

УДК 681.5.01

М. С. Куприянов, А. В. Кочетков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Принципы построения технических самоорганизующихся систем

Рассматриваются вопросы организации технических самоорганизующихся систем на основе современной синергетической концепции. Принципы построения природных самоорганизующихся систем переносятся на технические. Приводится детальное описание трех возможных уровней самоорганизации в технических системах: параметрической, функциональной и структурной.

Самоорганизующаяся система, параметрическая самоорганизация, функциональная самоорганизация, структурная самоорганизация, синергетика

Синергетические принципы все более интенсивно внедряются в сферу информационных технологий. Технические системы становятся глобальными и распределенными, а сложность решаемых ими задач возрастает. Несмотря на существенные успехи в индустрии элементной базы технических систем, включающие новые технологии, среды передач данных, увеличение производительности, скорости, частот и т. д., вопросы управления в таких системах до сих пор остаются открытыми. Кибернетика частично решает данную проблему, разрабатывая методы и средства для автоматизации управления в технических системах, построенные на принципах обратной связи. Однако при этом вопросы структурной и функциональной организации систем такого рода остаются нерешенными.

Одним из современных направлений построения распределенных систем является синергетическое, основанное на заимствовании идей организации и функционирования у природы. Самоорганизация является характерной особенностью строения и функционирования всех природных систем, вершиной которых является человек. Именно самоорганизация помогает живым организмам выживать в сложных условиях, постоянно совершенствуя свое поведение на основании накапливаемого опыта. Общие черты самоорганизации кроме того прослеживаются и в неживой природе. При этом не вызывает сомнений, что человеческий организм является кроме того и самой совершенной системой. Анализируя основные положения синергетического подхода в

области самоорганизующихся систем, перенесем их на технические и попробуем разработать основные принципы их конструирования.

Под технической системой будем понимать распределенную искусственную систему, состоящую из множества элементов, связанных между собой каналами передачи данных и предназначенную для решения конкретных задач. При этом уровень распределенности системы зависит только от ее предназначения. В качестве примеров такого рода систем можно привести системы сотовой связи, системы управления банковскими финансовыми потоками, системы игорного бизнеса, системы управления военными объектами и многие др.

Жесткое управление по заложенной изначально программе, широко развитое в XX веке в рамках кибернетического подхода, показывает свою несостоятельность применительно к современным распределенным системам. Действительно, малейший сбой или выход из строя какого-либо элемента системы зачастую ведет к полному и мгновенному прекращению ее функционирования. В природных же системах такого эффекта не наблюдается: они адаптируются и подстраиваются под изменившиеся условия своего существования. Их поведение становится более совершенным, приобретая новые черты и новые качества за счет протекания в них процессов самоорганизации.

Если в живых системах самоорганизация протекает за счет свойств живых систем, таких, например, как регенерация клеток или естествен-

ный отбор, то в технических системах таких механизмов очевидно нет. В техническую систему для этих целей должна быть заложена избыточность. При этом под избыточностью может подразумеваться резервирование элементов, возможность альтернативных путей передачи информации между элементами, возможность выполнения различных функций одним элементом, возможность перераспределения функций между элементами и др., в зависимости от предназначения конкретной системы. Очевидно, что, если какая-либо выполняемая функция системы обеспечивается единственным элементом и этот элемент выходит из строя, ни о какой самоорганизации говорить нельзя.

Согласно синергетической концепции процессы самоорганизации возможны только в открытых системах, находящихся далеко от состояния термодинамического равновесия. Такие системы интенсивно обмениваются энергией, веществом и информацией с окружающей средой. Именно поэтому замкнутые системы, рассматриваемые классической физикой, не могут совершенствовать свое поведение, не способны к самоорганизации. Тем самым, первое требование к техническим самоорганизующимся системам – их открытость. Они должны принимать и передавать любую допустимую информацию во внешний мир. Именно на основании накопления и анализа этой информации система способна автономно принимать решения о возможных путях дальнейшего совершенствования, развития и функционирования.

Природным системам также свойственна нелинейность. Классические линейные модели природных явлений, констатируемых физикой, оказываются не способными описать процессы, происходящие в открытых системах, осуществляющих интенсивный обмен с внешней средой. Адекватными моделями для таких систем являются сложные дифференциальные нелинейные уравнения в частных производных.

Очевидна также и иерархичность природных самоорганизующихся систем – клетка входит в состав органа, орган – в состав организма и т. д. [1]. Построение технических самоорганизующихся систем должно следовать тому же принципу: каждый элемент такой системы должен подчиняться какому-либо другому, управляться этим элементом, передавать ему результаты своей работы. В любой момент времени у каждого элемента должен быть строго определен состав тех элементов, которым он подчиняется.

В технической системе для надежной связи между элементами необходимы надежные каналы передачи данных. Протоколы передачи должны обеспечивать надежную и гарантированную доставку всех сообщений адресатам, в том числе в условиях неопределенности обстановки. В такой системе не должно быть сообщений-сирот и недоставленных сообщений, которые могут возникнуть в результате каких-либо сбоев и отказов оборудования и программного обеспечения. Для этого система периодически должна обеспечивать вычисление и запоминание своего консистентного глобального состояния, при котором все отправленные сообщения доставлены и приняты адресатами.

Другим характерным свойством природных самоорганизующихся систем, как теперь установлено, является наличие в их поведении так называемых точек бифуркации. Под точкой бифуркации в синергетике понимают состояние максимального хаоса или беспорядка в системе, соответствующего дальнейшему скачкообразному изменению ее функционирования. Примером может служить лазерный луч, когда при достижении некоторого порогового значения до сих пор разрозненное и несогласованное излучение множества частиц резко становится согласованным или когерентным, излучение резко меняет свои характеристики и свойства. Теплая вода при отрицательной температуре охлаждается, а потом резко становится льдом. Можно сделать заключение о скачкообразном развитии природных самоорганизующихся систем, когда за относительно длительным периодом эволюционного развития быстро и резко следует «катастрофа», коренным образом меняющая функционирование системы, далее снова система медленно эволюционирует и т. д.

Развитие системы при наличии точек бифуркации делает не только возможными, но и полезными различного рода флуктуации в системе, под которыми понимают отклонения параметров объектов от их средних значений. Именно благодаря таким случайным изменениям система и адаптируется к внешним и внутренним изменениям, эволюционирует. Когда флуктуации достигают максимальной амплитуды и система становится не способной их компенсировать при текущей организации, и наступает точка бифуркации, после которой поведение системы качественно отличается от того, что было раньше.

Особенностью бифуркационных процессов является их когерентное действие. В точке бифуркации все составляющие систему элементы

начинают вести себя согласованно, упорядоченно, подчиняясь одной общей цели системы. Примером может служить лазерное излучение, где все частицы после прохождения точки бифуркации излучают согласованно. Применительно к техническим системам данная особенность должна найти отражение в общем характере действий описываемых далее механизмов самоорганизации. Это означает, что самоорганизация должна затрагивать сразу всю систему целиком, все ее элементы и связи. Только в этом случае может быть достигнут максимальный эффект.

Посмотрим, каким образом возможно организовать техническую систему, чтобы максимально приблизить ее функционирование к описанному ранее бифуркационному. Для этого введем формальные обозначения. Пусть S – некоторая система, состоящая из множества элементов и решающая определенный набор задач. Условимся также считать, что функционирование системы носит целенаправленный характер и может быть выражено некоторым целевым функционалом J , имеющим численную оценку. Тогда качество функционирования системы или, что то же самое, степень выполнения системой поставленной задачи можно определить вычисляя значения функционала J в требуемые моменты времени. Когда это значение становится меньше некоторого порога ($J < J_{\min}$), система и должна начать процессы самоорганизации, чтобы восстановить приемлемое значение целевого функционала.

Иерархичное строение самоорганизующейся технической системы отражается введением двух принципиально различных типов элементов. Будем считать элементарным объектом (ЭО) технической системы элемент, выполняющий основную полезную работу в системе и имеющий непосредственное отношение к предназначению данной системы. В системе сотовой связи элементарным объектом, например, является отдельный абонент. Таким объектам не могут подчиняться никакие другие. Все остальные объекты, выполняющие вспомогательные функции, отнесем к элементам-посредникам (ЭП). Посреднику подчиняются элементарные объекты, и его задача – управлять ими и обрабатывать получаемые результаты. При этом в ряде случаев на посредника могут возлагаться и некоторые полезные функции. В примере сети сотовой связи в качестве элемента-посредника могут выступить, например, ретрансляторы.

Каждый элементарный объект относится к определенному типу. Обозначим множество всех типов ЭО в системе S как T_s : $T_s = \{T_1, T_2 \dots T_n\}$, где n – число различных типов ЭО в системе S . Тип ЭО определяет набор функций, который может быть реализован данным ЭО. ЭО типа i может функционировать по одному из заранее предусмотренных алгоритмов, реализуя некоторую функцию. Алгоритм для каждой конкретной системы может быть задан по-разному и во многих случаях является достаточно сложным и даже «закрытым». Не представляют интереса ни детали функционирования объекта, ни воспроизведение точной модели его работы. Важна только выходная функция данного объекта, имеющая отношение к формированию целевого функционала всей системы. Например, при оптимизации пропускной способности сети сотовой связи совершенно неважно как устроен сотовый аппарат. ЭО типа i в каждый момент времени реализует некоторую выходную функцию $f_{k,i} \in F_i$, где F_i – набор функций, реализуемых ЭО типа i : $F_i = \{F_{1,i}, F_{2,i} \dots F_{m,i}\}$. Здесь m – число различных функций, которые может реализовать объект типа i .

В общем случае влияние ЭО на целевую функцию может выражаться не одной, а сразу несколькими независимыми функциями $\{f_{k,i}^1, f_{k,i}^2 \dots f_{k,i}^p\}$, где p – общее число функций ЭО, влияющих на формирование целевого функционала системы J . Каждая функция $f_{k,i}^j$ в свою очередь зависит от набора параметров, характеризующих ЭО типа i :

$$f_{k,i}^j = f(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{q,i}),$$

где q – число управляемых параметров ЭО типа i .

В качестве параметров могут выступать имеющие различную природу физические величины, однако их значения всегда находятся в пределах некоторого диапазона или имеют другие ограничения произвольного характера. Для простоты рассмотрим случаи, когда для каждого из параметров ограничения задаются в виде неравенств вида $a_i \leq x_i \leq b_i$; $a_i, b_i \in R$, где R – множество вещественных чисел.

Элемент-посредник собирает, обрабатывает, анализирует и передает другим элементам-посредникам результаты работы подчиненных

ему элементов. Результат его функционирования можно представить в виде некоторой функции свертки: $\mu = f(el_1, el_2, \dots, el_s)$, где el_i – результат работы элемента i , управляемого текущим ЭП; s – общее число элементов, подключенных к текущему ЭП; f – некоторый оператор (например, оператор сложения). С другой стороны, сам ЭП управляется элементом вышележащего по иерархии уровня и передает ему результаты своей работы.

Дополнительным параметром элемента-посредника всегда является максимальное число подключаемых к нему элементов. В дальнейшем это число будем называть числом свободных слотов у элемента-посредника.

Построенная по такому принципу система в общем случае представляет собой сеть, в вершинах которой находятся элементы системы, а дуги соответствуют связям между ними. Особым образом в такой сети может быть выделен один или несколько элементов (в случае больших масштабов системы), в которых оценивается качество функционирования системы и вычисляется значение целевого функционала J . Кроме того, именно в таких элементах и должны быть заложены механизмы, реализующие процессы самоорганизации в системе.

Итак, распределенная система функционирует, и для нее непрерывно или дискретно в определенные моменты времени вычисляется значение целевого функционала J , количественно характеризующего качество решения системой поставленных задач. Согласно эволюционному подходу потребуем от системы постоянного совершенствования своего функционирования, что выражается в стремлении разумной максимизации (или минимизации) значения J : $J \rightarrow \max$ (\min). Однако на практике такое желание не всегда экономически обосновано, а порой даже невозможно. К тому же, система, изначально использующая все свои ресурсы, не имеет шансов на дальнейшее развитие.

Развивая синергетический подход, обратим внимание на еще один аспект функционирования живых систем – явление гомеостаза, заключающееся в стремлении сохранить и поддержать, а не максимизировать (минимизировать) многие жизненно важные показатели живых организмов (температура тела, давление, частота пульса и т. д.). На основании этого потребуем от системы выполнения более мягкого условия $J \geq J_{\min}$, заключающегося в том, что система не должна

функционировать хуже, чем некоторый порог. Если неравенство выполнено, система продолжает функционировать, сохраняя результаты своей работы, и только в случае невыполнения неравенства запускает механизмы самоорганизации, призванные вывести систему на требуемый минимально допустимый уровень.

В отличие от систем живой и неживой природы, где флуктуации могут иметь совершенно непредсказуемые характер и физическую основу, изменения искусственной технической системы могут осуществляться на трех уровнях:

- изменения значений параметров элементов;
- изменения в реализуемых элементами функциях;
- изменения в структуре системы.

В связи с этим в технических системах возможна самоорганизация трех видов: параметрическая, функциональная и структурная. В зависимости от назначения и специфики конкретных распределенных систем в составе алгоритмов и методов самоорганизации могут быть различные сочетания всех указанных видов самоорганизации. Рассматривая самый общий случай, отметим, что изменение структуры связано с большими затратами и сильнее влияет на систему в целом, нежели изменение функций элементов, а изменение функций, в свою очередь, оказывает большее влияние на систему, чем подстройка параметров. В связи с этим при наступлении в системе события или группы событий, которые привели к нарушению выполнения неравенства $J \geq J_{\min}$, система первоначально должна запустить механизмы параметрической самоорганизации, пытаясь вновь добиться выполнения неравенства за счет изменения значений управляемых параметров элементов.

Задача параметрической самоорганизации в общем виде может быть поставлена и решена как многокритериальная оптимизационная задача с ограничениями и формулируется следующим образом: $J(\mathbf{x}) \rightarrow \min(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D \subset R_n$, где $D = \{\mathbf{x} \in R_n \mid g_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\delta}) \leq 0, i \in [1:m]; g_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\delta}) = 0, i \in [m+1:r]\}$ – множество допустимых решений; $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_r\}$ – вектор входных параметров, $\boldsymbol{\delta} = \{\delta_1, \dots, \delta_w\}$ – вектор внешних параметров, характеризующих неопределенность обстановки; r – количество ограничений в виде неравенств и равенств; w – количество внешних параметров.

В пределах множества D выполняются прямые, функциональные и критериальные ограничения, представленные в виде общей системы неравенств и равенств. *Прямые ограничения* накладываются непосредственно на компоненты вектора входных параметров. *Функциональные ограничения* – это условия работоспособности, имеющие принципиальное значение при оценке правильности функционирования объекта оптимизации. Выполнять функциональные ограничения с большим запасом обычно не требуется, важно просто обеспечить их выполнение. *Критериальные ограничения* отражают требования к характеристикам объекта оптимизации, их основное отличие от функциональных состоит в том, что для критериальных ограничений необходимо добиваться выполнения соответствующих им неравенств с максимальным запасом.

Для реализации процессов параметрической самоорганизации могут быть использованы различные методы параметрической оптимизации. Выбор того или иного метода производится на основании анализа вида оптимизируемой функции в каждой конкретной ситуации. В качестве примера можно привести метод циклического покоординатного спуска и метод экспоненциальной релаксации.

Метод циклического покоординатного спуска (ЦПС) является одним из простейших методов параметрической самоорганизации, хотя и имеет низкую эффективность в овражной ситуации. Его использование целесообразно при решении практически любого класса оптимизационных задач, по крайней мере как стартового алгоритма с целью получения разумного начального приближения для последующих процедур. При решении канонической задачи построения минимизирующей последовательности $\{x_k\}$ функционала $J(x)$ переход от вектора x_i к вектору x_{i+1} по методу ЦПС происходит следующим образом: для $l \in [1:n]$ компонента x_l^{i+1} определяется как $x_l^{i+1} \in \text{Arg min } J(x_1^{i+1}, x_2^{i+1}, \dots, x_{l-1}^{i+1}, x, x_{l+1}^{i+1}, \dots, x_n^{i+1})$.

В простейшем варианте метода ЦПС задается вектор начальных шагов $h = (h_1, \dots, h_n)$ продвижений из точки x в направлении координатных ортов e_1, e_2, \dots, e_n . Далее шаги h_i модифицируются от итерации к итерации. Если выполняется неравенство $J(x + h_i e_i) < J(x)$, то текущая точка x заменяется на $x + h_i e_i$, а значение h_i утраивается:

$h_i = 3h_i$. После этого осуществляется переход к следующему номеру i . Если $J(x + h_i e_i) > J(x)$, то производится умножение h_i на -0.5 и также осуществляется переход к следующему координатному орту. Таким образом, алгоритм адаптируется к конкретным условиям оптимизации за счет изменения значения и знаков шагов.

Метод экспоненциальной релаксации относится к градиентным стратегиям параметрической оптимизации, в которых применяются различные рекуррентные процедуры с непрерывным контролем точности, исключающим накопление вычислительных погрешностей до неприемлемого уровня. Схема метода требует вычисления производных от минимизируемого функционала, что сопряжено с дополнительными затратами производительности, но оказывается полезным в случаях плохо обусловленных задач с наличием так называемых овражных ситуаций [2].

В больших масштабных системах задача параметрической самоорганизации при большом числе оптимизируемых параметров может быть распределена между несколькими элементами-посредниками, которые оптимизируют подчиненную им часть общей сети.

Функциональная самоорганизация, заключающаяся в выборе реализуемых элементами функций, – наименее формализуемая задача, в наибольшей степени зависящая от конкретной системы. Так, в систему могут быть заложены некоторые наборы реализуемых функций для каждого типа элементов, а может быть задан набор обязательных для выполнения функций без указания типов элементов, на которых он должен быть исполнен. Задача решается перебором возможных вариантов исходя из приоритета и обязательности выполнения. Также здесь могут быть предложены специальные техники, позволяющие более интеллектуально выбирать функции из списка, исходя из накапливаемой предыстории.

В соответствии с синергетическим подходом параметрическая и функциональная самоорганизация могут быть отнесены к эволюционному периоду развития системы, так как, на взгляд авторов, в общем случае ведут к менее кардинальным изменениям в системе, чем структурная самоорганизация, которую в данном контексте будем рассматривать как точку бифуркации в случае ее успешного завершения.

Структурная самоорганизация представляется наиболее сложной, и изменения, вносимые ею в систему, должны быть тщательно обоснованы. Предлагается подход, основанный на постепенном увеличении стоимости изменения системы и количества вносимых изменений:

- самоорганизация типов элементов;
- реконфигурация системы;
- добавление/удаление элементов.

При самоорганизации типов система пытается изменить типы некоторых (или сразу всех) элементов, чтобы добиться максимального прироста целевого функционала. Технически это можно осуществить заменой или переписывкой программного обеспечения. Затронутые при этом элементы получают новый (или частично новый) набор функций, которые они способны выполнять. Количественный состав элементов системы при этом не изменяется.

Реконфигурация также не меняет количественный состав элементов системы, в ходе нее система должна попытаться переместить часть элементов на более выгодные позиции с точки зрения увеличения целевого функционала. Перемещение должно производиться с учетом всех возможных ограничений: физической возможности, числа свободных слотов, экономической целесообразности и т. д.

Добавление и удаление элементов в систему является вершиной процесса самоорганизации в технических системах и осуществляется после

неудач всех предыдущих методов. Анализ реальных технических систем показывает, что удаление элементов из системы почти никогда не дает увеличения целевого функционала, так как система в этом случае наоборот что-то «теряет», возможности ее уменьшаются. Будем считать поэтому, что только добавление новых элементов способно увеличить целевой функционал. При этом в зависимости от специфики конкретной системы должны быть решены следующие вопросы:

- определение числа добавляемых элементов;
- определение типов добавляемых элементов;
- определение позиций для добавления [3].

Если система, проведя все возможные виды самоорганизации, делает заключение, что добиться требуемого значения целевого функционала не представляется возможным в рамках имеющегося у нее ресурса, система считается не способной самоорганизоваться для решения текущей задачи, ее цель должна быть изменена.

Полученные теоретические результаты могут быть в дальнейшем использованы при разработке программного обеспечения системы управления сложными распределенными техническими объектами, функционирующими в том числе в условиях автономности и неопределенности окружающей обстановки.

Работа выполнена в СПбГЭТУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова В. Л., Раков М. А. Самоорганизация в технических системах. Киев: Наук. думка, 1987.
2. Управление требованиями в программных проектах / М. С. Куприянов, А. В. Кочетков, И. И. Холлод и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

3. Куприянов М. С., Кочетков А. В. Моделирование самоорганизующихся систем // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, СПб., 2008. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. Т.1. С. 118–121.

M. S. Kupriyanov, A. V. Kochetkov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

PRINCIPLES OF TECHNICAL SELF-ORGANIZING SYSTEMS CONSTRUCTION

The article considers the issues of organization of technical self-organizing systems on the basis of modern synergetic concept. The principles of natural self-organizing systems are transferred to technical. Detailed description of the three possible levels of self-organization in technical systems: parametric and functional and structural.

Self-organizing system, parametric self-organization, functional self-organization, structural self-organization, synergetic