

УДК 62-50:681.51

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Ожогова Е.В., Лубенцова Е.В., Лубенцов В.Ф., Левченко В.И.

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар,
e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru*

В статье рассмотрена методика решения задачи многокритериального выбора наилучшей программной платформы автоматизации технологических систем. Решение рассмотрено на основе поэтапного применения процедуры анализа иерархий. В качестве исходных данных на каждом этапе используются экспертные парные сравнения альтернатив по каждому заданному критерию. В основу методики положены систематизация критериев и системных требований к программному обеспечению (ПО) различных групп и метод анализа иерархий. Сформированные группы содержат критерии, наиболее близкие к требуемым и характеризующие наперед заданные свойства выбранного ПО. В методике использованы парные сравнения альтернатив с использованием девятибалльной шкалы и последующим ранжированием набора альтернатив по всем критериям и целям. Формально схема методики иерархического решения многокритериальной задачи заключается в следующем: разработчиком системы управления формируется набор некоторого числа вариантов (альтернатив) критериев (характеристик) программных комплексов, из которых производится выбор одного наиболее значимого для решаемой задачи. При низком уровне экспертных суждений, допущенном экспертом при заполнении матрицы, осуществляется пересмотр экспертных оценок. Для этого используется разработанный авторами алгоритм повышения согласованности матриц парных сравнений на основе корректировки их собственных значений. Положительным моментом данного алгоритма является отсутствие необходимости пересмотра всех значений матрицы для улучшения ее согласованности. На следующем этапе решается задача выбора программного комплекса, предпочтительного (оптимального) с точки зрения разработчика. Поскольку понятие «оптимальности» при многих критериях достаточно сложно, то при отсутствии математических моделей следует говорить о рациональном решении, под которым понимается близкое к оптимальному решение из сформированного набора допустимых вариантов (альтернатив).

Ключевые слова: многокритериальный выбор, программные средства, парные сравнения альтернатив, метод иерархического анализа альтернатив

MULTI-CRITERIA SELECTION OF THE OPTIMAL SOFTWARE PACKAGE FOR CONTROL OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Ozhogova E.V., Lubentsova E.V., Lubentsov V.F., Levchenko V.I.

Kuban State Technological University, Krasnodar, e-mail: vf.lubentsov@yandex.ru

The article considers the method of solving the problem of multi-criteria selection of the best software platform for automation of technological systems. The solution is considered on the basis of a step-by-step application of the analytic hierarchy process. Expert pairwise comparisons of alternatives for each given criterion are used as initial data at each stage. The methodology is based on the systematization of criteria and system requirements for software of various groups and the analytic hierarchy process. The formed groups contain criteria that are closest to the required ones and characterize the predetermined properties of the selected software. The methodology uses pairwise comparisons of alternatives using a nine-point scale and subsequent ranking of a set of alternatives according to all criteria and goals. Formally, the scheme of the methodology for the hierarchical solution of a multi-criteria problem is as follows: the developer of the control system forms a set of a certain number of options (alternatives) criteria (characteristics) of software complexes, from which one of the most significant for the problem solution is selected. With a low level of expert judgments made by an expert when filling out the matrix, expert assessments are reviewed. To do this, the algorithm developed by the authors is used to increase the consistency of the matrices of pairwise comparisons based on the correction of their eigenvalues. The positive aspect of this algorithm is that there is no need to revise all the values of the matrix to improve its consistency. At the next stage, the problem of choosing a software package that is preferable (optimal) from the point of view of the developer is solved. Since the concept of "optimality" is quite difficult under many criteria, in the absence of mathematical models, we should talk about a rational solution, which means a solution close to optimal from a formed set of acceptable options (alternatives).

Keywords: multi-criteria selection, software tools, pairwise comparisons of alternatives, analytic hierarchy process

В данное время имеется большое разнообразие программных сред (ПС), но нет методики их оценки и выбора наилучшей в каждом конкретном случае, в частности в задачах разработки систем управления технологическими процессами [1]. В большинстве случаев разработка алгоритмов управления технологическим оборудованием и процессами осуществляется с применением языка функциональных схем.

Недостатком его применения является отсутствие наглядности в динамике протекания процесса и функционировании оборудования.

Использование словесного описания при разработке алгоритмов программно-логического управления и формировании требований к выбору ПС может сопровождаться их неполнотой и противоречивостью. Отсутствие количественной оценки согла-

сованности высказанных суждений разработчиков (экспертов) относительно предпочтений того или иного ПС усугубляет ситуацию при создании системы управления со взаимосвязанными управляющими устройствами, реализуемыми коллективом разработчиков и программистов с использованием специфической технологии программирования. Из изложенного вытекает актуальность решения задачи многокритериального выбора программного инструментария для управления технологическим процессом и оборудованием с помощью проведения сравнительного анализа альтернатив и обеспечения повышения согласованности экспертных суждений.

Цель исследования заключается в обосновании применения метода сравнительного анализа для выбора комплекса ПС как задачи многокритериального выбора при разработке алгоритмов дискретного управления технологическим оборудованием.

Достижение поставленной цели требует формализации используемой качественной информации о предпочтительности того или иного локального критерия оптимальности из нескольких заданных и реализации алгоритма повышения согласованности экспертных суждений при решении задачи выбора вариантов, что является научной новизной предложенной методики многокритериального выбора ПО. Задача выбора ПО и сравнения возможных альтернатив решается с помощью экспертных суждений. Суждения экспертов должны быть согласованы, т.е. непротиворечивы. Для этого в данной статье используется разработанный нами метод согласованности матриц парных сравнений на основе компонент их максимальных собственных чисел [2]. При этом становится возможным обоснованное принятие оптимального варианта решения. Результатом решения задачи является выбранный конкретный тип ПС.

Материалы и методы исследования

Важной составляющей не поддающейся полной формализации процесса проектирования систем управления технологическим процессом и оборудованием является принятие решений. В данной работе, в частности, такой задачей является выбор конкретного типа программного комплекса. Сложность такой задачи обусловлена в первую очередь противоречивостью нескольких критериев, что приводит к необходимости использования некоторой схемы разумного компромисса, обеспечивающего гармоничное повышение качества решения по каждому частному критерию [3].

Задача выбора фирм-разработчиков ПС может быть корректно разрешена только на основе многокритериального подхода к принятию решений. Задача многокритериального выбора в данной работе сформулирована следующим образом. На первом этапе разработчиком системы управления сформирован набор некоторого числа вариантов (альтернатив) критериев (характеристик) программных комплексов, из которых требуется произвести выбор одного наиболее значимого для решаемой задачи [4]. Затем на следующем этапе решается задача выбора ПС, предпочтительного (оптимального) по отдельному частному критерию. При отсутствии математических моделей следует говорить о рациональном решении, под которым понимается близкое к оптимальному решение из сформированного набора допустимых вариантов (альтернатив).

Рассмотрим характеристики существующих на рынке автоматизации следующих ПС, не привязанных к конкретному технологическому оборудованию:

– ПС программирования программно-логических контроллеров (ПЛК) CoDeSys (аббревиатура от Controller Development System) является распространенной средой, в которой кроме пяти стандартных языков программирования (ЯП) ПЛК используется язык CFC (Continuous Function Chart) [5, 6];

– ПС LabView (аббревиатура от Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), реализованная на основе графического ЯП «G», применяется для сбора и обработки данных, управления технологическими объектами и процессами, для реализации графических схем подключения оборудования и др. Принцип построения LabView близок к программной системе SCADA [7, 8];

– ПС ISaGRAF является программным продуктом, использующим аппаратно независимый генератор исполняемого кода и позволяющим осуществлять трансляцию проектов в программный код на языке «С» и получить полнофункциональный контроллер [9];

– ПС Multiprog является средой разработки программ логического управления с полным набором сервисов стандарта МЭК 61131-3 [10]. ПС базируется на операционной системе реального времени собственного производства (ProConOS) со средой программирования ОС Windows;

– ПС Open PCS является средой для разработки программ логического управления стандарта МЭК 61131-3, которая может быть использована производителями обо-

рудования для программирования контроллеров с помощью модуля поддержки ПЛК – SmartPLC [11]. Последняя версия ПС построена на базе технологии ISaGRAF, рассмотренной выше [9];

– ПС Simatic Step 7 является средой для выполнения комплекса работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации на основе ПЛК Simatic S7-300 и Simatic S7-400 фирмы Siemens. В первую очередь это работы по программированию ПЛК с использованием трех ЯП стандарта МЭК 61131-3: LD – язык релейно-контактной логики; FBD – язык функциональных блочных диаграмм; ST – язык списка инструкций [12].

В табл. 1 приведены суждения и характеристики ПС, являющиеся информационными данными для построения матрицы парных сравнений, используемой для выбора рационального программного комплекса и приведенной в табл. 2.

Из анализа приведенных данных можно сделать вывод, что наличие нескольких характеристик не позволяет однозначно сделать свой выбор на конкретном ПС, принимаемым в качестве оптимальной альтернативы. Далее количественно проанализируем приведенные характеристики ПС, для чего произведем расчет значений приоритетов альтернатив и сведем в табл. 2 оценки для каждого ПС по шкале относительной важности [4].

Таблица 1

Характеристика ПС для разработки системы дискретного управления технологическим оборудованием

ПС	Характеристика				
	ОС	ЯП	Обеспечение совместимости с другими ПС ПЛК	Поддержка объектно-ориентированной парадигмы	Использование сервисов стандарта МЭК 61131
CoDeSys [5, 6]; ПР1	Windows	IL, ST, LD, FBD, CFC	трансляция в исполняемый код процессора	есть	есть полностью
LabView [8]; ПР2	Windows Mac OS, Linux	графический ЯП «G»	TCP/IP, UDP	нет	ограничено
ISaGRAF [9]; ПР3	Windows	IL, ST, LD, FBD, CFC	генерация исполняемого кода	нет	есть полностью
Multiprog [10]; ПР4	ProConOS	FBD, LD и IL	TCP/IP, UDP/IP	нет	есть полностью
Open PCS [11]; ПР5	Windows	IL, ST, CFC	генерация исполняемого кода	нет	ограничено
Simatic Step 7 [12]; ПР6	Windows	LD, FBD, STL	совместимости нет	есть	есть полностью

Таблица 2

Матрица парных сравнений альтернатив для выбора программной среды и значения приоритета альтернатив

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета (ВП)
ПР1	1	7	7	9	3	5	4,332664	0,478341
ПР2	1/7	1	1/5	3	1/4	1/3	0,438846	0,04845
ПР3	1/7	5	1	7	2	3	1,762734	0,194612
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,027973
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,16205
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,088575
Сумма	1,930	20,333	9,176	29	6,783	12,583	9,057695	1,000001
$\lambda_{max} = 6,719$; ИС = 0,144; СС = 1,24; ОС = 11,59								

Из рассчитанных нормализованных оценок вектора приоритета (ВП) следует, что наибольшее значение при выборе программной среды принадлежит варианту ПР1 (47,8341%). Для проверки достоверности полученного результата необходимо проверить, что экспертные суждения при составлении матрицы парных сравнений альтернатив были непротиворечивы. Для этого рассчитываются индекс согласованности (ИС), случайная согласованность (СС) матрицы шестого порядка, равная 1,24 [4], и отношение согласованности (ОС). Контроль ОС – одна из процедур в реализации последовательности этапов решения задачи многокритериального выбора, является сквозным, т.е. он осуществляется на всех последующих этапах принятия решения. Используя вычисленное

максимальное собственное значение матрицы $\lambda_{max} = 6,719$, получены значения $ИС = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) = (6,719 - 6) / 5 = 0,1438$; $ОС = 0,1438/1,24 = 0,1159 > 0,10$, приведенные в табл. 2. ОС, равное 11,59%, превышает допустимое, равное 10%, что является неприемлемым и свидетельствует о нарушении логичности суждений, допущенном экспертом при заполнении матрицы, т.е. уровень их согласованности очень мал, а значит, необходимо пересмотреть экспертные оценки. Для этого воспользуемся разработанным методом согласованности матрицы парных сравнений в соответствии с методом [2]. Рассчитанные ОС и новые оценки ВП, введя новые значения второго элемента a_{12} в первой строке матрицы элементов сравнения, приведены в табл. 3–7.

Таблица 3

Матрица парных сравнений для выбора программной среды при экспертной оценке $a_{12} = 6$

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
ПР1	1	7	6	9	3	5	4,222768	0,469526
ПР2	1/7	1	1/5	3	¼	1/3	0,438846	0,048795
ПР3	1/6	5	1	7	2	3	1,80861	0,201098
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,028172
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,163203
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,089205
Сумма	1,954	20,333	8,176	29	6,783	12,583	8,993675	0,999999
$\lambda_{max} = 6,600$; ИС = 0,120; СС = 1,24; ОС = 9,683								

Таблица 4

Матрица парных сравнений для выбора программной среды при экспертной оценке $a_{12} = 5$

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
ПР1	1	7	5	9	3	5	4,096381	0,459077
ПР2	1/7	1	1/5	3	¼	1/3	0,438846	0,049181
ПР3	1/5	5	1	7	2	3	1,864411	0,208942
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,028395
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,164494
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,089911
Сумма	1,987	20,333	7,176	29	6,783	12,583	8,923089	1,000000
$\lambda_{max} = 6,482$; ИС = 0,096; СС = 1,24; ОС = 7,781								

Таблица 5

Матрица парных сравнений для выбора программной среды
при экспертной оценке $a_{12} = 4$

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
ПР1	1	7	4	9	3	5	3,946832	0,446263
ПР2	1/7	1	1/5	3	1/4	1/3	0,438846	0,04962
ПР3	1/4	5	1	7	2	3	1,935055	0,218794
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,028648
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,165962
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,090713
Сумма	2,037	20,333	6,176	29	6,783	12,583	8,844184	1,000000
$\lambda_{max} = 6,367$; ИС = 0,073; СС = 1,24; ОС = 5,927								

Таблица 6

Матрица парных сравнений для выбора программной среды
при экспертной оценке $a_{12} = 3$

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
ПР1	1	7	3	9	3	5	3,762058	0,429731
ПР2	1/7	1	1/5	3	1/4	1/3	0,438846	0,050128
ПР3	1/3	5	1	7	2	3	2,030095	0,231893
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,028942
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,167663
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,091643
Сумма	2,121	20,333	5,176	29	6,783	12,583	8,75445	1,000000
$\lambda_{max} = 6,261$; ИС = 0,052; СС = 1,24; ОС = 4,205								

Таблица 7

Матрица парных сравнений для выбора программной среды
при экспертной оценке $a_{12} = 2$

Программная среда	ПР1	ПР2	ПР3	ПР4	ПР5	ПР6	Оценка компонент собственного вектора	Нормализованные оценки вектора приоритета
ПР1	1	7	2	9	3	5	3,516228	0,406475
ПР2	1/7	1	1/5	3	1/4	1/3	0,438846	0,05073
ПР3	1/2	5	1	7	2	3	2,172025	0,251085
ПР4	1/9	1/3	1/7	1	1/5	1/4	0,253368	0,029289
ПР5	1/3	4	1/2	5	1	3	1,467799	0,169677
ПР6	1/5	3	1/3	4	1/3	1	0,802284	0,092744
Сумма	2,287	20,333	4,176	29	6,783	12,583	8,65055	1,000000
$\lambda_{max} = 6,1772$; ИС = 0,0354; СС = 1,24; ОС = 2,855								

Таблица 8

Иерархия расположения альтернатив ПР1, ... , ПР6
на основе нормализованных оценок вектора приоритета (ВП)

Программная среда	Нормализованные оценки вектора приоритета (ВП)					
ПР1	0,478341	0,469526	0,459077	0,446263	0,429731	0,406475
ПР3	0,194612	0,201098	0,208942	0,218794	0,231893	0,251085
ПР5	0,162050	0,163203	0,164494	0,165962	0,167663	0,169677
ПР6	0,088575	0,089205	0,089911	0,090713	0,091643	0,092744
ПР2	0,048450	0,048795	0,049181	0,049620	0,050128	0,050730
ПР4	0,027973	0,028172	0,028395	0,028648	0,028942	0,029289

Как видно из табл. 3–7, последовательное изменение a_{12} приводит к улучшению ОС: ОС снизилось с 11,59 до 2,855%, при этом наилучшая альтернатива и ранжирование элементов сравнений не изменились, что подтверждено полученными следующими данными для вектора приоритета при $a_{12} = (7; 6; 5; 4; 3; 2)$: ВП = (0,478341; 0,469526; 0,459077; 0,446263; 0,429731; 0,406475) и ОС = (11,6; 9,683; 7,781; 5,927; 4,205; 2,855). Иерархическое расположение альтернатив представлено в табл. 8, из которой следует ПР1 > ПР3 > ПР5 > ПР6 > ПР2 > ПР4, где знак « > » обозначает превосходство одного программного средства над другим.

Результаты исследования и их обсуждение

Из полученных результатов можно сделать вывод, что предпочтительным программным продуктом является ПС CoDeSys (ПР1), а наименее значимым – Multiprog (ПР4). Это подтверждается рассчитанными нормализованными оценками вектора приоритета, которые соответственно равны 0,406475 и 0,029289.

Действительно, выбранный программный комплекс по отношению к сравниваемым характеризуется следующими возможностями:

- обеспечивает разработку программно-логического управления технологическим процессом и оборудованием при заданной информационной мощности системы и конфигурации аппаратных входов/выходов;

- обеспечивает совместимость входов/выходов аппаратных средств, представляемых разработчиками системы в таблице-циклограмме программно-логического управления процессом и исполнительным оборудованием, со входами/выходами технологического процесса и оборудования, и их привязку ко входам/выходам системы управления;

- обеспечивает процесс отладки ПО системы управления в соответствии с методикой тестирования.

Заключение

В работе обоснована целесообразность применения средств программирования CoDeSys для разработки системы логического управления технологическим оборудованием. Это подтверждено полученными значениями глобальных приоритетов, из которых видно, что наибольший приоритет, равный 0,406475, имеет программная среда CoDeSys. Следовательно, при разработке программы управления оборудованием следует отдать предпочтение именно этому программному комплексу. Выбранный программный комплекс CoDeSys выгодно отличается от сравниваемых альтернатив тем, что среда программирования позволяет проектировать и отлаживать программы управления исполнительными устройствами на языке CFC стандарта МЭК 611-31 [13].

Полученные результаты показывают, что предложенная методика позволяет обосновать и эффективно использовать человеко-машинные процедуры решения задачи многокритериального выбора программного инструментария (комплекса программ) для разработки логического управления технологическим оборудованием. Установлено, что решение многокритериальной задачи с использованием частных локальных критериев является корректным, благодаря проверке непротиворечивости экспертных суждений. Это позволяет говорить о рациональности полученного решения, которое при отсутствии математических моделей является близким к оптимальному решению и характеризует практическую значимость проведенного исследования. Предложенная методика решения многокритериальной задачи выбора реализована программно [14] и использована в процессе разработки системы автоматизации биогазовой установ-

ки, в части управления последовательно связанными технологическими агрегатами: насосом, оснащенным реле давления, контролирующим работу собственно насоса и электродвигателя, обеспечивающего вращение рабочего колеса через соединительную муфту, и магнитного пускателя, обеспечивающего подачу электроэнергии к электродвигателю, а также кнопочного поста [14]. Данные установки производят биогаз как альтернативный источник энергии, и их практическая значимость predetermined созданием и реализацией запланированных к 2030 г. новых технологических платформ на основе биотехнологий. Реализация таких биотехнологических платформ возможна с использованием выбранного в данной работе программного обеспечения задач управления последовательно связанными агрегатами в автоматизированной системе управления производством биогаза.

Список литературы

1. Галкин Н.С., Терехин А.Р., Забенкова Н.А., Бесфамильная Е.М. Структуризация автоматизированных систем управления технологическим производством // Молодой ученый. 2020. № 6 (296). С. 22–25.
2. Лубенцова Е.В., Ожогова Е.В., Лубенцов В.Ф., Шахрай Е.А., Масютина Г.В. Метод согласованности матриц парных сравнений на основе компонент их максимальных собственных чисел // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 7. С. 78–83.
3. Нежметдинов Р.А. Принципы и методологические основы построения программных систем логического управления технологическим оборудованием: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2020. 50 с.
4. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 20 с.
5. Официальный русскоязычный сайт компании «CoDeSys». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.codesys.ru/> (дата обращения: 16.09.2022).
6. Официальный сайт программного продукта CoDeSys компании 3S – Smart Software Solution GmbH. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.codesys.com/> (дата обращения: 16.09.2022).
7. Официальный сайт компании «National Instruments». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ni.com/ru-ru.html> (дата обращения: 16.09.2022).
8. Официальный сайт программного продукта LabView компании National Instruments. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.labview.ru/> (дата обращения: 16.09.2022).
9. Официальный сайт программного продукта ISaGRAF компании Rockwell Automation. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isagraf.com/index.htm> (дата обращения: 16.09.2022).
10. Официальный сайт компании KW software. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kw-software.com/> (дата обращения: 16.09.2022).
11. Официальный сайт компании Infoteam software AG. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infoteam.de/> (дата обращения: 16.09.2022).
12. Официальный сайт компании «Siemens». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.siemens.com/global/en/home.html> (дата обращения: 16.09.2022).
13. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016. Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. Programmable controllers. Part 3. Programming languages. М.: Стандартинформ, 2016. 230 с.
14. Ожогова Е.В., Лубенцов В.Ф., Левченко В.И., Посмитная Л.А., Князькина Т.Г., Закагимова А.С. Программа управления последовательно связанными агрегатами в автоматизированной системе управления производством биогаза // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611010. Правообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». 2022. Бюл. № 1.