

АППАРАТНЫЕ АЛГОРИТМЫ АНАЛОГОВЫХ АВТОМАТОВ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Дембицкий Н.Л.

*Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет),
Москва*

Ключевые слова: киберфизические сети, аналоговые автоматы, трехзначная параметрическая логика, секвенциальная аналоговая логика.

Аннотация. В статье предлагается рассматривать процесс управления технической системой (ТС) как множество непрерывно происходящих, взаимодействующих между собой физических процессов, определены принципы организации аналоговых автоматов киберфизических сетей. Представлена модель, порождающая параметрическую трехзначную логику аналогового автомата и секвенциальную логику управления агрегатами технической системы. Объединение агрегатов, аналоговых вычислителей и унифицированных логических устройств позволяет создавать распределенные аппаратные структуры, образующие сеть логически связанных между собой агрегатов, не требующую цифровой и программной обработки.

PARAMETRIC LOGIC OF ANALOG AUTOMATA OF CYBER-PHYSICAL NETWORKS

Dembitsky N.L.

National Research University Moscow Aviation Institute, Moscow

Keywords: cyber-physical networks, analog automats, three-valued parametric logic, sequential analog logic.

Abstract. The article proposes to consider the control process of a technical system (TS) as a set of continuously occurring, interacting physical processes, the principles of organizing analog automata based on cyber-physical networks are defined. A model is presented that generates a parametric three-valued logic of an analog automaton and a sequential logic for controlling the units of a technical system. Combining aggregates, analog computers and unified logical devices allows you to create distributed hardware structures that form a cyber-physical network of logically interconnected aggregates that does not require digital and software processing.

Введение

Современные технические системы (ТС) воспринимаются как совокупность физических процессов и управляющих ими вычислительных устройств. Полная цифровизация становится символом передовых научных и технических решений и создает ощущение безальтернативности данного направления. Анализируя живые организмы, приходим к выводу, что одной из причин эффективности их поведения является непрерывный обмен информацией, поступающей в виде изменения химического состава (гуморальный механизм управления) и электрических сигналов в центральную и периферическую нервную систему (нервный механизм управления) [1]. Используя примеры живой природы в качестве отправной точки построения модели управления техническими объектами, приходим к альтернативе парадигмы цифрового подхода, которая

определяется логикой взаимодействий через непрерывное изменение состояний систем управления при выполнении поставленных задач.

Постановка задачи

В данной работе рассматриваются методы управления технической системой (ТС) на базе непрерывной обработки происходящих, взаимодействующих между собой физических процессов. Каждый физический процесс можно представить в виде одного или нескольких энергетических потоков (ЭП) различной природы (механические, электрические, тепловые, и т.д.), передаваемых функционально связанными *агрегатами*. В ТС агрегат является техническим или технологическим устройством, потребляющим, перерабатывающим и вырабатывающим энергетические потоки.

В рассматриваемой модели *киберфизической сети* (КФС) предлагается оснастить все агрегаты ТС встроенными вычислителями, добившись при этом максимальной производительности системы. Такое взаимодействие агрегатов требует не только высокого быстродействия встроенных процессоров, но и их слаженной работы, синхронизации и согласования передаваемой информации и управляющих сигналов. Цифровая парадигма КФС связана с проблемами обеспечения высокого быстродействия [2-4] при жестких конструктивных ограничениях.

Целью разработки является создание интегрированных в агрегаты ТС аналоговых автоматов, обеспечивающих сочетание оперативности управления с минимальными массогабаритными и энергетическими характеристиками. Аналоговые вычислители вполне соответствуют этим требованиям, однако имеют проблемы с логическим и алгоритмическим управлением. В данной статье рассматривается подход к организации КФС с применением аналоговых автоматов, в котором на аппаратном уровне решена задача их логического ситуационного взаимодействия.

Принципы функционирования аналоговой киберфизической сети

Аналоговая КФС предполагает оснащение агрегатов ТС собственными унифицированными вычислителями (*агентами*), на которые возложены функции логического анализа состояния ТС и режимов работы агрегата с целью выработки команд управления. Агент преобразует сигналы с датчиков агрегата $\Psi_a(t)$ и сигналы состояния сети $\Psi_1(t), \dots, \Psi_k(t)$ в сигналы управления агрегатом $f_{ynp}(t)$ и во внешние сигналы $\Psi(t)$, несущие информацию о состоянии агрегата. Датчики агрегата информируют агента о параметрах энергетических потоков, вырабатываемых агрегатом. Далее объединение агрегата и агента будем называть физическим процессором (ФП).

Представим ТС в виде множества ФП, преобразующих циркулирующие внутри и поступающие извне системы энергетические потоки в соответствии с логикой достижения поставленных перед системой целей и задач. Управляемость такой системы определяется детерминированным поведением компонентов в ответ на возникающие внешние и внутренние события. Между компонентами КФС существуют динамические связи, которые задают их изменения. Введем обозначения мгновенных изменений компонентов КФС: $\delta\Pi(t)$ – изменение

множества ФП с включенными агрегатами, $\delta X(t)$ – изменение значений параметров агрегатов, $\delta \mathcal{X}(t)$ – изменение множества ЭП, циркулирующих в ТС.

Необходимое и достаточное условие для подключения агрегата ФП π к ТС можно записать следующим образом:

$$\pi \in \Pi(t) : \{ \forall \alpha \in R(\pi); x(\alpha) \in C_{\alpha}(\pi) \}, \quad (1)$$

где $x(\alpha)$ – координаты числового вектора \vec{x}_{α} параметров ЭП α , $C_{\alpha}(\pi)$ – область определения параметров входящих ЭП, $R(\pi)$ – множество входящих ЭП.

Трехзначная параметрическая логика аналогового автомата

Логические свойства анализа состояний сети приобретаются ФП за счет применения специализированных аналоговых вычислителей – континуальных процессоров [6].

Для ФП π обозначим: предикат, устанавливающий принадлежность параметров входящих ЭП $R(\pi)$ области определения параметров ФП $C(\pi)$:

$$p = \{ x[R(\pi)] \in C(\pi) \}, \quad (2)$$

предикат, устанавливающий принадлежность параметров исходящего ЭП $r(\pi)$ области допустимых значений $D(\pi)$:

$$p^+ = \{ x[r(\pi)] \in D(\pi) \}, \quad (3)$$

дополнительный предикат, устанавливающий принадлежность параметров активирующего ЭП, области допустимых значений $C_{акт}$:

$$p_{акт} = \{ x_{акт} \in C_{акт} \}. \quad (4)$$

Рассмотрим КФС, состоящую из трех ФП π_{α} , π_{β} , π_{γ} , для которых взаимодействие определяется взаимной передачей исходящих ЭП в соответствии со следующими логическими правилами:

$$p_{\alpha} = ((\bar{p}_{\alpha}^+ \wedge \bar{p}_{\gamma}^+) \vee p_{\alpha}^+) \wedge \bar{p}_{\beta}^+, \quad (5)$$

$$p_{\beta} = ((\bar{p}_{\beta}^+ \wedge \bar{p}_{\gamma}^+) \vee p_{\beta}^+) \wedge p_{\beta_{акт}}, \quad (6)$$

$$p_{\gamma} = (\bar{p}_{\alpha}^+ \wedge \bar{p}_{\beta}^+ \wedge p_{\gamma_{акт}}), \quad (7)$$

где p_{α} , p_{β} , p_{γ} – предикаты (2), p_{α}^+ , p_{β}^+ , p_{γ}^+ – предикаты исходящих ЭП (3), \bar{p}_{α}^+ , \bar{p}_{β}^+ , \bar{p}_{γ}^+ – отрицания предикатов (3).

В результате получен *автомат трехзначной логики* (АТЛ), который выполняет последовательное взаимоисключающее подключение агрегатов трех ФП π_{α} , π_{β} , π_{γ} . Из записанных условий подключения следует, что основным управляющим элементом является ФП π_{β} . До его включения в сети работает агрегат ФП π_{α} . После подачи на вход ЭП активации $\beta_{акт}$ выполняются условие (6) подключения агрегата ФП π_{β} , а агрегаты остальных ФП отключены. После нарушения условия (6) к КФС подключается агрегат ФП π_{γ} , а агрегаты ФП π_{α} , π_{β} отключаются от сети согласно условиям (5, 6). Последнее состояние АТЛ является устойчивым и не может быть изменено активацией ФП π_{α} и π_{β} . Таким образом соблюдается строгая последовательность событий, которые порождают *трехзначную логику переключения* АТЛ.

Секвенциальная логика алгоритмов управления КФС

Рассмотрим КФС, состоящую из объединения двух АТЛ A_1 и A_2 . АТЛ A_1 состоит из ФП $\pi_{\alpha 1}, \pi_{\beta 1}, \pi_{\gamma 1}$, второй A_2 из ФП $\pi_{\alpha 2}, \pi_{\beta 2}, \pi_{\gamma 2}$. Направим исходящий ЭП $r_{\gamma 1}$ на вход ФП $\pi_{\beta 2}$, а исходящий ЭП $r_{\alpha 1}$ на вход активации ФП $\pi_{\gamma 2}$. Тогда взаимодействие АТЛ согласно (5-7) будет связано с выполнением следующих логических условий:

$$P_{\alpha 1} = ((\bar{p}_{\alpha 1} \wedge \bar{p}_{\gamma 1}) \vee p_{\alpha 1}) \wedge \bar{p}_{\beta 1}, \quad (8)$$

$$p_{\beta 1} = ((\bar{p}_{\beta 1} \wedge \bar{p}_{\gamma 1}) \vee p_{\beta 1}) \wedge p_{\beta 1 \text{ акт}}, \quad (9)$$

$$p_{\gamma 1} = (\bar{p}_{\alpha 1} \wedge \bar{p}_{\beta 1} \wedge p_{\gamma 1 \text{ акт}}), \quad (10)$$

$$P_{\alpha 2} = ((\bar{p}_{\alpha 2} \wedge \bar{p}_{\gamma 2}) \vee p_{\alpha 2}) \wedge \bar{p}_{\beta 2}, \quad (11)$$

$$p_{\beta 2} = ((\bar{p}_{\beta 2} \wedge \bar{p}_{\gamma 2}) \vee p_{\beta 2}) \wedge p_{\gamma 1} \wedge p_{\beta 2 \text{ акт}}, \quad (12)$$

$$p_{\gamma 2} = (\bar{p}_{\alpha 2} \wedge \bar{p}_{\beta 2} \wedge \bar{p}_{\alpha 1}). \quad (13)$$

В результате такого соединения двух АТЛ получим КФС, в которой происходит последовательное включение агрегатов ФП $\pi_{\beta 1}$ и ФП $\pi_{\beta 2}$. Назовем такую КФС двухзвенной *цепочкой переключения агрегатов* (ЦПА).

Обозначим состояния ФП с подключенными агрегатом символом- s , а состояния ФП с отключенным агрегатом символом \bar{s} . Если использовать символ отношения опережения \prec , то алгоритм *асинхронного переключения состояний ФП* можно записать в виде выражения

$$\begin{aligned} s_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \bar{s}_{\alpha 1}, s_{\beta 1}, \bar{s}_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, s_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \\ \prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, s_{\beta 2}, \bar{s}_{\gamma 2} \prec \bar{s}_{\alpha 1}, \bar{s}_{\beta 1}, s_{\gamma 1}, \bar{s}_{\alpha 2}, \bar{s}_{\beta 2}, s_{\gamma 2} \end{aligned} \quad (14)$$

Все переходы в цепочке (14) связаны согласно (8-13) с изменением состояния ФП $\pi_{\beta 1}$ и $\pi_{\beta 2}$, поэтому можно сократить запись последовательности в виде цепочки переключения этих ФП:

$$\bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec s_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, s_{\beta 2} \prec \bar{s}_{\beta 1}, \bar{s}_{\beta 2}. \quad (15)$$

Последовательное подключение АТЛ к ЦПА позволяет создавать сколь угодно длинные цепочки, в которых реализуется алгоритм переключения ФП.

Рассмотрим ЦПА из n АТЛ. АТЛ A_1 состоит из ФП $\pi_{\alpha 1}, \pi_{\beta 1}, \pi_{\gamma 1}$, АТЛ A_i из ФП $\pi_{\alpha i}, \pi_{\beta i}, \pi_{\gamma i}$, АТЛ A_n из ФП $\pi_{\alpha n}, \pi_{\beta n}, \pi_{\gamma n}$. Направим ЭП α_n на вход ФП $\pi_{\alpha 1}$. Построенная замкнутая ЦПА выполняет последовательный циклический алгоритм переключения агрегатов с *асинхронным управлением*. Управление процессом переключения осуществляется путем контроля попадания параметров ЭП β_i в области допустимых значений.

Применение аналоговых автоматов

Примером применения аналоговых автоматов является устройство хранения уровней напряжений. В ячейке аналоговой памяти используются два генератора пилообразного напряжения, которые являются агрегатами сети. Сеть управляет суммированием сигналов генераторов, формируя на выходе заданное напряжение. Ячейки аналоговой памяти способны записывать значения сигнала с задержкой менее 1 мкс. Такое быстроедействие позволяет получить ряд принципиально новых технических решений. Высокая скорость записи и долговременное хранение записанного уровня напряжения позволяет применять

аналоговые ячейки в обучаемых и самообучаемых устройствах для оперативного формирования функциональных зависимостей по результатам проведенных эпох обучения [7, 8].

Заключение

Разработан математический аппарат ситуационного управления взаимодействующими агрегатами в технических системах, основанный на непрерывном контроле изменений параметров процессов. Метод управления аналоговыми процессорами позволяет менять конфигурацию подключения агрегатов, выстраивать последовательные и замкнутые цепочки их взаимодействия.

Объединение агрегатов, аналоговых вычислителей и унифицированных логических устройств создает распределенные аппаратные структуры физических процессоров, образующих киберфизическую сеть логически связанных между собой агрегатов технической системы. Оперативность работы сети обеспечивается интегрированными с агрегатами аппаратными средствами, выполняющими параллельные вычисления без цифровой и программной обработки.

Список литературы

1. Gerard J. Tortora, Bryan H. Derrickson Principles of Anatomy and Physiology. – Wiley, 2008. – 1281 p.
2. Arseniev D.G., Overmeyer L., Kalviainen H., Katalinic B. Cyber-Physical Systems and Control // Series: Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2020. – 780 p.
3. Goebel R., Sanfelice R.G., Teel A.R. Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability, and Robustness. – Princeton, University Press, Princeton and Oxford, New Jersey, 2012. – 212 p.
4. Lee E.A., Zheng H. Operational semantics for hybrid systems // Hybrid Systems: Computation and Control: 8th International Workshop, 2005, pp. 25-53.
5. Патент №2739723 РФ. Континуальный процессор / Дембицкий Н.Л.– №2020131605 от. 25.09.2020; опубл. 28.12.2020, Бюл. №1.
6. Дембицкий Н.Л. Выделение периодического сигнала из шумов нейрофильтром на континуальных процессорах REDS // Телекоммуникационные устройства и системы. – 2021. – №2. – С. 16-22.
7. Патент №2724784 РФ. Способ управления реакцией нейропроцессора на входные сигналы / Дембицкий Н.Л. – №2018107531 от. 18.05.2018; опубл. 25.06.2020, Бюл. 18.

Сведения об авторе:

Дембицкий Николай Леонидович – к.т.н., доцент.