

СИНТЕЗ АРИТМИЧЕСКОГО НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

В.А. Егоров

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

E-mail: innewworld@mail.ru

Работа посвящена вопросам построения аритмического регулятора непрерывно-дискретной системы управления линейным объектом второго порядка. В статье дан сравнительный анализ работы систем с фиксированным и переменным шагом временной дискретизации работы регулятора, выявлены преимущества аритмического регулятора.

Ключевые слова: *генетическое программирование, гибридный автомат, автоматическое управление, аритмический регулятор.*

Как известно, одной из ключевых особенностей, характеризующей процесс развития современных технических устройств, является повсеместное использование микропроцессорных систем. Это бытовые приборы, промышленные установки, космические аппараты и многое другое. Эволюция данных устройств характеризуется перманентно возрастающей сложностью задач, решаемых их системами управления. Предъявляются все более жесткие требования к надежности, эффективности, компактности, срокам разработки и модернизации систем управления.

Типовая структура подобных технических устройств представляет систему с одним или несколькими микропроцессорными элементами и некоторым количеством датчиков и исполнительных механизмов. При использовании в структуре нескольких микропроцессорных регуляторов неизбежно возникновение проблем при синхронизации их совместной работы и компенсации задержек при передаче управления, реализующего реакцию системы на внешнее воздействие. Когда микропроцессорный регулятор один, возникает проблема точной реализации управляющего воздействия. Это обусловлено необходимостью поддержания высокой частоты обновления управляющего сигнала на каждый из исполнительных механизмов, что при большом их числе приводит значительному снижению эффективности управления. Также обеим структурам присуща высокая нагрузка на шины передачи данных, негативно отражающаяся на работе системы.

Упростить архитектуру системы управления (а также, как следствие, и снизить ее стоимость), разгрузить каналы передачи данных и повысить эффективность работы можно, воспользовавшись принципами аритмического управления. Данный принцип построения системы управления подразумевает изменение сигнала на выходе регулятора не постоянно, а в наиболее важные моменты времени [1]. Однако теория построения аритмических регуляторов в настоящее время недостаточно развита. Разрешить данную проблему позволяет использование прямых методов синтеза. Наиболее гибкими и продуктивными среди них выступают методы, основанные на эволюционных алгоритмах.

Эволюционные алгоритмы являются методами поиска глобального экстремума. К их преимуществам относятся устойчивость от попадания в локальный экстремум,

отсутствие особых требований к поверхности целевой функции, возможность использования для решения широкого класса задач [2]. Эволюционные алгоритмы используют в своей работе механизмы, схожие с механизмами естественного отбора в живой природе. Так же, как и в природе, эволюционные алгоритмы оперируют множеством уникальных особей. Одним из вариантов эволюционного поиска является генетическое программирование (ГП). Каждая особь в ГП – это некоторая функция, представленная в виде графа. Алгоритм поиска решения аналогичен алгоритму естественного отбора в природе и включает ряд этапов.

1. Создание начальной популяции – множества особей с уникальным набором признаков (генерирование множества функций).

2. Выбор из общего множества некоторого числа функций, в наибольшей степени соответствующих требованиям задачи.

3. Кроссовер, или скрещивание особей. Комбинирование пар выбранных функций между собой. Результатом каждого такого комбинирования является некоторая новая функция, содержащая признаки обеих родительских функций.

4. Применение оператора мутации. Производится произвольное изменение некоторых выбранных функций.

5. Оценка полученных в результате произведенных операций решений. Если даже наилучшее из решений нас не устраивает, то переходим к шагу 2 (эволюция продолжается).

Пространством поиска генетического программирования является множество всех возможных рекурсивных композиций функций $S=F \cup T$. Функциональное множество $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ – множество возможных внутренних узлов в деревьях, представляющих программы в генетическом программировании. Каждая из этих функций характеризуется таким параметром, как арность – количество ее аргументов. $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ – это множество листовых узлов в деревьях, его называют терминальным множеством. Элементы из терминального множества также могут быть рассмотрены как элементы функционального множества с нулевой арностью.

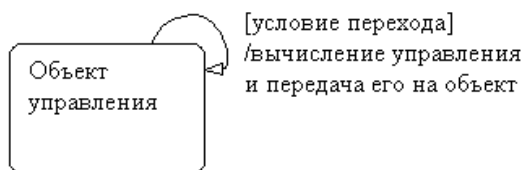
Анализ поведения регулятора, работающего в рамках компьютерной системы управления, позволяет выделить две циклически сменяющиеся фазы его работы. Пока ни в самой системе, ни в ее «окружении» ничего не происходит, реакции системы управления отсутствуют. Это – фаза ожидания. Появление стимула, воздействия внешнего (сгенерированного средой) и/или внутреннего (сгенерированного самой системой – ее управляемой или управляющей частью) вызывает ответную реакцию. Под реакцией следует понимать либо изменение, либо, по крайней мере, попытку изменения каких-либо характеристик управляемого процесса. Это – фаза реагирования. Наиболее существенными элементами, задающими поведение конкретного регулятора, являются правила его перехода от фазы ожидания к фазе реагирования и то, каким образом определяется реакция этого регулятора на тот или иной стимул. Именно эти элементы и положены в основу императивного метода описания. Процедура описания регуляторов вне зависимости от их формы сводится к заданию одного или нескольких наборов вида «условие – действие», т. е. продукций. «Условие» – логическое высказывание. Оно определяет правило перехода регулятора от фазы ожидания к фазе реагирования. «Действие» – правило вычисления реакции системы управления на стимул. Процедура синтеза регулятора может быть описана единообразно. Вне зависимости от конкретной задачи определению подлежит наполнение системы продукции (пар типа «условие – действие»).

Удобным способом представления компьютерной системы управления с заданным императивно регулятором является гибридный автомат [3]. Гибридный автомат

полностью отражает специфику компьютерной системы управления как объекта моделирования, позволяя учесть при необходимости:

- гетерогенность, или наличие в компьютерной системе управления дискретных (регулятор) и непрерывных (объект управления) элементов;
- гомеостаз при наличии внешней по отношению к системе управления среды;
- цикличность функционирования регулятора;
- присущую задачам управления событийность;
- необходимость синхронизации процесса функционирования регулятора с физическими процессами в объекте управления;
- параллелизм физических процессов в объекте управления и вычислений в регуляторе.

Универсальная гибридно-автоматная модель САУ представляет собой простейший направленный граф (рис. 1). Вершина графа (состояние гибридного автомата) – это модель объекта управления, непрерывного физического процесса. Переходом моделируется работа контроллера [4]. Согласно логике работы системы управления возможная смена сигнала управления происходит при выполнении некоторого условия. Действие перехода – вычисление значения управляющего сигнала и передача его на объект управления.



Р и с . 1 . Представление в виде гибридного автомата системы автоматического управления с императивной моделью регулятора

Такая модель весьма универсальна. Так, условие перехода может включать время (что справедливо для систем с дискретным временем), состояние (в случае систем с дискретными событиями, релейных и проч.) или их комбинацию. Вычисление управляющего воздействия может осуществляться по различным алгоритмам, характерным для того или иного закона управления. Кроме того, передача управляющего воздействия может происходить с временными задержками, потерей части информации и наложением шумовой составляющей, что имеет место в распределенных системах. Такая гибридно-автоматная модель позволяет осуществить прямой синтез САУ с использованием эволюционных подходов, в частности генетического программирования.

Удобным средством для моделирования работы сложных систем является математический пакет MATLAB, предоставляющий кроме удобного интерфейса и мощного математического аппарата значительное число специализированных дополнений, значительно расширяющих его возможность. В перечень дополнений включена программная среда Simulink+Stateflow, позволяющая быстро создавать наглядные модели систем (в том числе и моделей САУ с императивно заданным дискретным регулятором и непрерывным объектом управления), а также обладающая высокой точностью и гибкостью настройки алгоритмов симуляции работы моделей. Кроме того, для математического пакета MATLAB распространяется в свободном доступе GPLAB toolbox, реализующий алгоритмы функционирования генетического про-

граммирования и полностью совместимый с моделями, созданными посредством Simulink+Stateflow.

В качестве объекта управления для цифровой системы управления рассмотрим линейный объект второго порядка:

$$W(s) = \frac{1000}{s(s+1)}. \quad (1)$$

Подобной передаточной функцией описывается поведение многих реальных исполнительных механизмов, в частности устройств, в основе которых лежит электродвигатель [5]. Модель САУ для данного объекта, построенная в Simulink, представлена на рис. 2.

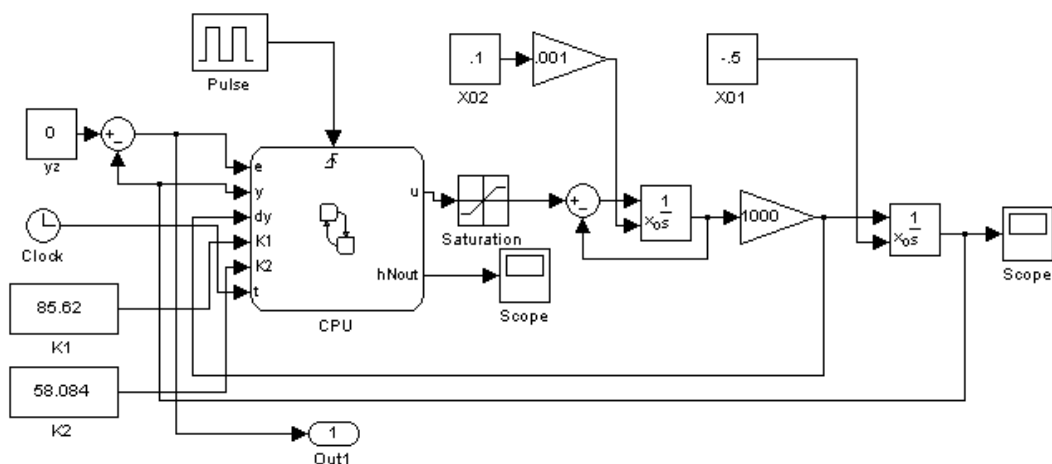


Рис. 2. Simulink – модель САУ

На рис. 3 изображена Stateflow – модель непрерывно-дискретного регулятора, реализующего аритмический ПД закон управления. Такой регулятор имеет два контура управления. Первый контур необходим для остановки работы регулятора при достижении объектом требуемой области. Второй же контур необходим для изменения сигнала управления. Каждый следующий момент срабатывания данного контура определяется после вычисления сигнала управления. Таким образом, при срабатывании второго контура управления определяется одновременно величина сигнала управления и продолжительность удерживания данной величины на выходе регулятора.

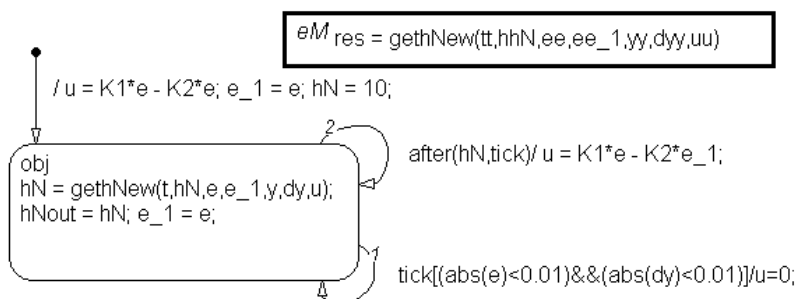


Рис. 3. Stateflow – модель непрерывно-дискретного регулятора

Качество работы оценивалось по критериям ИКО и ИВКО для заранее заданного множества начальных условий. Параметры системы:

$$y_k = 0; u(k) = [-1, 1]; \Delta_{\min} = 0.001 \text{ с},$$

где y_k – требуемое значение y , Δ_{\min} – минимальный шаг квантования, наименьший интервал, с которым микропроцессор может исполнять код регулятора.

В результате произведенного синтеза законов изменения моментов срабатывания регулятора (Δ) с помощью генетического программирования был получен ряд решений, отличающихся выбором критерия качества. Для ИКО функция имеет вид

$$\Delta = \ln((t * \text{if}(e(k), C2 * \ln(y(k)), y(k)))/(C1 * e(k-1))), \quad (3)$$

где $\ln(\cdot)$ – натуральный логарифм; $\text{if}(a, b, c)$ – функция, реализующая работу условного оператора ЕСЛИ ($a > 0$) ТО b , ИНАЧЕ c ; t – время; y – выход объекта; $e(k)$, $e(k-1)$ – текущее значение ошибки и значение ошибки при последнем изменении сигнала управления; $C1$ и $C2$ – константы, равные соответственно 0.1543 и -21.1313.

Для критерия ИВКО с помощью генетического программирования было получено два следующих закона регулирования момента срабатывания регулятора:

$$\Delta = 2 * e(k-1) + (dy(k)/nH), \quad (4)$$

$$\Delta = C * e(k), \quad (5)$$

где dy – величина скорости приращения сигнала на выходе объекта; nH – равен величине Δ , рассчитанной при последнем срабатывании регулятора; C – константа, равная 32.63.

В функции действия перехода для моделей регуляторов использовался дискретный ПД закон регулирования:

$$u(k) = u(k-1) + K1 * e(k) + K2 * e(k-1), \quad (6)$$

где $K1$, $K2$ – коэффициенты ПД регулятора; $u(i)$, $e(i)$ – соответственно управление и ошибка в i -тый момент времени.

Коэффициенты для него подбирались при помощи GADS toolbox, реализующего технику численной оптимизации последовательно двумя методами: методом генетических алгоритмов, реализующих быструю аллокацию глобального экстремума, и методом шаблонного поиска (pattern search), достоинством которого является высокая точность определения глобального экстремума.

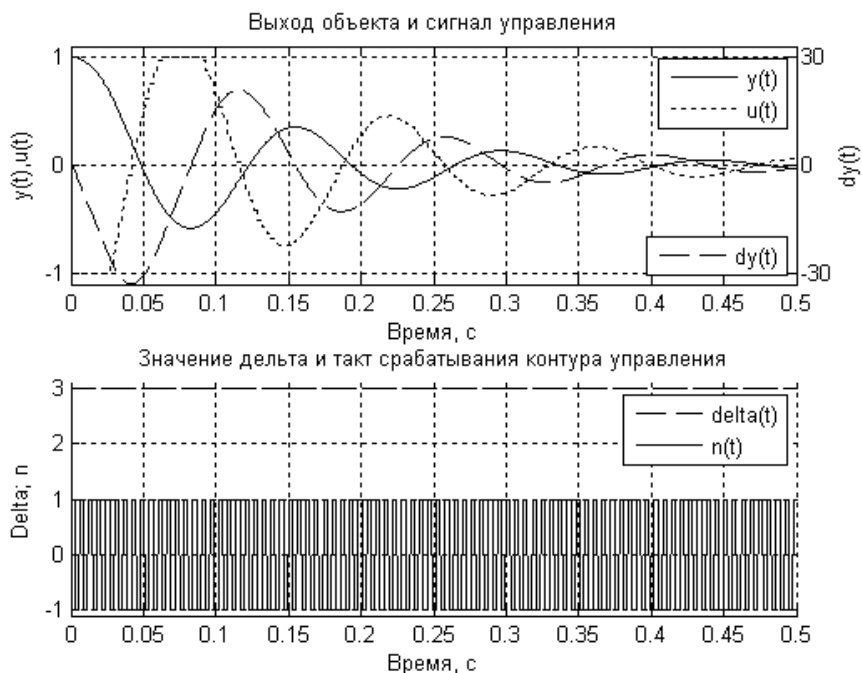
В целях валидации полученных результатов был произведен сравнительный анализ работы аритмических регуляторов и классических дискретных регуляторов. Шаг квантования ритмических регуляторов для корректности анализа был приведен к усредненному шагу работы аритмического. Результаты сравнения приведены в таблице.

Из приведенной таблицы видно, что при соизмеримом потреблении процессорного времени цифрового регулятора аритмическое управление позволило получить результаты, превосходящие эффективность работы регуляторов ритмических. Для регуляторов, критерий качества работы которых рассчитывался по ИВКО, эффективность различается на порядок в пользу аритмического.

Пример результатов работы ритмического регулятора, работающего с шагом дискретизации $\Delta = 0.003 \text{ с}$, и аритмического регулятора с законом срабатывания $\Delta = \ln((t * \text{if}(e(k), C2 * \ln(y(k)), y(k)))/(C1 * e(k-1)))$ при начальных условиях $y=1; dy=1$, представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Момент смены знака величины $n(t)$ на графиках соответствует моменту коррекции сигнала управления.

Сравнение качества работы регуляторов

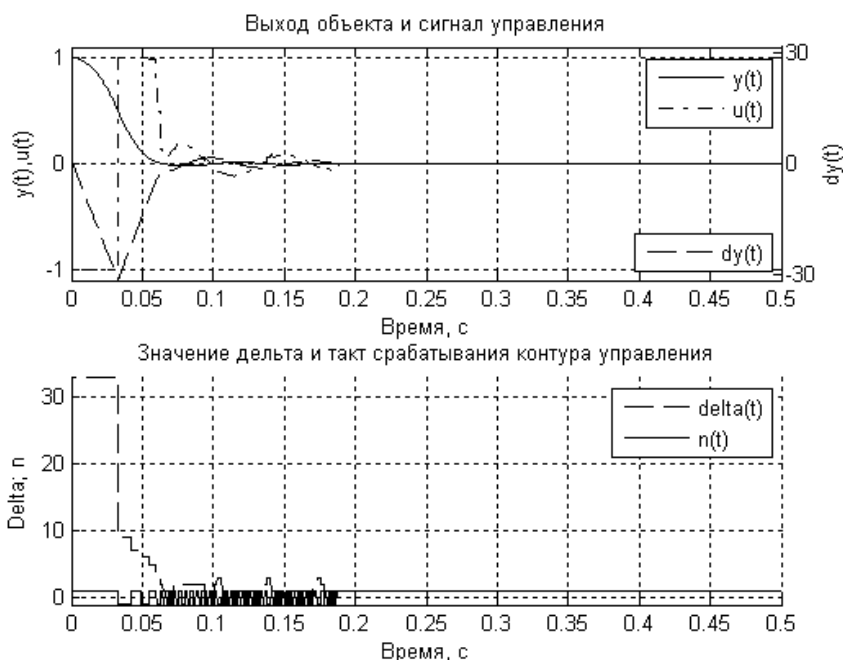
Функция управления шагом квантования	Коэффициенты регулятора		Критерий качества	Значение критерия качества	Средняя продолжительность шага квантования
	K1	K2			
$\Delta = \text{const}$	6.9519	5.0413	ИКО	0.4436	0.003
$\Delta = \ln((t * \text{if}(e, C2 * \ln(y), y)) / (C1 * e_{-1}))$	26.3717	18.71	ИКО	0.2381	0.003
$\Delta = \text{const}$	5.4777	4.7530	ИВКО	0.0391	0.004
$\Delta = 2 * e_{-1} + (dy/nH)$	85.6307	66.088	ИВКО	0.003534	0.004
$\Delta = C * e$	85.62	58.084	ИВКО	0.0038	0.004



Р и с . 4 . Пример работы ритмического регулятора

Как видно из приведенных графиков, режим работы аритмического регулятора отличается от работы ритмического ПД регулятора. Для аритмического регулятора характерным является увеличение частоты корректировки сигнала управления в моменты времени, когда требуется добиться точной стабилизации выхода объекта. В случае, если величина ошибки значительна, интервал времени между моментами коррекции управления увеличивается.

Таким образом, использование аритмических принципов регулирования позволяет значительно разгрузить цифровую систему управления без снижения эффективности работы системы. При этом производимые изменения минимальны и не требуют внедрения в САУ дополнительных измерительных устройств.



Р и с . 5 . Пример работы аритмического регулятора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рогачев Г.Н.* Методы синтеза гибридных регуляторов аperiodического действия // Труды XI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара, ИПУ РАН. – 2009. – С. 96-103.
2. *Koza J.R.* Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs (Complex Adaptive Systems). – MA: MIT Press, 1994. – 768 с.
3. *Колесов Ю.Б.* Моделирование систем: Динамические и гибридные системы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.
4. *Рогачев Г.Н.* Гибридный автомат как модель цифровой системы управления // Вестник СамГТУ. – 2007. – С. 59-63.
5. *Gustafsson T.* On the design and implementation of a rotary crane controller // Eur. J. Contr. – 1996. – Т. 2. – С. 166-175.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2011 г.

SYNTHESIS OF ARRHYTHMIC DISCRETE-CONTINUOUS REGULATOR FOR LINEAR OBJECTS

V.A. Egorov

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

The paper is devoted to the questions of construction of arrhythmic regulators for continuous-discrete control system of linear second order object. The article refers to the comparative analysis of systems workflow with the fixed and variable time step, and reveals the advantages of arrhythmic controllers.

Keywords: *genetic programming, hybrid automata, automatic control, arrhythmic regulator.*

Vladimir A. Egorov – Aspirant.