



УДК 004.942

© 2016 г. **В.М. Дмитриев**, д-р техн. наук,
Т.В. Ганджа, канд. техн. наук

(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ В СИСТЕМАХ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Описывается методика построения и исследования активных компонентов, которые включают в себя физический, логический и визуальный виды поведения. В отличие от традиционных такие компоненты характеризуются некоторыми событиями, которые могут наступать внутри компонента или быть внешними по отношению к нему. Для анализа объектов, содержащих активные компоненты, применяются системы многоуровневого компьютерного моделирования.

Ключевые слова: сложные технические (технологические) управляемые системы, управляемые технологические объекты, многоуровневая компьютерная модель, метод компонентных цепей.

DOI: 10.22250/isu.2016.49.25-35

Введение

Управляемые технические (технологические) объекты (УТО) характеризуются тем, что в них протекают непрерывные процессы использования или преобразования мультифизических энергетических и (или) многокомпонентных вещественных потоков. Как правило, эти процессы описываются системами алгебро-дифференциальных уравнений, составленных относительно внутренних параметров и переменных данного объекта. При достижении определенных значений какой-либо переменной наступает определенное событие, сообщение о котором должно быть передано устройству управления (УУ), которое совместно с УТО образуют сложную техническую (технологическую) управляемую систему (СТУС). Так как функционирование УУ носит дискретно-событийный характер, модель, описывающая его работу, может быть представлена в формате имитационного моделирования. В этом случае она будет состоять из компонентов, описывающих реакцию УУ на входящие сообщения и вырабатывающие управляющие воздействия на исполнительные устройства.

Для моделирования СТУС, в которых одновременно протекают непрерывные процессы УТО, направленные на преобразование мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков, и дискретно-событийные процессы устройства управления, взаимодействующего с пользователем-

управленцем путем визуализации наблюдаемых характеристик и формирования задающих воздействий, в данной работе предложено использовать аппарат многоуровневого компьютерного моделирования [1]. В настоящее время он реализован в виде комплекса программ «Среда многоуровневого компьютерного моделирования МАРС» [2], предназначенного для автоматизации натуральных и вычислительных экспериментов над СТУС и их компьютерных моделей.

Концепция многоуровневого моделирования СТУС

Для анализа процессов, протекающих в сложных технических (технологических) управляемых системах, предложена структура многоуровневых компьютерных моделей СТУС, включающая:

объектный уровень, на котором формируется модель, отражающая физическое поведение исследуемого УТО с подключенными к нему моделями исполнительных и измерительных устройств;

логический уровень, где формируется функциональная модель устройства управления, описывающая его реакцию на происходящие в модели УТО события, с выработкой управляющих воздействий на нее, с учетом задающих воздействий, сформированных пользователем;

визуальный уровень, содержащий средства визуализации результатов анализа компьютерной модели УТО и формирования задающих воздействий и других реакций на модель.

Многоуровневая компьютерная модель, созданная на основе предложенной структуры, формируется в графической форме из компонентов, объединяемых связями на объектном и логическом уровне. Связи объектного уровня отражают обмен мультифизическими энергетическими и многокомпонентными вещественными потоками между компонентами, составляющими модель УТО с подключенных к ней моделями исполнительных и измерительных устройств. На логическом уровне компоненты соединены между собой связями, по которым осуществляется обмен сообщениями с данными различных типов между компонентами-источниками и компонентами-приемниками сообщений.

Понятие активного компонента

Активный компонент (АК) представляет собой некоторую неделимую часть модели УТО, в которую, помимо непосредственно модели компонента или некоторой функциональной части объекта, могут входить взаимосвязанные с ней измерительные и исполнительные устройства, а также некоторое устройство управления, осуществляющее генерацию внутренних событий компонента и производящее реакцию компонента на произошедшее внешнее событие. Помимо этого такая модель должна включать в себя средства визуализации протекающих в АК процессов, а также средства интерактивного формирования задающих воздействий, локальных для этого активного компонента. Таким образом, модель активного компонента должна отображаться на всех трех уровнях многоуровневой компьютерной модели. Для этого она будет иметь вид, представленный на рис. 1,

и включает в себя:

физическую модель АК, которая с помощью системы алгебро-дифференциальных уравнений будет описывать протекающие в нем непрерывные процессы преобразования мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков. Значения наблюдаемых характеристик Y , преобразованные с помощью инкапсулированных в АК моделей измерительных устройств к виду информационных сигналов u , передаются в его логическую модель;

логическую модель АК, содержащую алгоритмы выработки управляющих сигналов u на основе результатов измерений наблюдаемых характеристик физической модели активного компонента Y , пользовательских команд C , вырабатываемых с помощью визуальной модели АК, и внешних данных M_{IN} , поступающих в модель от других компонентов в результате наступления некоторого внешнего события компонента. Также задачей логической модели является выработка сообщений M_{OUT} , передаваемых другим компонентам логического уровня с целью их информирования о некотором внутреннем событии данного АК;

визуальную модель АК, предназначенную для визуализации протекающих в компоненте процессов с помощью выбранных из вектора u значений ряда переменных V и генерации пользовательских воздействий на активный компонент C .

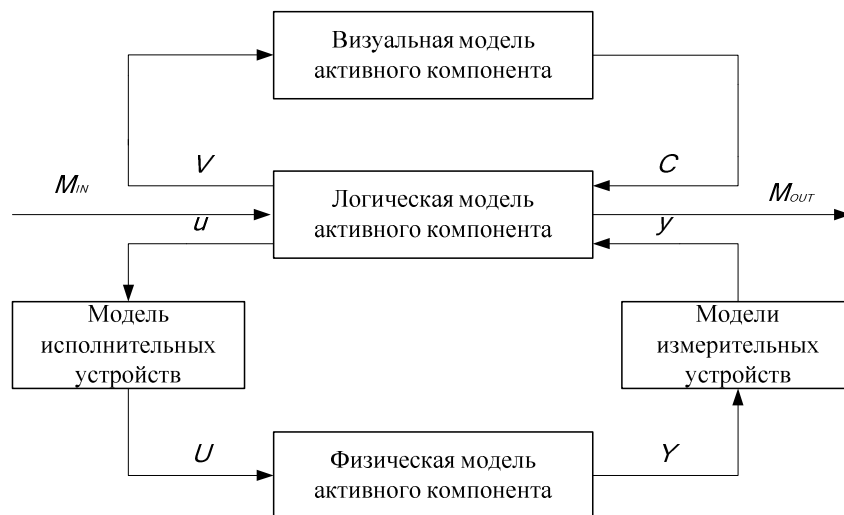


Рис. 1. Структура активного компонента.

Таким образом, расположенная на трех уровнях многоуровневой КМ СТУС модель активного компонента инкапсулирует в себе описание всех трех видов его поведения – физического, логического и визуального, которые описываются соответствующими моделями АК.

Физическая модель активного компонента

На объектном уровне формируется модель объекта, отражающая его комплексное физическое поведение. Она представляется взаимосвязанными компонентами, в том числе активными, представленными на этом уровне своими физическими моделями. Компонент является моделью элемента исследуемого объекта, взаимодействующий с другими компонентами с помощью связей. По ним в зависимости от типа компонентов могут протекать информационные, мультифи-

зические энергетические или вещественные потоки. Каждая связь S_i ($i=1..n$) компонентов объектного уровня, обобщенный вид которых приведен на рис. 2, характеризуется двумя топологическими координатами – ветвью b_j и узлом n_j .

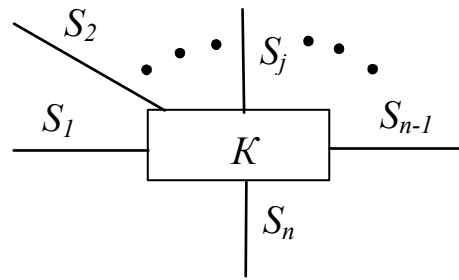


Рис. 2. Отображение активного компонента на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели.

Являясь неоднородной векторной связью [3], она позволяет описать обмен информацией, мультифизической энергией или многокомпонентными вещественными потоками. При этом под компонентом потока здесь понимается конкретное вещество, характеризующееся своей концентрацией в общем многокомпонентном потоке веществ.

Каждая информационная связь S_{Ij} представляется двумя топологическими координатами – узлом n_j и ветвью b_j – с одной потенциальной переменной V_{nj} .

Каждая энергетическая связь S_{Ej} , описывающая процесс обмена компонентами энергией различной природы (гидравлической, термодинамической, электрической и др.), представлена совокупностью двух топологических координат – ветви b_j и узла n_j – с заданием направления потока в ветви. Каждой ветви b_j ставится в соответствие потоковая переменная V_{bj} . Каждому узлу n_j как для энергетической, так и для информационной связи будет соответствовать потенциальная переменная V_{nj} . Потенциальные и потоковые переменные всех связей компонента, называемые далее *переменными его связей*, образуют локальный координатный базис компонента и задаются в нем своими уникальными порядковыми номерами. Номер ветви b_j , поток в которой направлен от узла к компоненту, принимается со знаком «минус», а номер ветви, поток в которой протекает от компонента к узлу, – со знаком «плюс».

Однородная векторная связь есть совокупность нескольких информационных связей, и она представлена векторным узлом \mathbf{n}_j , которому соответствует вектор потенциальных переменных \mathbf{V}_{nj} .

Неоднородная векторная связь [3] представляет собой произвольную совокупность энергетических и информационных связей. Она определяется векторным узлом \mathbf{n}_j и инцидентной ему векторной ветвью \mathbf{b}_j . Векторный узел \mathbf{n}_j представляет собой массив номеров потенциальных переменных V_{nji} скалярных энергетических и информационных связей, входящих в состав рассматриваемой неоднородной векторной связи. В векторную ветвь \mathbf{b}_j включены номера потоковых переменных энергетических связей V_{bj_i} , включенных в состав рассматриваемой векторной связи.

При формировании компонентной цепи (КЦ) сформированной на объектном уровне компьютерной модели УТО, являющейся ее внутримашинным пред-

ставлением, каждая неоднородная векторная связь автоматически расщепляется на ряд энергетических и информационных связей.

Анализ компонентной цепи исследуемой модели с получением значений всех переменных ее связей в статическом или динамическом (на каждом шаге по времени или частоте) осуществляется универсальным вычислительным ядром [4] на основе опросов топологического и вычислительного блоков компонента.

Совокупность всех скалярных пар «номер ветви со знаком – номер узла» ($\pm b_j, n_j$) энергетических связей компонента, входящих в состав всех его неоднородных векторных связей, образует его *топологический блок*. На основе опроса топологических блоков всех компонентов, входящих в модель объектного уровня, формируются топологические уравнения модели исследуемого объекта для каждого скалярного узла, образованного соединением энергетических связей компонентов. Они представляются в виде $\sum \alpha_j \cdot V_{Bj} = 0$, где α_j – инцидентный коэффициент, который равен: 1 (если поток в ветви направлен от компонента к узлу); -1 (если от узла к компоненту); 0 (если ветвь не инцидентна узлу, для которого сформировано данное уравнение).

Для описания физических процессов каждый компонент объектного уровня на этапе опроса своего вычислительного блока формирует уравнения, составленные относительно переменных связей. Эти уравнения, называемые *компонентными*, могут быть линейными, нелинейными или дифференциальными. В них входят коэффициенты, значения которых зависят от параметров компонента, подлежащих варьированию с помощью алгоритмов, формируемых на логическом уровне многоуровневой КМ УТО.

Формирование и решение общей системы уравнений модели УТО, принадлежащей объектному уровню многоуровневой КМ, осуществляется алгоритмами, реализованными в рамках универсального вычислительного ядра [4]. К ним относятся алгоритмы линеаризации нелинейных и алгебраизации дифференциальных уравнений, а также решения полученных систем линейных алгебраических уравнений методами линейной алгебры. Для вывода результатов анализа их универсального вычислительного ядра в анализируемую модель, представленную в форме метода компонентных цепей [5], добавляются измерительные компоненты – измерители потенциальных и потоковых переменных. Отображаясь одновременно на двух уровнях многоуровневой КМ УТО, они осуществляют передачу результатов с ее объектного на логический уровень.

Логическая модель компонента.

На логическом уровне многоуровневой КМ СТУС формируются алгоритмы управления, лежащие в основе функционирования УУ. В них встраиваются отображаемые на логическом уровне многоуровневой КМ СТУС модели активных компонентов, имеющих собственное логическое поведение. Оно описывается событиями, которые с точки зрения АК делятся на внутренние и внешние.

Внутренними будут являться события, происходящие внутри активного компонента, о которых он должен сообщить другим подключенным к его выводам компонентам. Таким событием будет достижение некоторой переменной связью АК, характеризующей его состояние, определенного, зачастую порогового

или экстремального значения. При этом информация об этих событиях должна быть передана другим компонентам, состояние которых должно быть изменено.

Внешним по отношению к компоненту будет событие, наблюдаемое в других АК моделируемой СТУС и о котором должно быть сообщено данному компоненту по его входной связи. Для приема информации о внешних событиях компонент имеет узлы $n_{L1}, n_{L2}, \dots, n_{Ln}$, расположенные слева от изображения компонента на логическом уровне, представленном на рис. 3. Для передачи сообщений о наступлении внутренних событий компонента справа от его изображения приводятся узлы $n_{Ln+1}, n_{Ln+2}, \dots, n_{Ln+m}$.



Рис. 3. Изображение активного компонента на логическом уровне многоуровневой КМ СТУС.

Взаимодействие активного компонента с другими компонентами функциональной модели устройства управления СТУС осуществляется на основе алгоритма передачи сообщений [6]. Он позволяет организовать взаимодействие между компонентами логического уровня путем обмена сообщениями, включающими в себя данные различных, в том числе не числовых типовых данных. При этом в одной цепочке один компонент может быть отправителем, а ряд компонентов, подключенных своими входными узлами к его определенному выходному узлу, будут приемниками данных. Обработав принятые данные, такие компоненты имеют возможность изменить свое физическое поведение в случае их отображения на объектном уровне или передать результаты их обработки другим компонентам. Помимо того, получив сообщения с некоторыми данными, компонент имеет возможность их отображения на визуальном уровне многоуровневой КМ СТУС. Для этого, помимо логического уровня, он должен иметь свое отображение на визуальном уровне модели.

Визуальная модель компонента.

Визуализация результатов работы КМ СТУС может осуществляться стандартными визуальными компонентами, входящими в библиотеку моделей компонентов среды многоуровневого компьютерного моделирования. Помимо этого, каждый активный компонент для целей отображения протекающих в нем процессов может иметь свое отображение на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели. В таком случае в его программно-алгоритмическую реализацию, представляющую собой класс, написанный на языке объектно-ориентированного программирования, добавляются методы динамической прорисовки его изображения на визуальном уровне. В него также могут быть включены функции взаимодействия пользователя с визуальным компонентом. К ним относятся:

реакция компонента на нажатие или отпускание левой или правой кнопки мыши по его визуальному отображению;

реакция на подведение мыши к его отображению;

реакция на нажатие на любую кнопку клавиатуры при выделении данного компонента с помощью мыши.

Для изменения параметров динамического изображения компонента на визуальном уровне многоуровневой КМ предусматривается задание таких атрибутов как стиль и цвет прямых линий, дуг и эллипсов; стиль закрашивания замкнутой области; вид, размер и цвет шрифтов, которыми осуществляется визуализация определенной текстовой или цифровой информации на визуальном изображении компонента.

На основе представленного выше описания активного компонента на примере модели системы поддержания (управления) уровня жидкости в емкости рассмотрим методику построения моделей, включающих АК.

Многоуровневая компьютерная модель системы поддержания уровня жидкости в емкости.

Для различных отраслей промышленности актуальным является вопрос поддержания заданного, зачастую максимального, уровня жидкости в емкости. При этом модель такой емкости, в которой не учитываются термодинамические эффекты охлаждения и нагревания жидкости, можно представить активным компонентом, имеющим свое отображение на всех трех уровнях многоуровневой компьютерной модели. Его отображением на объектном уровне будет компонент, показанный на рис. 4.

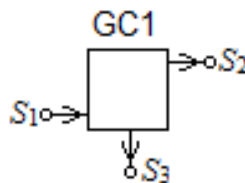


Рис. 4. Отображение активного компонента «Емкость» на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели.

С помощью связи S_1 , переменными которой являются входное давление P_1 и входной объемный расход вещества G_1 , жидкость подается в емкость $GC1$ заданной высоты h_{\max} , которая характеризует полный объем емкости. По связи S_2 , характеризующейся выходным давлением P_2 и выходным объемным расходом G_2 , емкость под заданным давлением подается потребителю. Связь S_3 , являясь однородной векторной связью, характеризует текущий уровень жидкости в емкости h . Математическая модель емкости, описывающая процесс изменения уровня при поступлении и использовании жидкости, представлена системой уравнений

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\pi d_1^2} G_1 - \frac{1}{\pi d_2^2} G_2,$$

$$P_1 = 0, P_2 = P_{out},$$

где d_1 – диаметр входной трубы; d_2 – диаметр выходной трубы; P_{out} – давление, под которым жидкость подается из емкости.

В емкости могут наступить два события – достижение текущим уровнем h максимального уровня h_{\max} , что означает полное наполнение емкости, и достижение им минимального уровня h_{\min} , обозначающее полное опустошение емкости.

Для оповещения о наступлении этих внутренних событий компонента других компонентов, входящих в рассматриваемую модель поддержания уровня жидкости в баке, на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели АК «Емкость» имеет свое отображение в виде компонента, представленного на рис. 5, с двумя информационными связями S_{I1} и S_{I2} .

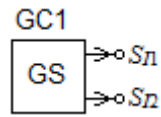


Рис. 5. Отображение активного компонента «Емкость» на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели.

С помощью связи S_{I1} осуществляется информирование других компонентов логического уровня о максимальном уровне жидкости h_{\max} в емкости, а сообщениями, посылаемыми по связи S_{I2} , о минимальном ее уровне h_{\min} .

Визуализация уровня жидкости в емкости производится на визуальном уровне. Для этого активный компонент «Емкость» имеет отображение на этом уровне в виде компонента, представленного на рис. 6.

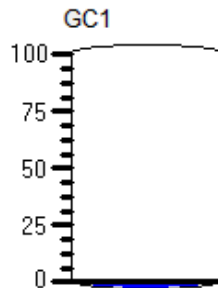


Рис. 6. Отображение активного компонента «Емкость» на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели.

В зависимости от текущего уровня заполнения емкости h осуществляется закрашка определенной доли данного компонента цветом, выбранным пользователем в его свойствах.

Для управления входным и выходным потоками жидкости, поступающими и выходящими из АК «Емкость», используется АК «Клапан». На объектном уровне многоуровневой компьютерной модели он отображается в виде компонента, представленного на рис 7.

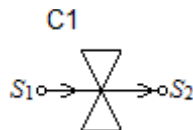


Рис. 7. Отображение активного компонента «Клапан» на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели.

По связи S_1 , которая характеризуется входным давлением P_1 и входным объемным расходом G_1 , жидкость поступает в клапан и выходит по связи S_2 , переменными которой являются выходное давление P_2 и выходной объемный расход G_2 . Математическая модель компонента «Клапан», составленная относительно перечисленных переменных его связей, в зависимости от его состояния имеет вид: при открытом клапане $P_1 - P_2 = 0$, при закрытом клапане $G_2 = 0$.

Переключение состояния клапана осуществляется по приему сообщения на

логическом уровне многоуровневой компьютерной модели, на которой АК «Клапан» имеет вид, представленный на рис. 8.

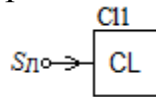


Рис. 8. Отображение активного компонента «Клапан» на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели.

На связь $S_{л1}$ поступает сообщение о состоянии, в которое должен перейти клапан. Если по этой связи передается значение, равное 0, то клапан должен перейти в закрытое состояние, если подано значение, не равное 0, то клапан переходит в открытое состояние.

Визуализация текущего состояния компонента «Клапан» производится на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели, на котором компонент «Клапан» имеет отображение, представленное на рис. 9.



Рис. 9. Отображение активного компонента «Клапан» на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели.

С помощью выбранных в параметрах компонента цветов осуществляется визуализация состояния клапана на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели. Помимо этого, при нажатии левой кнопкой мыши по изображению клапана во время работы модели пользователь имеет возможность изменить состояние на противоположное.

Сформированная на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели физическая модель системы поддержания уровня жидкости в емкости представлена на рис. 10.

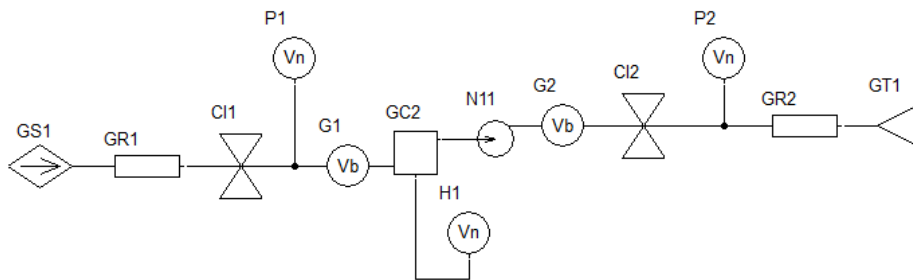


Рис. 10. Компонентная цепь системы поддержания уровня жидкости в емкости на объектном уровне многоуровневой компьютерной модели.

Помимо приведенных выше активных компонентов, в нее входят: источник потока жидкости под заданным давлением $GS1$; трубы $GR1$ и $GR2$, по которым жидкость поступает в емкость и выходит из нее; управляемый насос $N1$, осуществляющий подачу жидкости потребителю под указанным давлением; терминатор $GT1$, указывающий конец рассматриваемой части и характеризующий ее заданным значением давления. Кроме того, в нее включены следующие измерительные компоненты: $P1$ и $P2$ – манометры, измеряющие давление жидкости на входе в емкость и на выходе из нее; $G1$ и $G2$ – расходомеры, осуществляющие выборку из общего вектора решения текущих расходов вещества на входе и на выходе емкости соответственно; измеритель уровня жидкости в емкости $H1$. С помощью из-

мерительных компонентов осуществляется передача значений соответствующих переменных связей компонентов с объектного уровня на логический. На нем с помощью отображений активных компонентов и логических компонентов языка моделирования алгоритмических конструкций формируется алгоритм системы управления поддержания уровня жидкости в емкости. Он представлен на рис. 11.

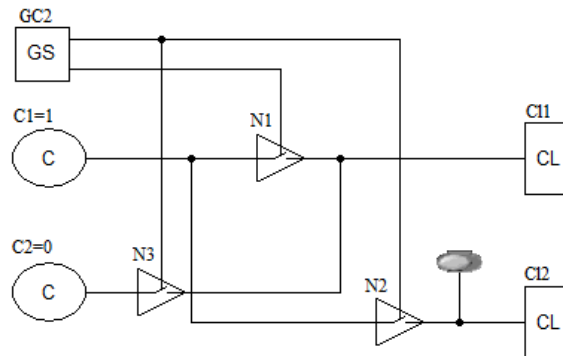


Рис. 11. Алгоритм работы системы управления уровнем жидкости в емкости на логическом уровне многоуровневой компьютерной модели.

Когда емкость заполняется до максимального значения, компонентом GC2 производится отправка сообщения с истинным значением по связи S_B . Попадая на управляющий вход накопителя N2, это значение передает значение, равное 1 и принятое от источника C1, открывает клапан, C12 для расхода жидкости. Одновременно с этим с помощью источника C2 через накопитель N3 передается значение, равное 0, клапану C11. В результате этих действий он закрывается и прекращается подача жидкости в емкости.

Если емкость опустошается до минимального значения, то от источника C1 через накопитель N1 клапану C11 передается значение, равное 1, что позволяет открыть подачу жидкости в емкость.

На визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели системы поддержания уровня жидкости в емкости, представленной на рис. 12, располагается визуальный образ емкости и клапанов, отображающих их текущее состояние. Также на нем располагается регулятор давления выхода, позволяющий изменять давление насоса N1, модель которого представлена на рис. 10.

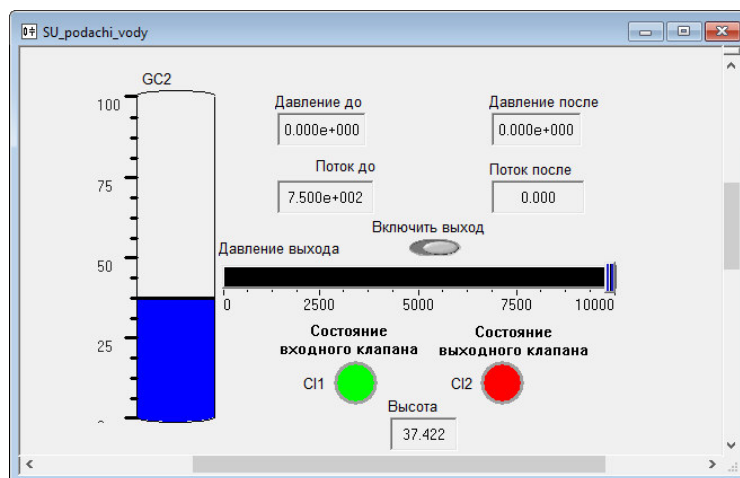


Рис. 12. Панель визуализации и интерактивного управления экспериментом на визуальном уровне многоуровневой компьютерной модели.

Представленная модель может работать как при открытых, так и при закрытых клапанах, а также при разных положениях клапанов. Она наглядно показывает возможности многоуровневого компьютерного моделирования для целей формирования и отладки алгоритмов функционирования устройств управления сложных технических управляемых систем, целью которых является поддержание некоторого заданного режима функционирования управляемого технического (технологического) объекта.

Заключение

В данной статье рассматривается методика моделирования и исследования сложных управляемых технических систем, в которые входят введенные и обоснованные в данной статье активные элементы. Каждый из них оснащен локальным устройством управления, реализуемым на базе измерительно-управляющего контроллера, который взаимодействует с устройством управления всей рассматриваемой СТУС на уровне обмена сообщениями, содержащими информацию о происходящем событии.

Многоуровневые компьютерные модели с активными компонентами позволяют автоматизировать процесс отладки алгоритмов управления как локальных систем управления отдельных объектов, так и глобального алгоритма управления УУ всей сложной технической (технологической) управляемой системы. Такие модели позволят реализовать аппарат прототипирования контроллеров элементов и устройств с возможностями синхронизации их функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриев В.М., Ганджа Т.В.* Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами // Информатика и системы управления. – 2013 – № 2 (36). – С. 24-35.
2. *Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Зайченко Т.Н., Ганджа Т.В.* МАРС – среда моделирования технических устройств и систем. – Томск: В-Спектр, 2011.
3. *Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Важенкин С.К.* Принципы построения моделей сложных технологических объектов с неоднородными векторными связями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 1. – С. 104-111.
4. *Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В.* Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24-28.
5. *Дмитриев В.М., Арайс Л.А., Шутенков А.В.* Автоматизация моделирования промышленных роботов / В.М. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1995.
6. *Григорьева Т.Е.* Дискретно-событийное моделирование в СМ МАРС для курса «Системы массового обслуживания» // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 1 (31). – С. 152-155.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Шелупановым.

E-mail:

Дмитриев Вячеслав Михайлович – dmitriewvm@gmail.com;

Ганджа Тарас Викторович – gandgatv@gmail.com.