что любая комбинация ребер графа, суммарный вес которой равен шести (число степеней свободы абсолютно твердого тела в пространстве), доставляет данной детали полную конструкторскую базу. Анализ показывает, что эта модель имеет ограниченную адекватность, поскольку она не учитывает детали со степенями подвижности, не различает позиционные связи и кинематические, уравнивает конструктивные элементы с функциональной нагрузкой и вспомогательные элементы, например крепеж.

Отношение базирования является в общем случае многоместным, так как определенность положения детали в составе изделия может достигаться реализацией нескольких механических связей. Точное математическое описание условия базирования дает гиперграф механических связей [3]. Гиперграф механических связей

$WS = (X, R, W)$ представляет собой тройку, в которой $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ – множество вершин, $R = \{r_i\}_{i=1}^m$ – множество гиперребер, W – отображение $W : R \rightarrow 2^X$, которое связывает ребра с инцидентными вершинами (это отображение иногда называют инцидентором). При описании условий базирования элементы гиперграфа получают

следующую интерпретацию: вершины представляют детали, гиперребра – минимальные геометрические группировки деталей (В-множества в терминологии [Божко А.Н. Мо]). Геометрически определенным называется такое подмножество деталей, взаимное положение которых относительно друг друга полностью определено. Это подмножество содержит полный комплект конструкторских баз для каждого своего элемента. Подмножество обладает свойством минимальности, поскольку не включает в себя ни одной группировки такого типа и удаления любого элемента из его состава нарушает свойство геометрической определенности. На рисунке 4 изображен гиперграф механических связей зубчатой муфты, показанной на рисунке 2.

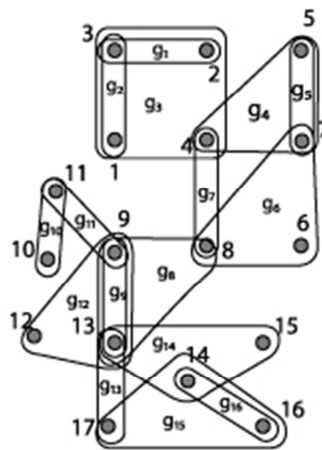


Рисунок 4 - Гиперграф механических связей зубчатой муфты

Гиперграф механических связей – это содержательная структурная модель, позволяющая решать множество конструкторских и технологических задач, например синтез последовательности сборки, генерация порядка разборки в процессе ремонта или испытаний, разработка рациональной размерной системы конструкторских размерных цепей, разбиение на сборочные единицы и др. Рассмотрим последнюю задачу. В процессе технологической практики выработан и многократно подтвержден критерий, согласно которому декомпозиция изделия на сборочные единицы должна выполняться таким образом, чтобы число сопрягаемых поверхностей при монтаже сборочных единиц должно быть минимальным.

Пусть $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ – множество деталей некоторого изделия, а $WS = (X, R, W)$ – гиперграф этого изделия. Каждому ребру $r_i \in R$ сопоставим число c_i , равное количеству различных поверхностей, по которым сопрягаются все детали, входящие в $X(r_i)$, где $X(r_i)$ обозначает все детали, инцидентные гиперребру r_i . Обозначим $A = \left\| a_{ij} \right\|_{1 \times n}^{1 \times m+1}$ матрицу инцидентности гиперграфа WS . Элемент матрицы $a_{ij} = 1$, если i -ое гиперребро инцидентно j -ой вершине и $a_{ij} = 0$ – в противном случае.

Введем переменные:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е ребро входит в } j\text{-ую сборочную единицу;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е ребро не входит ни в какую СЕ;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$z_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если деталь } k \text{ входит в } j\text{-ую сборочную единицу;} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

где $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, n+1}$, $j = \overline{1, q}$, n – число ребер гиперграфа WS , q – количество сборочных единиц.

Теперь задачу проектирования схемы членения изделия с минимальным числом сопряженных поверхностей между различными СЕ сформулируем как задачу

дискретного математического программирования с целевой функцией $\sum_{i=1}^n c_i y_i \rightarrow \min$. Это выражение требует минимизации взвешенной суммы межузловых соединений в выбранной схеме разбиения изделия на сборочные единицы.

Рассмотрим систему ограничений:

$$\sum_{i=1}^q y_{ij} + y_i = 1, i = \overline{1, n}$$

. Каждое из этих n уравнений служит математическим описанием условия, согласно которому каждое ребро входит в одну СЕ, либо соединяет различные СЕ.

$$\sum_{j=1}^q z_{kj} = 1, k = \overline{1, n+1}$$

. Эта система уравнений требует, чтобы каждая деталь принадлежала только одной сборочной единице. Иными словами, совокупность СЕ одного уровня иерархии должно быть разбиением множества деталей.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} + 1 = \sum_{k=1}^{n+1} z_{kj}, j = \overline{1, q}$$

. Сумма $\sum_{i=1}^n x_{ij}$ равняется количеству ребер гиперграфа WS , входящих в j -ую СЕ. Система уравнений 3 формализует линейное соотношение между вершинами и ребрами подгиперграфа соответствующего каждой сборочной единице.

$$\forall i = \overline{1, n} \forall j = \overline{1, q} \text{ если } x_{ij} = 1, \text{ то } \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} = \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik}$$

. То есть если i -ое ребро принадлежит j -ой СЕ, то и все вершины, инцидентные этому ребру, принадлежат j -ой сборочной единице. Для того, чтобы это логическое условие привести к стандартной

алгебраической форме введем вспомогательные переменные $t_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, q}$

. Используя эти переменные, запишем логическое условие в виде системы

$$x_{ij} = t_{ij}, \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} \geq \sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} t_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, q}$$

ограничений:

. Действительно, если

$t_{ij} = 1$, то алгебраические ограничения принимают исходную форму логических

выражений. Когда $t_{ij} = 0$, то все $x_{ij} = 0$ и неравенства $\sum_{k=1}^{n+1} a_{ik} z_{kj} \geq 0$ выполняются автоматически.

Требует пояснений смысл подсистемы ограничений номер 3. В [3] показано, что математическим описанием процесса сборки изделия служит нормальное стягивание вершин гиперграфа механических связей, а также сформулированы и доказаны необходимые условия стягиваемости этих структур. Для гиперграфов механических связей собираемых изделий должно выполняться следующее линейное соотношение между вершинами и наложенными на них гиперребрами – $H = V + 1$, где H – число ребер, а V – число верши гиперграфа. При $H < V + 1$ гиперграф превращается в плохо скоординированную структуру, его наличных связей оказывается недостаточно для определения положения каждой вершины. Если $H > V + 1$, то гиперграф может стать настолько разреженным, что потеряет формальную связность. В случае $H > V + 1$ появляются избыточные связи, которые влекут за собой перебазирование. Так называется ситуация, когда устанавливаемая деталь или сборочная единица координируется одновременно по нескольким полным комплектам конструкторских баз. В технологической практике перебазирование считается недопустимым, поскольку влечет за собой радикальное изменение всего производственного процесса. Подсистема уравнений 3 требует выполнения линейного соотношения для каждого подграфа, описывающего состав (элементы и связи) сборочной единицы.

Ограничения, заданные уравнениям и неравенствами 1-5, формализуют базовые условия существования сборочных единиц. Эта система является открытой, она может быть пополнена дополнительными соотношениями, описывающими условия сборки в конкретной производственной ситуации.

Так некоторые организационные формы сборочного производства регламентируют «емкость» сборочных единиц. Это требование можно записать в виде

$m_j \leq \sum_{k=1}^{n+1} z_{kj} \leq M_j$, где m_j, M_j – минимальное и максимальное число деталей в j -ой СЕ.

Очень часто на сборку изделия накладывается условия, по которому детали x_i и x_m должны входить в одну сборочную единицу. Это, например, требуется, когда детали некоторыми своими размерами участвуют в формировании одной

конструкторской размерной цепи, или эти детали нужны для выполнения контрольной операции. Для формализации этого условия достаточно потребовать $z_{kj} = z_{mj}$ для некоторого $1 \leq j \leq q$.

Все описанные ограничения задаются линейными равенствами и неравенствами, целевая функция – линейной формой, а переменные принимают два целочисленных значения 0 и 1, поэтому модель относится к задачам линейного программирования с булевыми переменными. Этот класс задач достаточно хорошо разработан и для их решения предложено множество точных и приближенных методов решения, например методы отсечения, метод Балаша и пр.

Список информационных источников

- [1] Базров Б.М., Таратынов О.В., Клепиков В.В. Технология сборки машин / под общей ред. Б.М. Базрова. – М.: Спектр, 2011. – 368.
- [2] Божко А.Н. Моделирование механических связей изделия// Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» – 2011. – №3.
- [3] Божко А. Н., Бетин Е. А. Анализ стягиваемости гиперграфов // Информационные технологии. – 2005. – №5 – с. 6-12.
- [4] Кузьмин В.В., Схиртладзе А.Г. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения. – М.: Высшая школа, 2008. – 280.
- [5] Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / Разд. 3: Технология производства машин, т. III-5: Технология сборки в машиностроении / отв. ред. Белянин П.Н.; ред.-сост. Соломенцев Ю.М. М.: Машиностроение, 2006. – 637.
- [6] Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1980. – 592.
- [7] Технология автомобилестроения / А. Л. Карунин, Е. Н. Бузник, О. А. Дашенко и др. / Под ред. А. И. Дашенко. – М.: Академический проект: Трикста, 2005. – 624.
- [8] Технология двигателестроения / А. Л. Карунин, О. А. Дашенко, В.И. Гладков и др. / Под ред. А. И. Дашенко. – М.: Высшая школа, 2006. – 608.