

Краткие сообщения

УДК 519.816+519.876.5

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ КОНФИГУРАЦИОННОЙ ДИАГРАММЫ СОПРЯЖЕНИЯ НЕПРОИЗВОДНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ МНОГОУРОВНЕВОГО АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков, Е.Ю. Кубрин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены вопросы реализации методики построения диаграммы сопряжения непроектируемых структурных элементов. Исходя из топологических и категорно-функторных представлений транспортной системы предложен метод декомпозиции системы на уровни (структуры), являющиеся монадными морфизмами, что позволит выявить операторы сопряжения разнородных моделей формализации при построении базы знаний информационно-аналитического комплекса анализа состояния транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: *системная модель, топологическое пространство, категорно-функторная концепция, непроектируемый структурный элемент.*

Для разработки многоуровневого информационно-аналитического комплекса анализа транспортной инфраструктуры, используется формально-математический аппарат на основе категорного подхода [1], который предполагает построение автоматизированной имитационной системы (АИС) на базе агрегатного подхода, где согласование моделей различной степени детализации осуществляется с использованием операторов сопряженности R . В работе [3] было показано что схеме сопряжения элементов сложной системы может быть поставлен в соответствие геометрический объект, состоящий из правильно соединенных друг с другом симплексов (симплициальных комплексов). С этой целью каждый элемент сложной системы заменяют симплексом, размерность которого равна числу контактов, инцидентных этому элементу, а вершины симплексов, соответствующих сопряженным контактам, отождествляются (склеиваются). Тогда модель транспортной сети, как основы АИС, можно представить как конечную совокупность K двумерных симплексов (минимальных единичных составляющих) некоторого евклидова пространства R^2 , двумерного комплекса (полиэдра) K . Идея разбиения полиэдра на симплексы прямо следует из определения компонента комплекса. Компонентой некоторого комплекса K называется такой связный его подкомплекс L , что K распадается в сумму непересекающихся

Николай Владимирович Губанов (к.т.н., доцент), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Александр Владимирович Чуваков (к.х.н.), доцент кафедры «Вычислительная техника».

Егор Юрьевич Кубрин, аспирант.

подкомплексов L и M . Если K_l, \dots, K_p – совокупность всех компонент комплекса K , то они попарно не пересекаются и в сумме составляют весь комплекс K [4]. В [2] было введено понятие непроемного структурного элемента (НСЭ) как ограниченной области структуры системы, отличающаяся только ей присущей совокупностью совместно взаимодействующих на категорном уровне свойств простых объектов или единичная составляющая структуры ТС, т.е. симплекса.

На структурном непроемном уровне декомпозиция структуры системы на НСЭ сводится к поиску полных подграфов («клик») графа $G=(U, X)$. Рассмотрим работу алгоритма декомпозиции графа $G=(U, X)$ более подробно. Основой данной процедуры служит алгоритм 457 Брона-Кэрбоша [5] инициализирующий «клики» по дереву поиска, где каждый узел в дереве соответствует полному подграфу графа, а каждое ребро соответствует вершине графа. Но применив его, например, к графу $G=(U, X)$ (рис. 1) получим набор графов следующего вида $(\{V_i, I_i\}, \{V_n, I_n\})$ которые не являются НСЭ.

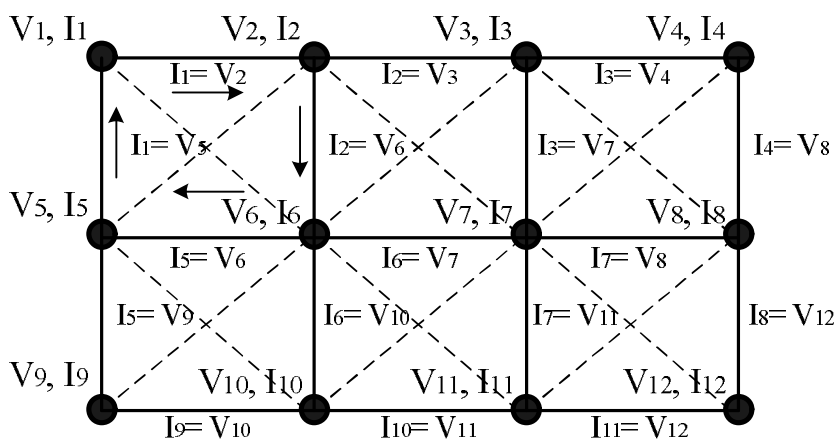


Рис. 1 - Граф $G_k=(U, X)$, взаимодействия потоков в ТС

Следовательно, перед применением алгоритма вводим процедуру подготовки (или доводки исходного графа до графа задающего статическую модель), которая заключается в следующем: в графе $G=(U, X)$ производится поиск всех подграфов $G_c'=(U', X')$ представляющих собой цикл C_n где в любой начальной вершине исходящий поток I_i будет связан со входящем потоком V_n конечной вершиной, например для графа $G=(U, X)$ один из таких циклов: $I_1 \rightarrow V_2 \rightarrow I_2 \rightarrow V_6 \rightarrow I_5 \rightarrow V_5 \rightarrow I_1$. Далее для каждого подграфа $G_c'=(U', X')$ внедряем новые ребра так, чтобы подграф представляющий собой цикл C_n преобразовался в полный подграф K_n с тем же количеством вершин. Таким образом получаем дополненный граф $G_k=(U, X)$ к которому применяется алгоритм порождения клик. Для графа $G_k=(U, X)$ это следующий набор клик K_4^i : $K_4^1 : [(V_1, I_1) - (V_2, I_2) - (V_6, I_6) - (V_5, I_5)]$; $K_4^2 : [(V_2, I_2) - (V_3, I_3) - (V_7, I_7) - (V_6, I_6)]$; $K_4^3 : [(V_3, I_3) - (V_4, I_4) - (V_8, I_8) - (V_7, I_7)]$; $K_4^4 : [(V_5, I_5) - (V_6, I_6) - (V_{10}, I_{10}) - (V_9, I_9)]$; $K_4^5 : [(V_6, I_6) - (V_7, I_7) - (V_{11}, I_{11}) - (V_{10}, I_{10})]$; $K_4^6 : [(V_7, I_7) - (V_8, I_8) - (V_{12}, I_{12}) - (V_{11}, I_{11})]$. Далее построим граф $G_k^2=(U, X)$, где вершинами являются полученные клики K_4^i к которому, в свою очередь, так же применим процедуру декомпозиции, результатом которой будет новый набор клик: $K_4^{1,2,5,4}$ и $K_4^{2,3,6,5}$. На основании этого

набора строится граф $G_k^3=(U, X)$ являющийся, для рассматриваемого примера, полным (рис.2).

Таким образом, получаем иерархическую структурную модель системы, где каждый уровень представляется набором связанных моделей определенной категории, а переход между уровнями определяется операторами сопряженности. В рамках категорийно-функторного подхода, данный класс моделей представляется монадными морфизмами (специальным образом построенные морфизмы в категории индексированных множеств), а их взаимодействие описывается многокомпонентной конфигурационной диаграммой.

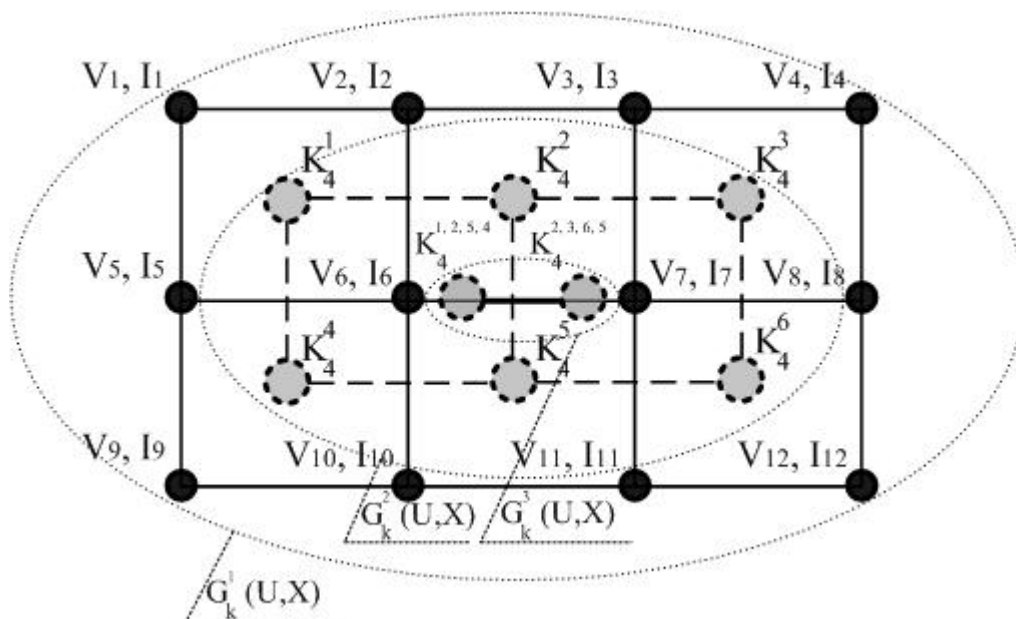


Рис. 2. Структура взаимодействия графов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батищев В.И. Категорные методы комплексного представления и структуризации разнородных данных в информационных системах анализа сложных объектов / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Международ. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – С. 263-267.
2. Батищев В.И. Методы формализации и обобщения неприводимых структурных элементов в системе многоуровневого анализа транспортной инфраструктуры / В.И. Батищев, Н.Г. Губанов, А.В. Чуваков // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2012. – № 1(33) – С. 6-11.
3. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с. ISBN 5-02-033789-7
4. Понтрягин Л.С. Основы комбинаторной топологии. 3-е изд. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 120 с.
5. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Вузовская книга, 2004. – 664 с.

Статья поступила в редакцию 4 июня 2012 г.

A TECHNIQUE FOR PRODUCING A MULTICOMPONENT CONFIGURATION CHART OF INTERFACE OF NON-PRODUCTIVE STRUCTURAL ELEMENTS IN A MULTI-LEVEL ANALYSIS SYSTEM FOR THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE

N.G. Gubanov, A.V. Chuvakov, E.U. Kubriin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The questions of applying a technique for producing a chart of an interface of non-productive structural elements are discussed. A method of system decomposition into levels (structures) which are monad morphisms by using topological and category-functor representations of the transport system is proposed. It will allow to reveal interface operators of diverse formalization models in creating the knowledge base of an information and analytical complex for analyzing the state of the transport infrastructure.

Keywords: *system model, topological space, the concept of category-functor, non-derivative structural element.*

*Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander V. Chuvakov (Ph.D (Chem.))
Egor U. Kubriin, Postgraduate Student.*

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ГЛИКОЛЬ-АМИНОВОГО РАСТВОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

Д.А. Крючков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: mahp@inbox.ru

Произведена оптимизация состава гликоль-аминового раствора для очистки попутного нефтяного газа с целью минимизации энергозатрат на регенерацию абсорбента. Предложена оптимальная рецептура раствора и проведен экономический расчет.

Ключевые слова: *аминовая очистка газа, энергозатраты, регенерация.*

Природный газ обычно содержит неприемлемый уровень примесей CO_2 и H_2S , которые называются кислым газом. Оба компонента уменьшают ценность природного газа, особенно H_2S , который сам является токсичным и при горении образует SO_2 . Углекислый газ просто уменьшает теплотворную способность природного газа. Удаление кислого газа обычно осуществляется с помощью алканоломинов.

В отечественной и зарубежной практике широкое распространение получила технология очистки газа от сероводорода водными растворами этаноламинов. Эта технология используется на 85 объектах из 100, где требуется очистка газа от кислых компонентов.

Для очистки газов от сернистых соединений и двуокиси углерода применяются водные растворы этаноламинов (моно-, ди- или триэтанолламин) [1].

Недостатком использования растворов этаноламинов являются большие затраты энергии на их регенерацию; кроме того, растворы (содержащие 70 – 85 % масс. воды) насыщают водяными парами очищенный газ.

В связи с этим большое значение имеет использование таких поглотителей для очистки газа от сероводорода и двуокиси углерода, которые позволили бы снизить затраты энергии на регенерацию и избежать дополнительного увлажнения газа.

Этого можно добиться введением в раствор моноэтанолламин + вода третьего инертного компонента. Этот компонент должен обладать следующими свойствами:

- 1) растворятся в воде;
- 2) не вступать в химические реакции с моноэтанолламином;
- 3) иметь низкую летучесть и высокую температуру кипения.

Этими свойствами обладает, например, диэтиленгликоль.

Наиболее близким к предлагаемому по технической сущности и достигаемому результату является абсорбент для очистки и осушки газа, который состоит из гликоля (ди- или триэтиленгликоля), моно- или диэтанолламина и воды.

Обычно гликоль-аминовые растворы имеют следующий состав, % масс. [1, 2]:

- моноэтанолламин – 10 – 15 %;
- диэтиленгликоль – 75 – 80 %;
- вода – 5 – 6 %.

Целью данной работы является минимизация энергозатрат на регенерацию абсорбента.

Поставленная задача достигается путем оптимизации рецептуры поглотителя.

Экспериментальное моделирование процесса очистки углекислотного газа от сероводорода, проведенное автором, показало значительную зависимость теплотрат на регенерацию поглотителя от количества воды в нем. Данные моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость энергозатрат на регенерацию поглотителя от содержания в нем воды

| Вода, масс. доли | Моноэтаноламин, масс. доли | Диэтиленгликоль, масс. доли | Расход тепла на регенерацию раствора, Мкал/час |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| 0,050 | 0,1 | 0,850 | 183,9 |
| 0,100 | 0,1 | 0,800 | 159,4 |
| 0,115 | 0,1 | 0,785 | 156,1 |
| 0,150 | 0,1 | 0,750 | 159,1 |
| 0,200 | 0,1 | 0,700 | 160,0 |
| 0,250 | 0,1 | 0,650 | 164,3 |
| 0,90 | 0,1 | 0,000 | 486,7 |

На рисунке показана зависимость энергозатрат на регенерацию поглотителя от содержания в нем воды.

Содержание моноэтаноламина поддерживалось 10,0 % масс. (обычное для реальных установок очистки). При экспериментальном моделировании изменение содержания воды сопровождалось соответственным изменением содержания диэтиленгликоля.

Как видно из табл. 1 и рисунка, минимальные энергозатраты имеют место при содержании воды в растворе 11,5 % масс. при 10 % масс. моноэтаноламина и 78,5 % масс. диэтиленгликоля.

Для определения экономической выгоды рассмотрим две следующих схемы работы установки (% масс.):

- 1) МЭА – 10 %, H₂O – 11,5 %, ДЭГ – 78,5 %;
- 2) МЭА – 10 %, H₂O – 90,0 %, ДЭГ – 0 %.

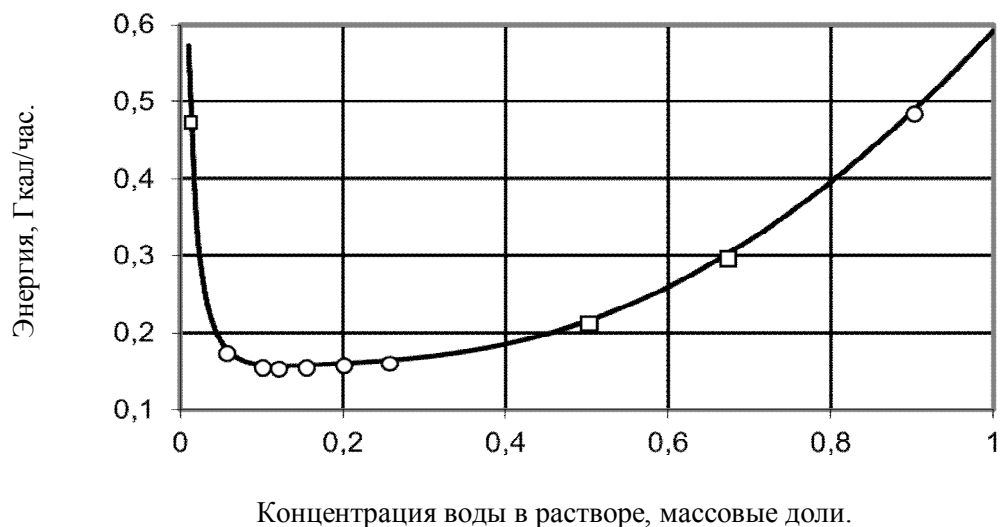
Обе эти схемы работают:

- на одном и том же составе и количестве очищаемого газа;
- с одинаковой степенью очистки газа (до санитарных норм – 2 мг/м³).

Для подсчета экономической выгоды перехода со схемы МЭА+ H₂O на схему МЭА+ H₂O +ДЭГ определим потери МЭА и ДЭГа в обеих этих схемах (табл. 2).

Для дальнейшего расчета и определения затрат в денежном выражении примем стоимость одной Гкал энергии за 1 условную единицу (1 у. е.). Тогда по отношению к стоимости энергии стоимость МЭА будет равна 90 у. е., ДЭГа – 100 у. е.

Результаты данного расчета приведены в табл. 3.



Р и с. Зависимость энергозатрат от концентрации воды в растворе.

Таблица 2

Потери МЭА и ДЭГа

| Схема | Потери МЭА, кг/год | Потери ДЭГ, кг/год |
|----------------------------|--------------------|--------------------|
| МЭА+ H ₂ O | 166,22 | 0 |
| МЭА+ H ₂ O +ДЭГ | 570,94 | 183,15 |

Таблица 3

Затраты на очистку

| Материальные и энергетические потоки | Ед. измерения | Цена за ед. измерения, у. е. | Расход в схеме: | | Затраты в схеме, у. е.: | |
|--------------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | | | МЭА+ H ₂ O | МЭА+ H ₂ O + ДЭГ | МЭА+ H ₂ O | МЭА+ H ₂ O + ДЭГ |
| МЭА | Тонна | 90 | 0,166 | 0,571 | 14,94 | 51,39 |
| ДЭГ | Тонна | 100 | 0 | 0,183 | 0 | 18,3 |
| Энергия, подаваемая в куб десорбера | Гкал | 1 | 4263,49 | 1367,43 | 4263,49 | 1367,43 |
| Сумма | | | | | 4278,43 | 1467,12 |

По данным, приведенным в табл. 3, можно сделать вывод, что эксплуатация схемы МЭА + H₂O + ДЭГ экономически выгоднее, чем схемы МЭА + H₂O. Затраты в схеме МЭА + H₂O + ДЭГ в 2,92 раза меньше, чем в схеме МЭА + H₂O.

В результате проведенного исследования было установлено, что использование поглотителя с концентрацией: МЭА = 10 %; ДЭГ = 78,5 %; H₂O = 11,5 % позволяет

уменьшить затраты тепла на регенерацию в 3,1 раза, за счет чего затраты на очистку уменьшаются в 2,92 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бекиров Т.М. Первичная переработка природных газов. – М.: Химия, 1987. – 394 с.
2. Коуль А.Л., Ризенфельд Ф.С. Очистка газа. – М.: Недра, 1968. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2012 г.

OPTIMIZATION OF GLYCOL-AMINE SOLUTION COMPOSITION FOR APG TREATING

D.A. Kryuchkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The optimization of composition of glycol-amine solution for APG treating for energy consumption minimization for absorbent regeneration. The optimal solution composition is proposed, the cost estimation having been done.

Keywords: amine treatment of gas, energy consumption, regeneration.

РОТАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ, НЕЗАВИСИМЫЙ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

В.А. Кузнецов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена теория измерения вязкости ротационным методом, принцип действия и структурная схема разработанного вискозиметра. Предложен новый способ обработки измерительного сигнала с промежуточным преобразованием во временной интервал. Приведены методы повышения точности измерения вязкости.

Ключевые слова: вязкость, ротационный метод, микроконтроллер, повышение точности измерения.

Современные технологии производства некоторых видов продукции связаны с необходимостью измерения динамической вязкости. Вязкость является или промежуточным, или конечным параметром этой продукции, определяющим ее качество. Такие виды продукции встречаются в пищевой, нефтяной, строительной, парфюмерной и других отраслях промышленности.

Вопросами измерения вязкости занимался еще Ньютон, который вывел закон, позволяющий определить динамическую вязкость по силе, приложенной к пластине, движущейся в жидкости с определенной скоростью [1]:

$$F = \eta \frac{VS}{h}. \quad (1)$$

Здесь F – сила, необходимая для перемещения пластины; η – динамическая вязкость; V – скорость движения пластины; S – площадь пластины; h – толщина слоя жидкости.

В настоящее время наиболее широко применяются ротационные вискозиметры, в которых линейное перемещение пластины заменено вращательным движением измерительного ротора, а динамическая вязкость определяется по крутящему моменту, приложенному к этому ротору. При этом формула (1) приобретает вид

$$M = \eta \frac{2\pi n S r^2}{h}, \quad (2)$$

где n – частота вращения ротора; S – площадь рабочей поверхности ротора; r – радиус ротора; h – толщина слоя жидкости между боковой поверхностью ротора и поверхностью неподвижного измерительного цилиндра.

Таким образом, динамическая вязкость определяется по алгоритму

$$\eta = \frac{h}{2\pi n S r^2} M. \quad (3)$$

Для определения динамической вязкости необходимо измерить крутящий момент M и умножить его на постоянный конструктивный коэффициент.

Алгоритм (3) справедлив для так называемых ньютоновских жидкостей, для которых обеспечивается ламинарный характер потока, а градиент скорости линейно изменяется по толщине слоя жидкости. Большинство жидкостей относятся к ньютоновским жидкостям.

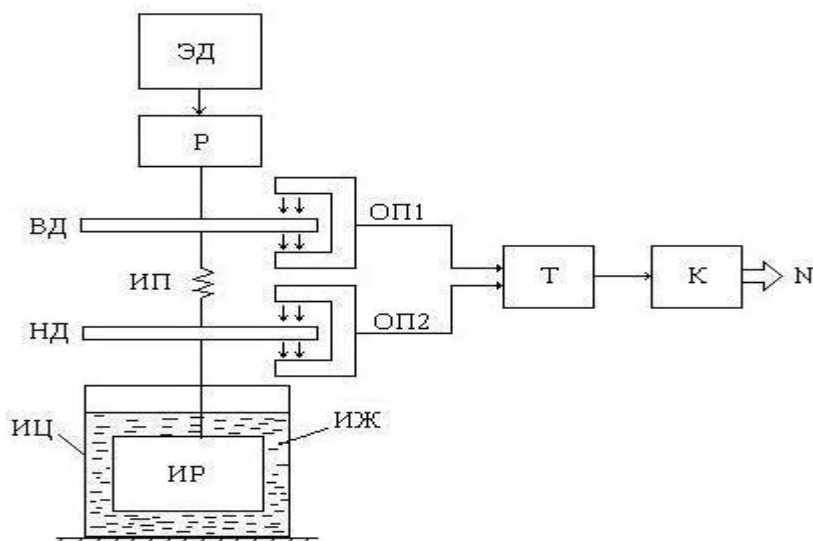
Обеспечение ламинарного характера потока для каждой жидкости достигается подбором определенной частоты вращения ротора и геометрических размеров ротора и цилиндра.

Из выражения (3) видно, что точность измерения вязкости по крутящему моменту во многом зависит от стабильности частоты вращения измерительного ротора n .

В современных вискозиметрах используется электропривод со сложными системами стабилизации частоты вращения электрических двигателей, что усложняет и удорожает конструкцию прибора в целом.

На кафедре «Информационно-измерительная техника» СамГТУ разработан ротационный метод измерения вязкости, независимый от частоты вращения измерительного ротора.

Структурная схема прибора, реализующего этот метод, представлена на рисунке.



Структурная схема вискозиметра

Вискозиметр содержит измерительный ротор ИР, измерительный цилиндр ИЦ, в который помещается измеряемая жидкость ИЖ, измерительную пружину ИП, электродвигатель ЭД, редуктор Р. На концах измерительной пружины закреплены верхний диск ВД и нижний диск НД, которые охвачены двумя оптопарами ОП1 и ОП2. В дисках выполнены радиальные прорезы, через которые проходит свет оптопар.

Оптопары при прохождении прорезей дисков генерируют импульсы напряжения, поступающие на триггер Т, который формирует временной интервал τ , пропорциональный крутящему моменту. Далее импульс длительностью τ поступает на контроллер К, который вычисляет значение вязкости по алгоритму (3).

Исключение влияния нестабильности частоты вращения измерительного ротора на точность измерения вязкости достигается следующим образом.

Угол закручивания измерительной пружины определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{Kn} M, \quad (4)$$

где Kn – коэффициент жесткости пружины; M – крутящий момент.

Оптопары ОП1 и ОП2 формируют два электрических импульса, сдвинутых относительно друг друга на время τ :

$$\tau = \frac{T}{2\pi} \alpha = \frac{\alpha}{2\pi n} . \quad (5)$$

Здесь T – период вращения измерительного ротора.

Подставляя (4) в (5), получим

$$\tau = \frac{M}{2\pi n \cdot Kn} . \quad (6)$$

Из (6) видно, что интервал времени τ прямо пропорционален крутящему моменту M , а следовательно и вязкости жидкости, и обратно пропорционален частоте вращения измерительного ротора n .

После подстановки (6) в (3) получим

$$\eta = \frac{h \cdot 2\pi n \cdot Kn \cdot r}{2\pi n S r^2} = \frac{hKn}{S r^2} \tau . \quad (7)$$

Таким образом, при измерении вязкости по интервалу времени τ полностью исключается значение частоты вращения измерительного ротора из алгоритма измерения.

Для обеспечения высокой точности измерения вязкости необходимо также выполнить условие

$$\frac{h \cdot Kn}{S r^2} = Const . \quad (8)$$

Повышенные требования предъявляются к точности изготовления и поддержания размеров измерительного ротора и измерительного цилиндра. Особенно это относится к радиусу измерительного ротора, значение которого входит в формулу в квадрате. На точность измерения вязкости влияет также нестабильность коэффициента жесткости измерительной пружины Kn .

Угол закручивания измерительной пружины выбирается таким, чтобы обеспечить линейность функции преобразования (4) и постоянство коэффициента Kn . На практике этот угол не превышает 30-40° при максимальной вязкости жидкости. Поэтому прорезы на дисках для прохождения светового потока оптопар располагаются под углом 45°, при этом число прорезей равно четырем.

Длительность τ широтно-импульсного сигнала с выхода триггера Т измеряется с помощью микроконтроллера К, в качестве которого используется макросхема АТ-Mega8 фирмы ATMEL.

Микроконтроллер производит анализ и измерение ШИМ-сигнала и преобразует его в цифровой код.

Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения значение ШИМ-сигнала усредняется за время двух оборотов измерительного ротора. При четырех прорезях на дисках микроконтроллер вычисляет средние арифметические значения результатов восьми измерений. Результат измерения вязкости через дешифратор выводится на четырехразрядный светодиодный индикатор.

Градуировка прибора проводится по двум точкам с помощью эталонной жидкости, имеющей заданную вязкость.

Принятые меры повышения точности измерения позволили в качестве электропривода использовать малогабаритные двухфазные синхронные электродвигатели

переменного тока без стабилизации частоты вращения и снизить погрешность измерения вязкости до 1 %, что соответствует лучшим мировым образцам.

Другие методы повышения точности измерения вязкости изложены в [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
2. Кузнецов В.А. Методы повышения помехоустойчивости и точности средств измерений: Учеб. пособие / Сост. В.А. Кузнецов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 68 с.

Статья поступила в редакцию 9 апреля 2012 г.

A ROTATION TECHNIQUE OF VISCOSITY MEASUREMENT NOT DEPENDENT ON ROTATION FREQUENCY

V.A. Kuznetsov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A theory of viscosity measurement by using a rotation technique, the operation principle and the design of the developed viscosimeter are described. A new way of measuring signal processing by intermediate transformation into a time interval is proposed. The methods of increasing viscosity measurement accuracy are given.

Keywords: *viscosity, rotating technology of viscosity measurement, microcontroller, measurement accuracy increase.*

СИНТЕЗ ФИНИТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДШИПНИКОМ

А.В. Стариков

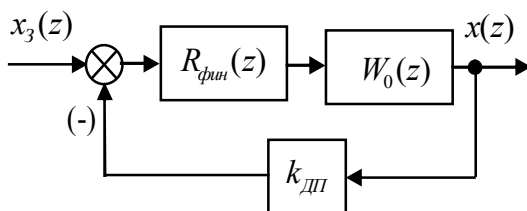
Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Синтезирован регулятор, обеспечивающий финитное управление электромагнитным подшипником. Показано, что применение такого регулятора обеспечивает переходные процессы, заканчивающиеся за пять тактов. В то же время в системе управления электромагнитным подшипником наблюдается большая статическая ошибка.

Ключевые слова: финитный регулятор, дискретная передаточная функция, система управления, электромагнитный подшипник.

В цифровых системах нашло применение так называемое финитное управление [1], позволяющее за строго фиксированное количество тактов, определяемое порядком знаменателя дискретной передаточной функции системы, перевести объект из одного состояния в другое. В этом случае при малых значениях периода дискретизации по времени будет наблюдаться высокое быстродействие системы при обработке как управляющих, так и возмущающих воздействий.

Синтезируем финитный регулятор для цифровой системы управления электромагнитным подшипником. При этом будем считать, что в системе используется только отрицательная обратная связь по перемещению ротора в поле электромагнитов. Тогда линеаризованная структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником будет выглядеть следующим образом (см. рисунок).



Линеаризованная структурная схема цифровой системы управления электромагнитным подшипником с финитным регулятором

На структурной схеме приняты следующие обозначения: $R_{фин}(z)$ – дискретная передаточная функция регулятора, обеспечивающего финитное управление; $W_0(z)$ – дискретная передаточная функция процесса перемещения ротора в поле электромагнитов с учетом экстраполятора нулевого порядка; $k_{ДП}$ – коэффициент передачи безынерционного датчика положения ротора; $x_3(z)$ – изображение задающего воздей-

ствия (как правило, равно нулю); $x(z)$ – изображение перемещения ротора; $z = e^{pT}$; p – комплексная переменная; T – период дискретизации по времени.

При управлении напряжениями на обмотках электромагнитов передаточная функция процесса перемещения ротора в поле электромагнитов как объекта управления [2]

$$W_{Oy}(p) = \frac{x(p)}{N_x(p)} = \frac{k_{ШИМ}k_{ЭМ}}{k_F \left[\frac{mT_{Э}}{k_F} p^3 + \frac{m}{k_F} p^2 + \left(\frac{k_{ЭМ}k_E}{k_F U} - T_{Э} \right) p - 1 \right]},$$

где $N_x(p)$ – изображение управляющего сигнала на входе силового преобразователя; $k_{ШИМ}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного модулятора; U – опорное напряжение силового преобразователя; $k_{ЭМ}$ – коэффициент передачи, связывающий силу, действующую на ротор со стороны электромагнитов при его центральном положении, с соотношением токов в электромагнитах; k_F – коэффициент передачи, характеризующий изменение силы, действующей на ротор, при его отклонении от центрального положения; m – масса ротора; $T_{Э}$ – постоянная времени электрической цепи обмоток электромагнитов; k_E – коэффициент передачи, определяющий приращение наводимой в обмотках электромагнитов э.д.с. со скоростью перемещения ротора в магнитном поле.

С учетом того, что широтно-импульсный модулятор кроме преобразования входного кода в скважность выполняет функцию экстраполятора нулевого порядка, дискретная передаточная функция объекта [3]

$$W_0(z) = \frac{a_1 z^2 + b_1 z + c_1}{z^3 + a_{11} z^2 + a_{22} z + a_{33}},$$

где a_1 , b_1 , c_1 , a_{11} , a_{22} и a_{33} с – коэффициенты, зависящие от параметров электромагнитов, ротора и силового преобразователя.

Дискретную передаточную функцию цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление в рассматриваемой системе управления электромагнитным подшипником, будем искать в виде

$$R_{фин}(z) = \frac{g_0 z^2 + g_1 z + g_2}{z^2 + r_1 z + r_2}. \quad (1)$$

Для определения неизвестных коэффициентов g_0 , g_1 , g_2 , r_1 и r_2 найдем дискретную передаточную функцию замкнутой системы:

$$W(z) = \frac{x(z)}{x_3(z)} = \frac{b_{00} z^4 + b_{01} z^3 + b_{02} z^2 + b_{03} z + b_{04}}{z^5 + a_{01} z^4 + a_{02} z^3 + a_{03} z^2 + a_{04} z + a_{05}}, \quad (2)$$

где $b_{00} = a_1 g_0$; $b_{01} = b_1 g_0 + a_1 g_1$; $b_{02} = c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2$; $b_{03} = c_1 g_1 + b_1 g_2$; $b_{04} = c_1 g_2$; $a_{01} = r_1 + a_{11} + a_1 k_{ДП} g_0$; $a_{02} = a_{22} + a_{11} r_1 + r_2 + k_{ДП} (b_1 g_0 + a_1 g_1)$; $a_{03} = a_{33} + a_{22} r_1 + a_{11} r_2 + k_{ДП} (c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2)$; $a_{04} = a_{33} r_1 + a_{22} r_2 + k_{ДП} (c_1 g_1 + b_1 g_2)$; $a_{05} = a_{33} r_2 + c_1 k_{ДП} g_2$.

Финитное управление требует, чтобы знаменатель передаточной функции (2) имел только нулевые корни, то есть необходимо, чтобы

$$W(z) = \frac{b_{00}z^4 + b_{01}z^3 + b_{02}z^2 + b_{03}z + b_{04}}{z^5}.$$

Для выполнения этого условия приравняем нулю все коэффициенты знаменателя (2) при степенях z ниже пятой. В результате получим систему пяти уравнений, связывающих между собой параметры регулятора с коэффициентами дискретной передаточной функции объекта управления:

$$\left. \begin{aligned} r_1 + a_{11} + a_1 k_{дп} g_0 &= 0; \\ a_{22} + a_{11} r_1 + r_2 + k_{дп} (b_1 g_0 + a_1 g_1) &= 0; \\ a_{33} + a_{22} r_1 + a_{11} r_2 + k_{дп} (c_1 g_0 + b_1 g_1 + a_1 g_2) &= 0; \\ a_{33} r_1 + a_{22} r_2 + k_{дп} (c_1 g_1 + b_1 g_2) &= 0; \\ a_{33} r_2 + c_1 k_{дп} g_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решая систему (3) относительно переменных g_0 , g_1 , g_2 , r_1 и r_2 , найдем настройки цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление электромагнитным подшипником:

$$g_2 = \frac{\Sigma_2 \Sigma_6 + \Sigma_3 \Sigma_5}{\{\Sigma_4 \Sigma_5 - [a_1 a_{33} (b_1 - a_1 a_{11}) + c_1 \Sigma_1] \Sigma_2\} k_{дп}},$$

где $\Sigma_1 = c_1 + a_1 a_{11}^2 - a_1 a_{22} - b_1 a_{11}$;

$$\Sigma_2 = (b_1 - a_1 a_{11})(a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22}) + (c_1 - a_1 a_{22}) \Sigma_1;$$

$$\Sigma_3 = (a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22})(2a_{11} a_{22} - a_{33} - a_{11}^3) - (a_{11}^2 a_{22} - a_{11} a_{33} - a_{22}^2) \Sigma_1;$$

$$\Sigma_4 = a_1 (a_1 a_{33} + b_1 a_{22} - a_1 a_{11} a_{22}) + b_1 \Sigma_1; \quad \Sigma_5 = a_{33} [(b_1 - a_1 a_{11})^2 - a_1 \Sigma_1];$$

$$\Sigma_6 = a_{33} [(a_{11}^2 - a_{22}) \Sigma_1 - (b_1 - a_1 a_{11})(2a_{11} a_{22} - a_{33} - a_{11}^2)];$$

$$g_1 = \frac{\Sigma_3 - k_{дп} \Sigma_4 g_2}{k_{дп} \Sigma_2}; \quad g_0 = \frac{2a_{11} a_{22} - a_{33} - a_{11}^3 - (b_1 - a_1 a_{11}) k_{дп} g_1 - a_1 k_{дп} g_2}{k_{дп} \Sigma_1};$$

$$r_2 = a_{11}^2 - a_{22} - (b_1 - a_1 a_{11}) k_{дп} g_0 - a_1 k_{дп} g_1; \quad r_1 = -(a_{11} + a_1 k_{дп} g_0).$$

Моделирование электромагнитного подшипника с регулятором вида (1) в программной среде Matlab Simulink показывает, что переходные процессы в системе заканчиваются за пять тактов, то есть действительно наблюдается финитное управление. В то же время в рассматриваемой системе наблюдается статическая ошибка положения ротора. Например, в электромагнитном подшипнике, разработанном для ротора с массой $m = 36$ кг, при периоде дискретизации $T = 0,01$ с смещение ротора от центрального положения под действием собственного веса составит $\Delta x = 0,337$ мм. Это объясняется тем, что регулятор (1) представляет собой статический импульсный фильтр. Аналогичные результаты получаются и при синтезе финитного регулятора в системе управления электромагнитным подшипником, использующей две обратные связи: по положению ротора и току в обмотках электромагнитов [4]. Поэтому можно сказать, что применение принципа финитного управления при разработке электромагнитного подшипника сталкивается с проблемой обеспечения требуемой точности поддержания ротора в центральном положении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Цыпкин Я.З.* Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
2. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
3. *Стариков С.А.* Влияние квантования по времени на свойства цифровой системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – № 1 (33). – 2012. – Самара: СамГТУ, 2012. – С. 165-174.
4. *Журавлев Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

Статья поступила в редакцию 3 мая 2012 г.

SYNTHESIS OF THE FINITE REGULATOR FOR THE CONTROL SYSTEM BY THE ELECTROMAGNETIC BEARING

A. V. Starikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The regulator providing the finite control by the electromagnetic bearing is synthesized. It is shown that application such a regulator provides the transients which are coming to an end for five steps. At the same time in a control system of the electromagnetic bearing the big static error is observed.

Keywords: *the finite regulator, discrete transfer function, a control system, the electromagnetic bearing*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях. В журнале предполагается публикация статей объемом до 7 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 2-4 стр. вместе с рисунками и таблицами). Объем заказных статей устанавливается редколлегией.

В приоритетном порядке будут рассматриваться заказные и обзорные статьи, а также материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуются представлять в форме кратких сообщений.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

www.samgtu.ru → Наука → Вестник СамГТУ → Серия «Технические науки».

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- договор передачи авторского права на публикацию;
- акт приема-передачи к договору;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи и краткие сообщения должны быть переданы ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова (e-mail: vest_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала