

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЙ И ПЛАНОВ РАБОТЫ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. А. ПОТРЯСАЕВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: spotryasaev@gmail.com*

Представлен метод, позволяющий с использованием единого полимодельного логико-динамического описания одновременно решать задачи синтеза технологии управления киберфизическими системами и планирования выполнения ими соответствующих расписаний работ. Приведен пример решения указанных задач применительно к организации работ промышленных робототехнических комплексов.

Ключевые слова: комплексное планирование, киберфизические системы, промышленный интернет вещей, логико-динамические модели, проактивное управление, автоматизация моделирования

Введение. Микроэлектронные устройства серийного производства, способные взаимодействовать с физическим миром, выполнять вычисления и обмениваться информацией по стандартным интернет-протоколам, находят широкое применение во всех сферах деятельности человека. Распространение этих устройств постепенно меняет привычный облик информационных систем за счет тесной интеграции вычислительных и физических процессов, формируя информационно-технологическую концепцию киберфизических систем (КФС) [1—3].

Одной из реализаций КФС является интернет вещей — это концепция и технологии организации функционирования территориально-распределенной вычислительной сети материальных объектов (предметов), оснащенных вычислительными, управленческими и телекоммуникационными модулями для взаимодействия друг с другом и с внешней средой и ориентированных на предоставление заданной совокупности сервисов потребителям [2].

Интернет вещей в настоящее время находит применение в широком диапазоне прикладных направлений: от организации быта человека в „умном доме“ до медицинских и транспортных систем. Одним из конкретных видов реализации интернета вещей на практике является промышленный интернет вещей. Следует отметить, что киберфизические системы, промышленный (или индустриальный) интернет вещей и ряд смежных технологий в настоящее время рассматриваются в рамках общей концепции четвертой промышленной революции, известной как „Индустрия 4.0“ — средства повышения конкурентоспособности промышленности через усиленную интеграцию киберфизических систем в производственные процессы [3—5].

Промышленный интернет вещей. Это многоуровневая система, которая содержит датчики и контроллеры, установленные в узлах и агрегатах промышленного объекта, средства передачи данных, средства удаленного контроля и управления в автоматическом режиме [3]. Предшественником промышленного интернета вещей принято считать автоматизированные системы управления

технологическими процессами, основные направления развития которых состоят в замене отраслевых протоколов взаимодействия устройств на интернет-протоколы и оснащении вычислительными устройствами не только ключевых узлов технологического процесса, а практически всех ресурсов предприятия. В промышленном интернете вещей четко выражена упорядоченность физических и вычислительных процессов, формально определена цель функционирования системы, заключающаяся в выпуске высококачественной конкурентной продукции, заданы пространственно-временные, технические, технологические и финансовые ограничения.

Комплексное планирование. Наиболее значимую роль в Индустрии 4.0 играет решение задач моделирования, мониторинга и управления. Так, один из разделов исходного документа „Рекомендации по реализации стратегической инициативы Индустрия 4.0“, разработанного Национальной академией науки и техники Германии, посвящен управлению в сложных производственных системах [4]. Сложность задач проактивного управления КФС вызвана стремительно растущим количеством ее элементов и расширением их функциональности, предъявлением индивидуальных требований к экземплярам продукции, повышением динамики доставки продукции, возрастанием степени междисциплинарности, быстро меняющейся схемой взаимодействия вовлеченных предприятий, а также неопределенностью поведения самих узлов и подсистем, избыточностью их взаимосвязей, разнообразием функций управления, территориальной распределенностью объектов.

Управление киберфизическими системами включает такие функции, как целеполагание, планирование (стратегическое, долгосрочное, оперативное, календарное и т.п.), регулирование (оперативное управление), контроль и учет, мониторинг и координация [5—7]. Среди них важнейшей функцией является согласованное (скоординированное) планирование работы распределенных КФС. Основываясь на концепции инвариантности состояний физической производственной системы и описывающих их состояний распределенного асинхронного вычислительного процесса [7], в рамках решения задачи планирования работы КФС предлагается использовать понятия управления производственным процессом и управления соответствующей этому процессу киберфизической системой как тождественные.

Промышленный интернет вещей за счет глубокой интеграции вычислительных и физических процессов открывает новые возможности для комплексного планирования работы КФС, т.е. совместного планирования всех процессов и распределения материальных, энергетических и информационных ресурсов производства. Комплексное планирование позволяет учесть взаимное влияние подсистем, а также связать результаты целевого применения КФС с вариантами функционирования ее узлов и подсистем. Более того, результаты планирования должны удовлетворять предъявляемым к нему, как правило, разнородным требованиям. При комплексном планировании появляется возможность учесть указанные требования в ходе решения задач многокритериальной оптимизации соответствующих планов [6—8].

Планирование работы киберфизических систем. Переход от специфических промышленных протоколов передачи данных к протоколам общего назначения, открытость и унификация аппаратной архитектуры приводят к возникновению существенной структурно-функциональной избыточности промышленного интернета вещей. Достижение цели (в общем случае — целей) функционирования таких систем зачастую может осуществляться не единственным путем, а множеством способов (технологий), различающихся значениями таких показателей качества управления КФС, как оперативность, достоверность, обоснованность, ресурсоемкость, устойчивость и т.п.

В связи с указанными особенностями КФС существующие классические подходы к решению задач объемно-календарного планирования (построения расписаний) напрямую не могут быть применены к процессам функционирования промышленного интернета вещей, так как для них определены технологические процессы лишь при штатных условиях эксплуатации КФС. При этом выбор штатной технологии функционирования для конкретных условий

обстановки должен также быть основан на характеристиках операций, потоков и ресурсов, которые, опять же, зависят от выбираемой технологии.

К настоящему времени разработано множество моделей, методов и алгоритмов как перспективного, так и календарного (оперативного) планирования и диспетчеризации функционирования КФС [9—11]. Большинство используемых подходов направлены на решение задач планирования в отдельных элементах и подсистемах КФС без их согласования и учета взаимного влияния, без учета факторов неопределенности и факторов, связанных с многокритериальной постановкой и решением соответствующих задач оптимального планирования, а также без согласованного учета на всех уровнях главной цели функционирования КФС — выпуска высококачественной продукции. Более того, задача синтеза технологии управления КФС и задача планирования ее функционирования рассматриваются отдельно друг от друга, что существенно сокращает количество анализируемых структурно-функциональных схем КФС, препятствует получению наилучших решений и приводит к пиковым нагрузкам в указанных системах.

К тому же классические методы поиска наилучшего решения задачи планирования при их использовании на практике применительно к задачам оптимизации функционирования КФС не позволяют обеспечить их строгое решение из-за чрезвычайно большой размерности соответствующих задач. Различные эвристические подходы, такие, например, как генетические и муравьиные алгоритмы [9—11], эвристические правила планирования и диспетчеризации, базирующиеся на теории расписаний и комбинаторике [9], позволяют получить допустимый план функционирования КФС, но не предоставляют информации об оценках степени отклонения значений показателей качества конкретного плана от оптимальных.

Предлагаемый подход и его практическое применение. Для преодоления изложенных выше трудностей предлагается использовать подход, предусматривающий одновременное решение задачи синтеза технологии проактивного управления КФС и задачи планирования операций, потоков и ресурсов указанных систем с использованием единого полимодельного логико-динамического описания рассматриваемой предметной области. Разработанные в рамках предложенного подхода оригинальные комбинированные методы и алгоритмы синтеза технологий управления КФС и расписаний работы системы позволяют получать оптимальные (эталонные) решения, исходя из цели функционирования КФС и соответствующих критериев качества управления ими в динамически изменяющейся обстановке.

Основы предлагаемого подхода, подробное описание моделей и результаты экспериментов изложены в работах [12—17]. В качестве базовой математической структуры для формального описания задач одновременного синтеза технологий и планов работы КФС на теоретико-множественном уровне детализации было предложено использовать динамический альтернативный системный граф с управляемой структурой [7]. На модельно-алгоритмическом уровне детализации использовались логико-динамические модели, содержащие модели управления операциями, потоками, ресурсами, параметрами операций и структурами, а также вспомогательные динамические модели для учета требований, связанных с прерываниями операций.

К настоящему времени разработанное специальное модельно-алгоритмическое и программное обеспечение в виде различных модификаций получило успешную реализацию при исследовании ряда важных практических задач (например, в таких областях, как космонавтика, судостроение, логистика, робототехника) [18]. Для иллюстрации возможностей предлагаемого подхода к решению задач синтеза технологии управления КФС и планирования выполнения ими соответствующих расписаний работ приведем следующие примеры.

Пусть имеется группа промышленных роботов, образующих три производственные линии, в рамках которых реализуются три этапа обработки деталей. Между этапами обработки существует техническая возможность (например, с помощью вспомогательных транспортных роботов) передачи деталей с одной производственной линии на другую. Промышленные

роботы являются многофункциональными и выполняют идентичную работу, но с различными временными и энергетическими затратами. Так, первая производственная линия является наиболее экономичной по затратам энергии, но и интенсивность (скорость) обработки деталей на ней самая низкая. Вторая производственная линия характеризуется средними значениями показателей суммарных затрат времени и энергопотребления при выполнении производственного плана. Третья производственная линия — высокопроизводительная, но энергозатратная. Альтернативный граф задающих различные технологии выполнения работами производственных операций приведен на рис. 1. Для каждой из 39 операций задан ее объем в условных единицах (на рисунке обозначен символом „s:“). Время выполнения операции роботом определяется как результат деления объема операции на интенсивность ее обработки. Каждый промышленный робот характеризуется заданным энергопотреблением в единицу времени и интенсивностью выполнения операций. В представленном графе существует 60 допустимых способов реализации производственного процесса.

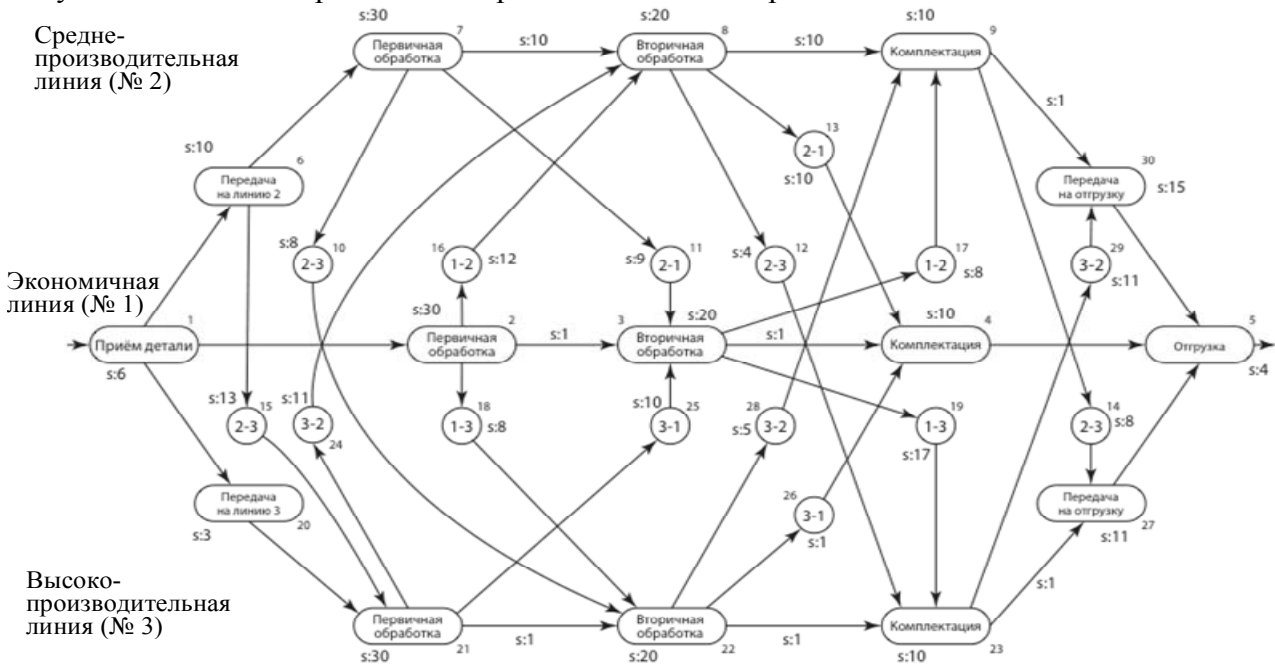


Рис. 1

В рассматриваемом примере при многокритериальной оптимизации использовалась линейная свертка двух частных показателей качества управления робототехническими комплексами, а именно показателей суммарных затрат времени и электроэнергии на обработку деталей.

В ходе машинных экспериментов установлено, что эффект от применения разработанного модельно-алгоритмического обеспечения увеличивается при росте числа „конфликтов“ между операциями по обработке деталей при их распределении между роботами. Рассмотрим последовательно результаты моделирования для двух, трех и четырех потоков деталей, которые могут обрабатываться на производственных линиях.

При двух потоках деталей задача решалась сначала эвристическим методом („первый пришел, первый обслуживается“ с упорядочением по энергопотреблению ресурсов роботов), а затем решалась многокритериальная оптимизационная задача синтеза технологии и построения производственного плана. Обобщенный показатель качества ($J_{об}$) решения задачи синтеза технологии обработки деталей и планирования соответствующих расписаний работы промышленными роботами в первом случае был равен 910, а во втором — 580. Таким образом, улучшение обобщенного показателя качества работы производственных линий составило 36,2 %.

Далее, при трех потоках деталей расчет с использованием эвристического алгоритма обеспечивает значение $J_{об} = 1350$, а с использованием оптимизационной процедуры — $J_{об} = 845$; в данном случае улучшение значения $J_{об}$ достигло 37,4 %. Для четырех потоков деталей были

получены следующие результаты: для эвристического алгоритма $J_{об} = 1820$, по результатам оптимизации его значение было уменьшено до 1175, т.е. улучшение значения обобщенного показателя качества составило 35,4 %. При дальнейшем увеличении количества потоков деталей выявленная закономерность изменения значений обобщенного показателя качества синтеза технологий и производственных расписаний сохраняется.

На рис. 2 представлена синтезированная технология реализации трех производственных процессов: весь комплекс операций, связанных с обработкой указанных потоков деталей, гибко распределяется между роботами, входящими в состав производственных линий.

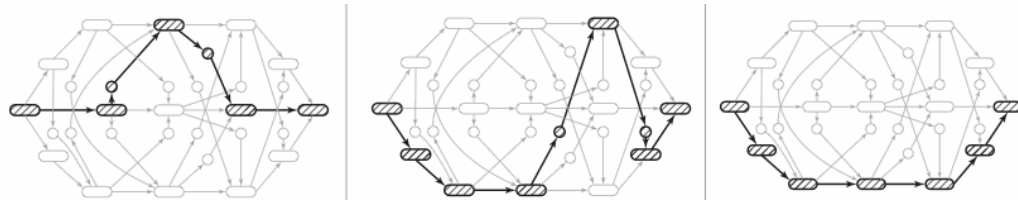


Рис. 2

Второй пример демонстрирует возможности учета индивидуальных предпочтений пользователя при составлении производственных расписаний в рамках разработанного программного комплекса. Для этого ему предоставляется возможность в интерактивном режиме варьировать весовые коэффициенты, определяющие значимость частных показателей качества планирования в линейной свертке, задающей обобщенный показатель качества планирования.

При соотношении показателей суммарных затрат времени ($J_{вр}$) и энергопотребления ($J_{эн}$) на обработку деталей как 2/3 формируются технология и план, ориентированные на использование наиболее производительной производственной линии. Время выполнения плана сокращается, при этом наблюдается ухудшение частного показателя $J_{эн}$. Для случая с двумя потоками деталей $J_{вр} = 61$ и $J_{эн} = 1021$.

Если при планировании предпочтения пользователя смещаются в сторону большей экономичности плана, с позиции затрат электроэнергии, это приводит к следующим результатам: $J_{вр} = 70$, а $J_{эн} = 855$; при этом обработка деталей осуществляется для большинства операций на средне- и малопроизводительных производственных линиях.

На рис. 3, а, б приведены примеры планов, ориентированных на реализацию высокопроизводительной технологии (а) и реализацию экономичной стратегии использования производственных ресурсов (б) (по оси ординат — идентификационный номер операции N , а по оси абсцисс — время t).

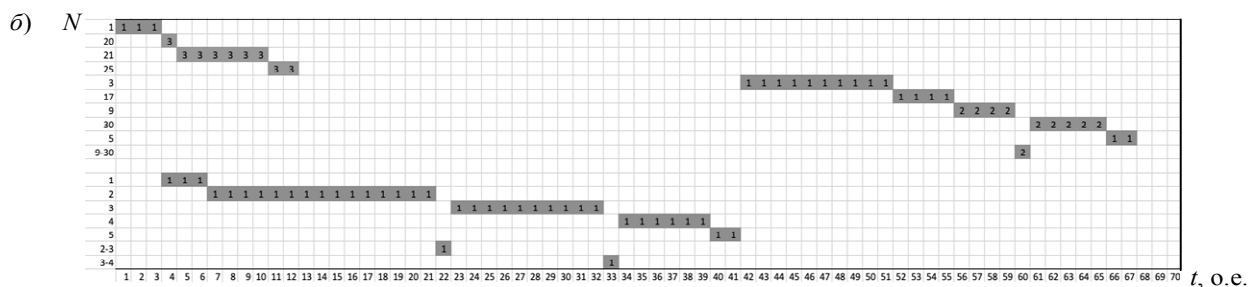
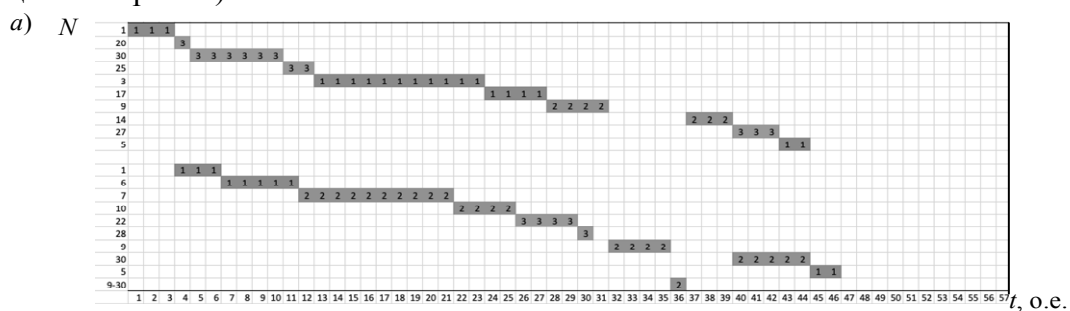


Рис. 3

Завершая рассмотрение данных примеров, необходимо отметить, что проактивность предлагаемого подхода к решению задач синтеза технологий и программ (планов) управления производственными ресурсами обеспечивается двумя способами: на основе оценивания и анализа показателей робастности составленных планов, базирующегося на построении и исследовании характеристик аппроксимированных областей достижимости указанных программ управления в пространстве возмущающих воздействий [12—13, 15—16], а также путем имитации различных вариантов реализации программ управления в условиях возмущающих воздействий и расчета показателей устойчивости данных программ [13, 16].

Заключение. Для киберфизических систем и промышленного интернета вещей предлагаемый в статье переход от эвристической диспетчеризации к комплексному проактивному планированию на основе реализации технологий системного моделирования и логико-динамической интерпретации процессов функционирования указанных сложных объектов позволяет [6—8, 12—17]:

— широко использовать в ходе управления КФС фундаментальные научные результаты, полученные к настоящему времени в современной теории управления сложными динамическими системами с перестраиваемой структурой;

— существенно сократить размерность задач управления КФС, решаемых в каждый момент времени (за счет рекуррентного описания моделей и логических ограничений);

— обоснованно подходить к выбору архитектуры информационной системы предприятия;

— существенно сократить потребление вычислительных мощностей (энергоёмкость и стоимость);

— повысить оперативность решения задач управления КФС при использовании распределенных вычислительных систем, позволяющих проводить декомпозицию и распараллеливание вычислительного процесса.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-11-01254) и в рамках бюджетной темы № 0073–2018–0003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков В.Я. Киберфизические системы // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6—1. С. 64—65.
2. Черняк Л. Платформа Интернета вещей // Открытые системы. СУБД. 2012. № 7.
3. Industrial Internet of Things / Eds.: S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. Springer, 2017.
4. Kagermann H. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 / Working Group. Forschungsunion, 2013.
5. Gilchrist A. Industry 4.0 : The Industrial Internet of Things. N. Y.: Springer, 2016.
6. Математическое обеспечение управления подвижными объектами: Учеб. пособие / Б. А. Резников, И. И. Делий, Б. В. Москвин и др. МО СССР, 1986. 149 с.
7. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
8. Соколов Б. В., Калинин В. Н. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // Автоматика и телемеханика. 1985. № 5. С. 106—114.
9. Анчикин А. С., Семенов В. А. Современные модели и методы теории расписаний // Тр. Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26, №. 3. С. 5—50.
10. Афонин П. В., Кокшагина О. В. Гибридные генетические алгоритмы для задачи составления расписания проекта // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2008. № 9.

11. Бедакова Н. В. Алгоритм муравьиной колонии для решения задач оптимального размещения распределительных центров розничной торговой сети // Науч. журн. КубГАУ (Scientific Journal of KubSAU). 2016. № 119.
12. Потрясаев С. А. Способ организации аналитико-имитационного моделирования АСУ сложными техническими объектами // Материалы конф. „Информационные технологии в управлении“ (ИТУ-2014). 2014. С. 226—231.
13. Потрясаев С. А. Решение задачи комплексного планирования реконфигурации катастрофоустойчивых систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 54—59.
14. Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 62—69.
15. Потрясаев С. А. Синтез сценариев моделирования структурной динамики АСУ активными подвижными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 46—52.
16. Потрясаев С. А. Комплексное моделирование сложных процессов на основе нотации BPMN // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 11. С. 913—920.
17. Зеленцов В. А., Потрясаев С. А. Архитектура и примеры реализации информационной платформы для создания и предоставления тематических сервисов с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Тр. СПИИРАН. 2017. Вып. 55. С. 86—113.
18. <http://litsam.ru>.

Сведения об авторе**Семён Алексеевич Потрясаев**

— канд. техн. наук; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ст. научный сотрудник; E-mail: spotryasaev@gmail.com

Поступила в редакцию
27.08.18 г.

Ссылка для цитирования: Потрясаев С. А. Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 939—946.

MATHEMATICAL AND SOFTWARE FOR SYNTHESIS OF TECHNOLOGIES AND SCHEDULES OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS**S. A. Potryasaev**

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS,
199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: spotryasaev@gmail.com*

An approach is proposed that allows to use the multi-model logical-dynamic description for solving simultaneously the problems of synthesizing the technology of control over cyber-physical systems and planning execution of relevant operations. An example of the problems in question related to organization of the work of industrial robotic complexes is considered; solutions using the developed software are presented.

Keywords: integrated planning, cyber-physical systems, industrial Internet of things, logical-dynamic models, proactive control, automation of simulation

REFERENCES

1. Tsvetkov V.Ya. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, no. 6-1, pp. 64–65. (in Russ.)
2. Chernyak L. *Open Systems Journal*, 2012, no. 7. (in Russ.)
3. Jeschke S., Brecher C., Song H., Rawat D., eds., *Industrial internet of things*, Springer series in wireless technology, Springer, Cham, 2017.
4. Kagermann H. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry*, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, Forschungsunion, 2013.

5. Gilchrist A. *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*, Berkeley, CA, NY, Apress; Distributed to the book trade worldwide by Springer, 2016.
6. Reznikov B.A., Deliy I.I., Moskvina B.V. et al. *Matematicheskoye obespecheniye upravleniya podvizhnymi ob"yektami: Uchebnoye posobiye* (Software of Management of Mobile Objects: Manual), Moscow, 1986, 149 p. (in Russ.)
7. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* (Intellectual Technologies of Monitoring and Management Of Structural Dynamics of Complex Technical Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
8. Sokolov B.V., Kalinin V.N. *Automation and Remote Control*, 1985, no. 5, pp. 106–114. (in Russ.)
9. Anichkin A.S., Semenov V.A. *Programming and Computer Software*, 2014, no. 3(26), pp. 5–50. (in Russ.)
10. Afonin P.V., Kokshagina O.V. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2008, no. 9. (in Russ.)
11. Bedakova N.V. *Scientific Journal of KubSAU*, 2016, no. 119. (in Russ.)
12. Potryasaev S.A. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii* (Information Technology in Management), Proceedings of the Conference, St. Petersburg, 2014, pp. 226–231. (in Russ.)
13. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2006, no. 11(49), pp. 54–59. (in Russ.)
14. Ikonnikova A.V., Petrova I.A., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 11(51), pp. 62–68. (in Russ.)
15. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 11(57), pp. 46–52. (in Russ.)
16. Potryasaev S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, no. 11(59), pp. 913–920. (in Russ.)
17. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2017, no. 55, pp. 86–113. (in Russ.)
18. <http://litsam.ru>.

Data on author

Semyon A. Potryasaev — PhD; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling; Senior Scientist; E-mail: spotryasaev@gmail.com

For citation: Potryasaev S. A. Mathematical and software for synthesis of technologies and schedules of cyber-physical systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 11. P. 939–946 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-11-939-946