

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 536.244

## Влияние конфигурации распределительных систем на эффективность работы технологической машины

А.А. Федяев<sup>1</sup>, В.Н. Федяева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: vends@mail.ru  
Статья поступила 17.12.2011, принята 4.05.2012

*Актуальность рассмотрения вопросов экономии энергии именно при тепловой сушке обусловлена тем, что последняя характеризуется высокой энергоемкостью. Рассмотрение задачи интенсификации сушки является частью проблемы обеспечения необходимых качественных показателей продукции и экономии топлива, энергии и капитальных затрат. Для решения подобной задачи необходимо проводить широкомасштабные исследования и разработки с целью создания современных сушильных установок. Проведено комплексное экспериментальное исследование в промышленных и лабораторных условиях газодинамики сушильной камеры с целью направленного перераспределения энергоподвода в рабочей зоне. Доказана возможность управления неравномерностью интенсивности сушки пиломатериалов при выравнивании профилей скоростей при неизменных начальных параметрах теплоносителя. Прямой промышленный эксперимент, проведенный с целью оценки аэродинамических характеристик в одной из камер сушки, показал, что до 3-4 % высушиваемого материала имеет не только повышенное влагосодержание, но и брак в виде коробления и растрескивания, которые также проявляются в готовых изделиях. Проведено комплексное экспериментальное исследование в промышленных и лабораторных условиях газодинамики сушильной камеры с целью направленного перераспределения энергоподвода в рабочей зоне финских установок фирмы «Valmet». Численное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена выполнено с помощью современного вычислительного комплекса PHOENICS. Для выравнивания профиля скорости, а значит, и теплового потока и интенсивности сушки по высоте штабеля, проведена серия экспериментов, в которых с помощью дополнительного распределительного устройства определенной конфигурации осуществлялось перераспределение потока теплоносителя во входном сечении рабочей зоны камеры сушки. Выявлены экспериментально причины брака при сушке пиломатериалов, величина которого, в частности, из-за неравномерности сушки по высоте штабеля материала достигает 3 % и более. Доказана возможность управления неравномерностью интенсивности сушки при выравнивании профилей скоростей при неизменных начальных параметрах теплоносителя. Снижение брака по указанным выше причинам только на 1 % позволит в год получить дополнительно порядка 13504 м<sup>3</sup> кондиционной продукции целом по заводу. Исследования, приведенные в статье, имеют практическое применение.*

**Ключевые слова:** распределительные устройства, аэродинамика камеры, вычислительный эксперимент, промышленный эксперимент, поля скорости рабочего агента, влагосодержание древесины, процессы сушки, технологический брак.

## Effect of distribution systems configuration on technological machinery operating efficiency

А.А. Fedyaev<sup>1</sup>, V.N. Fedyaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: vends@mail.ru  
The article received 17.12.2011, accepted 4.05.2012

*The consideration urgency of the energy saving issues, especially at thermal drying, is caused by its high power-intensity. Drying intensification is part of the problem of providing production necessary qualitative indices and fuel, energy and capital costs saving. To solve such a problem, it is necessary to conduct a large-scale research and development to construct up-to-date dryers. The complex experimental investigation of a dryer gas dynamics in order to directionally redistribute energy supply in the working area has been carried out under industrial and laboratory-like environment. The possibility of controlling the drying intensity irregularity of lumber in velocity profiles equalizing at invariable initial parameters of a heat carrier has been proved. The direct industrial experiment conducted to assess the aerodynamic characteristics in one of the drying chambers has demonstrated that up to 3-4 % of dryable material has not only the heightened moisture content but also waste in the form of buckling and cracking which appear in the final products as well. The complex experimental investigation of a dryer gas dynamics in order to directionally redistribute energy supply in the working area has been carried out under industrial and laboratory-like environment of the Finnish plants made by the Valmet company. The numerical simulation of gas dynamics and heat exchange processes has been carried out using up-to-date computational complex PHOENICS. To equalize the velocity profile and, therefore, heat flow and drying intensity through the piling height, a series of experiments has been carried out in which with the help of additional distributor of a certain configuration the redistribution of heat carrier flow at the inlet cross-section of a drying chamber working area was implemented. The waste causes due to drying irregularity have been revealed experimentally, the wastes through the piling height being 3 % and more. The possibility of controlling the drying intensity irregularity of lumber in velocity profiles equalizing at the invariable initial parameters of a heat carrier. The waste decrease due to the causes mentioned just by 1 % will allow producing some extra 13504 m<sup>3</sup> of qualified products annually. The paper is of practical application.*

**Key words:** switching centers, aerodynamics of the chamber, computing experiment, industrial experiment, fields of speed of the working agent, moisture content of wood, drying processes.

Актуальность рассмотрения вопросов экономии энергии именно при тепловой сушке обусловлена тем, что последняя характеризуется высокой энергоемкостью. Согласно [1], расход котельно-печного топлива на сушку только по девяти энергоемким отраслям промышленности России (химической, машиностроительной, угольной промышленности и др.) составляет около 2 % т. условного топлива. В тоже время, средний КПД сушильных установок (СУ) редко превышает 33 %. Повышение КПД СУ вдвое позволило бы экономить ежегодно десятки млн. т. условного топлива.

Разработанная и одобренная правительством РФ «Энергетическая стратегия России до 2020 г.» и принятая правительством 17 ноября 2001 г. Федеральная целевая программа «Энергоэффективная экономика» предусматривают в числе важных приоритетов резкое повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на основе их рационального практического применения и совершенствования энергосберегающих технологий и оборудования.

Рассмотрение задачи интенсификации сушки является частью проблемы обеспечения необходимых качественных показателей продукции и экономии топлива, энергии и капитальных затрат. Для решения подобной задачи необходимо проводить широкомасштабные исследования и разработки с целью создания современных СУ.

Для разработки методов инженерного расчета и анализа СУ необходима информация о процессах, развивающихся в их элементах. Однако часто такая информация по своему объему недостаточна и требуется принятие конкретных технических решений в условиях неопределенности. Тогда особенно эффективно применение методов математического моделирования сушильных и смежных процессов на ЭВМ, а также комплексных экспериментальных исследований гидродинамического совершенства существующих рабочих камер и технологических процессов, как в промышленных, так и лабораторных условиях.

В сушильном цехе деревообрабатывающего завода ОАО «Целлюлозно-картонный комбинат» установлено 24 сушильных камеры для термообработки пиломатериалов финской фирмы «Валмет», общая производительность составляет 354000 м<sup>3</sup>/год. Сушильные машины непрерывного действия с продольной циркуляцией воздуха и поперечным размещением штабелей в камере предназначены для сушки пиломатериалов [2] при изготовлении деталей и строганных заготовок автовагоно-сельхозмашиностроения до транспортного влагосодержания 18-22 %, а также с эксплуатационным влагосодержанием 8-12 % для производства мебели.

Сложность задачи выявления резервов рационального энергоиспользования усугубляется наличием в крупногабаритных СУ неравномерности скорости сушки, а значит и неравномерности тепло- и массообмена в различных зонах по высоте штабелей пиломатериалов, что во многом предопределяет технологический брак выпускаемой продукции, а также дополнительный рост нерасчетных капитальных и энергетических затрат.

Так, например, до 3-4 % высушиваемого материала имеют не только повышенное влагосодержание, но и брак в виде коробления и растрескивания, которые также проявляются и в готовых изделиях.

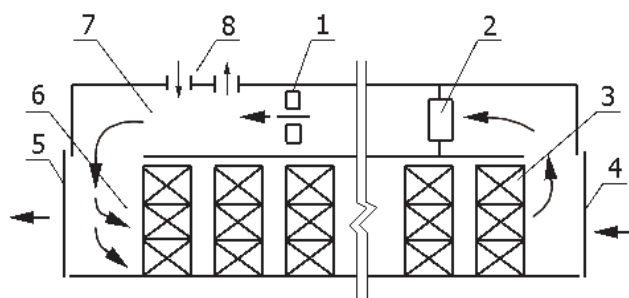
Основная причина подобных дефектов заключается в образовании недопустимо больших остаточных внутренних напряжений при нарушениях режимов сушки из-за неравномерности распределения полей скоростей сушильного агента по поперечному сечению рабочей камеры, а значит и полей влагосодержаний и протекающих тепло- и массообменных процессов в материале вследствие различного к нему энергоподвода.

Последнее подтверждается прямым промышленным экспериментом, проведенным с целью оценки аэродинамических характеристик в одной из камер сушки. Исследование скоростного режима сушилки было проведено на участке подачи и распределения сушильного агента в рабочую камеру. В рабочей зоне СУ размещается поперек потока сушильного агента 12 штабелей пиломатериалов, в каждом по три вертикально расположенных пакета, в одном пакете 8 м<sup>3</sup> досок (рис. 1).

Продольная циркуляция сушильного агента осуществляется тремя осевыми вентиляторами суммарной производительностью 210000 м<sup>3</sup>/час. Установка работает с частичной рециркуляцией сушильного агента (около 4,5 %), который подогревается с помощью ребристых паровых калориферов до температуры 45-65 оС. Периодически, с интервалом порядка 12 часов один штабель высушенного материала удаляется через герметичные двери участка подачи агента сушки, другой подается в противоположном загрузочном конце СУ.

Очевидно, что различная скорость сушки по высоте штабелей обуславливается неодинаковыми гидродинамическими условиями, что подтверждается результатами опытного исследования аэродинамики камеры на «холодных» режимах.

Так, например, отмечается значительная неравномерность как продольных (вблизи торцов пиломатериалов рост скорости сушильного агента до 25 %), так и вертикальных профилей скорости (падение скорости до 50 %, а также наличие обратных потоков в верхней и повышение скорости почти в 2 раза в нижней части камеры) в рабочей зоне участка подачи и распределения теплоносителя (рис. 2 А).



**Рис. 1.** Схема конвективной сушильной камеры: 1 – осевой вентилятор; 2 – паровой калорифер; 3 – штабель сушильного материала; 4 – загрузочное устройство; 5 – разгрузочное устройство; 6 – узел подачи и распределения сушильного

ного агента в рабочей зоне; 7 – зона подачи сушильного агента; 8 – узел рециркуляции теплоносителя.

Выравнивание профилей скорости сушильного агента, а значит и выравнивание процессов тепломассообмена влаги по сечению материала за счет перераспределения потока теплоносителя, исключение застойных зон и т. д., то есть умение управлять аэродинамической обстановкой в рабочей зоне СУ, приводит к снижению брака из-за неравномерности сушки как по высоте, так и ширине штабеля пиломатериалов и, соответственно, к снижению нерасчетных эксплуатационных расходов.

Варьирование скоростью теплоносителя в локальных зонах приводит в них и к изменению его расхода  $G$  кг/с, который однозначно связан с количеством подводимого тепла к сушиму материалу:

$$Q = G \cdot C_T \cdot (t_{c.a.} - t_{пм}), \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

где  $t_{c.a.}$  и  $t_{пм}$  – температуры сушильного агента (теплоносителя) и пиломатериалов соответственно, °С;  $C_T$  – удельная теплоемкость агента сушки, кДж/кг·°С.

Данные численных исследований процессов гидродинамики и тепломассообмена, проведенных с помощью вычислительного комплекса PHOENICS, также достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что очевидно из представленного, к примеру, на рис. 3 расчета аэродинамики рассмотренного выше узла подачи и распределения сушильного агента в трехмерной постановке. Последнее свидетельствует о широких возможностях использования расчетного комплекса и предлагаемой К-Е модели турбулентности [3] для поиска рациональных аэродинамических режимов работы различных теплотехнологических агрегатов при рассмотрении подобной задачи [4, 5, 6].

Особенности данного метода и достаточно полное изложение основ представлены в работах [7, 8, 9].

С помощью экспериментальных исследований в лабораторных условиях также могут быть найдены рациональные решения для регулирования аэродинамической ситуации в рабочей камере. Поиск факторов для оптимизации аэродинамической обстановки начального (разгрузочного) участка камеры проводился на разработанной и изготовленной в масштабе 1:50 модели отмеченной ранее СУ. Измерение профилей скорости в лабораторных условиях проводилось с помощью прецизионной термоанемометрической аппаратуры отечественного производства, работающей в режиме постоянной температуры в комплекте с одноточечным стандартным датчиком с диаметром нити 5 мкм. Осредненные профили потоков измерялись с помощью миниатюрного щелевого насадка полного давления в комплекте с микроанометром с наклонной трубкой. Скорости воздушных потоков менее 0,6 м/с замерялись с помощью термоанометра. На специально разработанной аэродинамической установке [4] проводились тарировки зондов термоанометра и пневмотрубок.

Направление аэродинамических потоков определялось с помощью флажка. Режим течения – турбулентный, число Рейнольдса составило  $Re_d = 2,3 \cdot 10^4$ .

Измерение динамических характеристик потоков на опытном стенде и при прямом промышленном эксперименте проводилось в семи вертикальных сечениях узла подачи и распределения сушильного агента 1 (рис. 2 А). Каждое такое сечение разбивалось на 80 квадратов (поперечное сечение реальной сушильной установки: высота – 7,7 м, ширина – 7,0 м). В каждом квадрате определялось осредненное значение скорости в направлении максимального вектора. Средняя скорость потока при лабораторных исследованиях в рабочей зоне соответствовала скорости сушильного агента при промышленных испытаниях сушильной машины и составляла порядка 3,5 м/с.

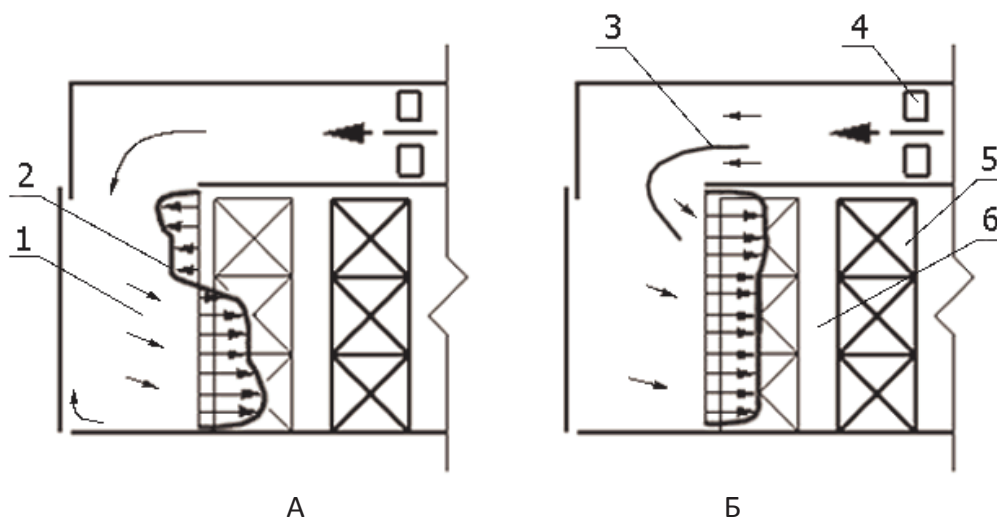
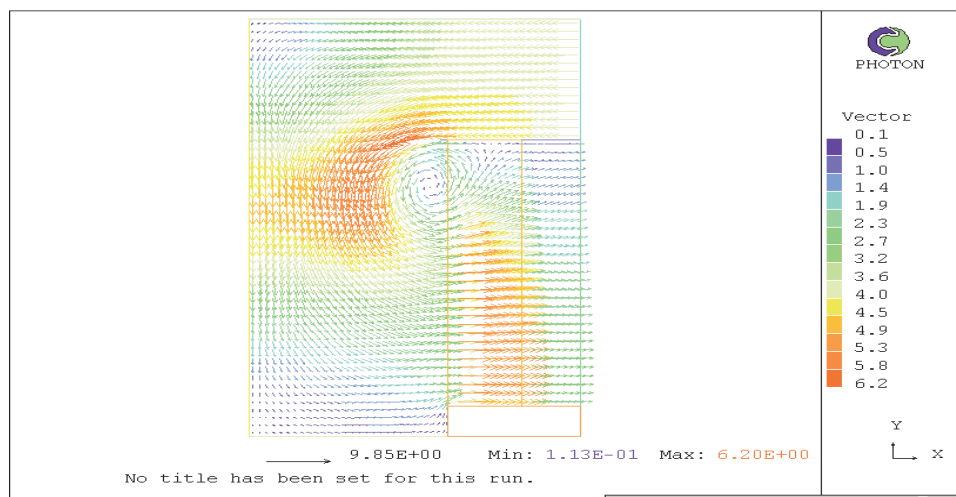


Рис. 2. Существующая схема узла подачи сушильного агента в рабочую зону – А;

схема узла с дополнительным распределительным устройством – Б. 1 – узел подачи и распределения сушильного агента в рабочей зоне; 2 – профиль скорости теплоносителя на входе в рабочую зону; 3 – дополнительное распределительное устройство; 4 – осевой вентилятор; 5 – штабель сушимо материала; 6 – рабочая зона сушильной камеры.



**Рис. 3.** Распределение профилей скорости в узле подачи и распределения теплоносителя сушильной установки.

Анализ эпюр скоростей в узле подачи и распределения сушильного агента, как по вертикальным, так и по горизонтальным сечениям (10 горизонтальных сечений по высоте рабочей зоны – 5,3 м), показал наличие (особенно в вертикальном сечении – непосредственно перед первым штабелем сушильного материала) обширной застойной зоны с обратным движением теплоносителя (рис. 2 А) в верхней части на входе в рабочую зону камеры б.

Последнее предопределяет неблагоприятные условия для сушки не только для верхнего пакета первого штабеля, но и, очевидно, для последующих штабелей сушимого материала по длине рабочей зоны. Выравнивание профилей скорости на входе в рабочую зону перед первым штабелем пиломатериалов приведет к равномерному распределению теплового потока, а значит и интенсивности сушки по высоте штабеля.

Для достижения этой цели была проведена серия экспериментов, в которых с помощью дополнительного распределительного устройства в виде фасонной пластины разной конфигурации осуществлялось перераспределение потока теплоносителя во входном сечении рабочей зоны камеры сушки.

В конечном итоге были найдены такие форма и место расположения распределительного устройства, которые позволили получить практически равномерную эпюру скорости (рис. 2 Б) перед первым штабелем сушильного материала. Равномерный энергоподвод, а значит и равномерная интенсивность сушки пиломатериалов позволяют не только снизить технологический брак из-за повышенного влагосодержания, но и улучшить качество выпускаемой пилопродукции за счет уменьшения пересыхания материала.

Снижение брака по указанным выше причинам только на 1 % позволит в год получить дополнительно порядка 146 м<sup>3</sup> кондиционной продукции на одну сушильную камеру, или около 3504 м<sup>3</sup> в целом по заводу. Работа имеет практическое применение.

#### **Выводы.**

1. Выявлены экспериментально причины брака при сушке пиломатериалов, величина которого, в частно-

сти, из-за неравномерности сушки по высоте штабеля материала достигает 3 % и более.

2. Проведено комплексное экспериментальное исследование в промышленных и лабораторных условиях аэродинамического совершенства сушильной камеры с целью направленного перераспределения энергоподвода в рабочей зоне. Доказана возможность управления неравномерностью интенсивности сушки пиломатериалов при выравнивании профилей скоростей и неизменных начальных параметрах теплоносителя.

#### *Литература*

1. Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Опыт и практика СССР, ВНР, ГДР и ЧССР / под ред. Д.Б. Вольфберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
2. Лыков В.М. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 430 с.
3. Роди В. Примеры моделей турбулентности для течения не сжимаемой жидкости // Аэрокосмическая техника. 1983. Т.1, № 2. С.112-119.
4. Видин Ю.В., Федяев А.А. Энергосбережение при сушке текстильных материалов сложной формы // Вестн. Краснояр. гос. ун-та. 1999. Вып. 19. С. 139-142.
5. Федяев А.А. Совершенствование сопловых сушилок лущеного шпона // Теплоэнергетика и технологии: материалы конф. Каунас. техн. ун-та. Каунас, 2000. С. 59-62.
6. Федяев А.А. Снижение внеплановых энергозатрат при управлении аэродинамическими режимами в топке котла // Изв. высших. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2000. № 3-4. С. 36-40.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984. 296 с.
8. Жубрин С.В., Павицкий Н.И., Смагин В.В., Хрупов А.П. Вычислительное моделирование конвективного переноса в технологических установках. М.: МЭИ, 1986. 44 с.
9. Мотулевич В.П., Жубрин С.В. Численные методы расчета теплообменного оборудования. М.: Изд-во МЭИ, 1988. 54с.
10. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. М.: Энергоатомиздат, 1986. 136 с.

#### *References*

1. Effective utilization of fuel and energy resources. Experience and practice of the USSR, HPR, GDR and ChSSR / pod red. D. B. Vol'fberg. M.: Energoatomizdat, 1983. 208 p.
2. Lykov V.M. Drying in the chemical industry. M.: Khimiya, 1970. 430 p.

3. Rodi V. Turbulence models examples for incompressible liquid flow // Aerokosmicheskaya tekhnika. 1983. T.1, № 2. P.112-119.

4. Vidin Yu.V., Fedyayev A.A. Energy saving in the process of irregular shape textiles drying // Vestn. Krasnoyar. gos. un-ta. 1999. Vyp. 19. P. 139-142.

5. Fedyayev A.A. Improvement of nozzle dryers for rotary-cut veneer // Teploenergetika i tekhnologii: materialy konf. Kaunas. tekhn. un-ta. Kaunas, 2000. P. 59-62.

6. Fedyayev A.A. Unfor-seen power inputs reduction at aerodynamic modes control in the furnace // Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy. Problemy energetiki. 2000. № 3-4. P. 36-40.

7. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat exchange and fluid dynamics. M.: Energoizdat, 1984. 296 p.

8. Numerical modeling of convective transport in process installations / S.V. Zhubrin, N.I. Pavitsky, V.V. Smagin, A.P. Khrupov. M.: MEI, 1986. 44 p.

9. Motulevich V.P., Zhubrin S.V. Numerical methods of heat exchanging equipment calculation. M.: Izd-vo MEI, 1988. 54 p.

10. Danilov O.L., Leonchik B.I. Energy savings at heat drying. M.: Energoatomizdat, 1986. 136 p.

УДК 519.711.3

## Декомпозиция цепной дроби на целые числа

Н.Д. Шахова<sup>1</sup>, А.А. Дриженко<sup>1</sup>, С.С. Унистюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: iipm@brstu.ru  
Статья поступила 12.01 2012, принята 20.05.2012

*Разложение дробно-рациональной передаточной функции  $W = \frac{Q^m}{R^n}$ , в виде цепной дроби дает возможность получить ее как структуру, состоящую из элементарных звеньев. Элементарные звенья с вещественными коэффициентами передач и постоянных времени в некоторых случаях необходимо получить в виде целочисленных значений. Любое число  $\frac{a}{b}$  можно представить в виде конечной цепной дроби. Причем, в зависимости от  $a$  и  $b$ , получаем одно из трех разложений:  $a$  – четное число,  $b$  – нечетное число;  $a$  – нечетное число,  $b$  – нечетное число;  $a$  – нечетное число,  $b$  – четное число. Для каждого разложения получена структурная схема реализации функции. Использование предложенных разложений числа  $\frac{a}{b}$  рассмотрено на примере синтеза системы. Таким образом, с помощью предложенных разложений числа  $\frac{a}{b}$  можно любую дробно-рациональную функцию, соответствующую передаточной функции системы, представить в виде определенной структуры из элементарных звеньев с целочисленными значениями параметров.*

**Ключевые слова:** дробно-рациональная функция, разложение числа, нечетное число, четное число, целочисленные значения, вещественные коэффициенты, элементарные звенья.

## Decomposition of continued fraction into integers

N.D. Shakhova<sup>1</sup>, A.A. Drizhenko<sup>1</sup>, S.S. Unistyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: iipm@brstu.ru  
Received 12.01.2012; Accepted 20.05.2012

*The decomposition of an is fractional-rational transfer function  $W = \frac{Q^m}{R^n}$ , in the form of chain fraction, gives the chance to gain it as the structure consisting of elementary links. Elementary links with material factors of transfer and time constants in certain cases are necessary for gaining in the form of an integral value. Any number  $\frac{a}{b}$  it is possible to present in the form of final chain fractions. And depending on  $a$  and  $b$  the one of three decomposition is gaining:  $a$  – an even number,  $b$  – an even number;  $a$  – an odd number,  $b$  – an odd number;  $a$  – an odd number,  $b$  – an even number. For each decomposition the block diagram of implementation of function is gained. Using of the offered decomposition of number  $\frac{a}{b}$  is observed on a system synthesis instance. Thus, by means of the offered decomposition of number, it is possible any fractionally-rational function, matching to a system transfer function, to present in the form of certain structure from elementary links with an integral value of parameters.*

**Key words:** fractional rational function, decomposition, odd number, even number, integer values, real coefficients, elementary units.

Разложение дробно-рациональной передаточной функции  $W = \frac{Q^m}{R^n}$ , где:  $Q^m$  – числитель дробно-рациональной функции от переменной  $S$  степени  $m$ ;  $R^n$  – знаменатель дробно-рациональной функции от переменной  $S$  степени  $n$ , в виде цепной дроби [1] дает возможность получить ее как структуру, состоящую из элементарных звеньев. Реализацию элементарных

звеньев с вещественными коэффициентами передач и постоянных времени в некоторых случаях необходимо получить в виде целочисленных значений.

Любое число  $\frac{a}{b} \in N$  можно представить в виде конечной цепной дроби [1]: