

УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ: ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ, СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РЫНКА, РОССИЙСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ, ТРЕНДЫ, ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

В.М. Дозорцев, А.Я. Коростелев, А.В. Малашкевич, А.А. Аносов, Д.В. Агафонов
(ООО «Центр цифровых технологий»)

Описывается зарождение и эволюция систем усовершенствованного управления технологическими процессами, прежде всего, MPC-систем, основанных на прогнозирующих моделях объекта. Особое внимание уделяется советскому и российскому треку этого направления промышленной автоматизации. Характеризуется состояние и дается прогноз рынка, анализируются тренды развития MPC-систем с учетом их окружения другими высокотехнологичными системами управления процессами и производством. Обсуждаются проблемы импортозамещения систем в свете ухода с российского рынка мировых MPC-производителей.

Ключевые слова: управление с прогнозирующими моделями (MPC), APC-системы, системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП), распределенные системы управления (PCU), оптимизация в реальном времени (RTO), искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Через полвека после возникновения любого достигшего зрелости научно-технического направления закономерно обращение к его истории — это позволяет трезво оценить достижения и перспективы, отдать дань уважения первопроходцам (пока остались непосредственные свидетели). Ровно так случилось и с методологией MPC (Model Predictive Control), являющейся основой так называемых APC-систем (Advanced Process Control). В отечественных реалиях это особенно важно, потому что, во-первых, в СССР была своя самостоятельная достойная, хотя и мало известная история APC, а, во-вторых, потому что после ухода в 2022 г. мировых вендоров, оставивших без поддержки значительную инсталляционную базу, перед российскими разработчиками встала важная задача — обеспечить сопровождение существующих и развитие новых APC-решений на основе собственных продуктов.

В 2025 г. вышли сразу две примечательные публикации. Первая — интервью с ключевым научным сотрудником Инженерного факультета Пенсильванского университета Манфредом Морари, непосредственным свидетелем эволюции MPC-систем от нишевого инструмента в химической и нефтяной промышленности до теоретически

обоснованной технологии управления [1]. Вторая — книга Сигурда Скогестада и Томаса Адамса «Истоки динамического матричного управления: Ранние работы Чарльза Р. Катлера», посвященная роли этого выдающегося исследователя в создании и развитии MPC [2].

Основываясь на этой мемуарной канве, ключевых обзорных работах и др. материалах, авторы восстанавливают эволюцию APC-решений, характеризуют текущую функциональность систем, состояние и перспективы мирового рынка, описывают советский, а затем российский «APC-трек», анализируют проблемы замещения западных решений и новейшие тенденции в APC для предприятий химико-технологического типа.

О ТЕРМИНОЛОГИИ И РАМКАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Термины MPC и APC пришли из англоязычной литературы. Первый (управление по прогнозирующим моделям) объединяет класс алгоритмов, оптимизирующих управление динамическим ТП на основе прогнозирования будущего поведения объекта и выбора варианта, обеспечивающего лучшее значение заданного критерия качества при соблюдении имеющихся техни-



ческих и технологических ограничений. Второй термин появился позже и обобщает так называемые системы усовершенствованного управления в противопоставление системам базового регулирования, построенным на простейшем управлении по отклонению. Очевидно, что MPC – только часть APC наряду со многими другими системами управления. Среди них, прежде всего, давно известные системы усовершенствованного регулирования (ARC - Advanced Regulatory Control) [3], включающие в себя управление по возмущению, по соотношению, по ограничениям (*cross-limit control*), перехватывающее регулирование (*override control*) и др. инструменты. В сравнении с базовым регулированием они обеспечивают более точную стабилизацию параметров режима, необходимую, в том числе и для реализации оптимальных режимов, рассчитываемых на более высоких уровнях APC.

Вместе с тем к APC относят много решений, обеспечивающих управление ТП в режиме реального времени, но не использующих прогнозирующие модели. Среди них выделяют инференциальное управление (Inferential Control), в котором контролируемая переменная объекта не измеряется напрямую, а оценивается по вторичному (косвенному) измерению. Это необходимо, когда on-line измерение в реальном времени недоступно или дорого. В непрерывных процессах химико-технологического типа подобные инструменты известны как виртуальные анализаторы качества [4]. Другой класс систем – усовершенствованное последовательное управление (Sequential APC) [5], применяемое в автоматизации переключений, определяемых временными или событийными условиями, наступающими в непрерывных процессах. Среди них системы процедурной автоматизации, управление перемещениями (*movement automation*), управление партиями (*batch control, receipt control*), системы, заточенные под отдельные процессы и оборудование (управление смешением и управление компрессорами), пр.

При таком «широком» понимании доля прогнозирующего управления в общем объеме APC, хоть и остается наибольшей, но не является доминирующей (согласно существующим оценкам, порядка 30% рынка). В то же время большинство российских пользователей понимает под APC именно MPC-управление (с добавлением при необходимости виртуальных анализаторов). Как можно предположить, это объясняется традиционным отношением ARC-инструментов к распределенным системам управления (PCU), включая достаточные затраты на аппаратное обеспечение. К тому же огромная часть APC-внедрений в России приходится на нефтегазовую, химическую и нефтехимическую промышленность (порядка 75% против 45% по миру). В этих отраслях системы последовательного управления применяются значительно реже. Исходя из сказанного, в дальнейшем изложении сосредоточимся на истории и трендах собственно MPC-направления, а в применении к российским APC-системам будем использовать термин СУУТП (системы усовершенствованного управления технологическими процессами), который после определенных дискуссий прижился в российском профессиональном сообществе.

Чарльз Катлер (Charles Cutler, 1936-2020) начал карьеру инженером в Shell Oil Co., в 1984 г. основал DMC Corporation, которую в 1996 г. продал Aspen Technology. В 2000 г. он был избран членом Национальной инженерной академии за вклад в изобретение, разработку и коммерциализацию нового класса передовых технологий управления технологическими процессами (ТП) (<https://www.nationalacademies.org>). Некоторые называют его пионером в области усовершенствованного управления ТП, который своим вкладом в эту область создал новый класс рабочих мест в этом секторе.

Жак Ришале (Jacques Richalet, 1936-2015 гг.) после окончания Ecole polytechnique (ENSAE) получил степень магистра в университете Беркли (США) под руководством проф. Лотфи Заде. Вернувшись во Францию, защитил докторскую диссертацию в 1965 г. Интерес к прогнозирующему управлению на основе моделей возник у него еще в 1968 г., когда он основал консалтинговую компанию ADERSA. За свою научную карьеру опубликовал более 50 статей, а также три монографии по идентификации и прогностическому управлению. Был президентом Национального комитета по автоматическому управлению. Многими исследователями считался "дедушкой прогностического управления" (<https://memento.epfl.ch/event/predictive-functional-control/>).

И.И. Перельман (1924-1994 гг.), д.т.н., проф., один из выдающихся исследователей ИПУ РАН в области идентификации и оптимального управления техническими системами. В 1976 и 1978 г. впервые в СССР, независимо от параллельных работ Катлера и Ришале, сформулировал принцип алгоритма MPC, который назвал «динамической оптимизацией ТП». С середины 70-х до начала 90-х гг. руководил практическими внедрениями MPC в цементной промышленности, металлургии и нефтехимии (<https://www.ipu.ru>).

Будем далее использовать термин MPC для обозначения алгоритма прогнозирующего управления, а термин MPC-система для указания на MPC-алгоритм, включенный в контур управления ТП. В этом контексте MPC-система наряду с другими системами может быть частью СУУТП. Для центральных в данном исследовании процессов химико-технологического типа будем использовать термин PCU как синоним АСУТП.

КАК РОДИЛАСЬ ИДЕЯ MPC?

Основоположники

До недавнего времени считалось, что автором первого полного изложения идеи управления с прогнозирующими моделями был доктор Жак Ришале, опубликовавший свою работу в 1978 г. [6] и уже в 1973 г. применивший этот подход к управлению бинарной ректификационной колонной. И хотя интервью Морари, а также книга Скогстада и Адамса, упомянутые в начале статьи, рассказывают о рождении алгоритмов MPC именно в группе Чарльза Катлера, эти публикации нельзя назвать явным спором о первенстве открытия MPC: молодые коллеги доктора Катлера решили привлечь внимание к его ранним и до сих пор не публиковавшимся работам. Свой алгоритм динамического матричного управления (DMC) Чарльз Катлер официально представил в работе [7] двумя годами позже Ришале. Однако в работе [2] предъясняются сканы набросков, выполненных Катлером еще в 1969 г., в которых впервые излагается идея MPC. Позже, в 1973 г., будучи начальником установки каталитического крекинга на НПЗ в Новом Орлеане, он оказался «запертым» на 3–4 мес. на рабочем месте, поскольку завод охватила забастовка, и у него появилась возможность проверить идею на практике. Тогда-то, согласно поздним запискам Катлера, и был сформулирован DMC-метод, который уже в 1976 г. был внедрен в систему управления процессом гидрокрекинга компании Supoco, а в начале 80-х гг. стал стандартным методом управления сложными процессами в компании Shell¹.

М. Морари предполагает [1], что до поры Катлер и Ришале вообще не знали друг о друге, что выглядит вполне правдоподобно. Тем более не удивительно, что оба они не представляли, что в те же 70-е гг. MPC-метод был предложен проф. И.И. Перельманом из Института проблем управления в Москве. Согласно устной коммуникации одного из авторов настоящей статьи с И.И. Перельманом, последний и Ришале лично пересеклись на Симпозиуме ИФАК в Тбилиси в 1976 г., где оба опубликовали тезисы докладов об MPC [8, 9]. Однако Перельман остался практически неизвестным на Западе. При этом, если работу [9], находившуюся в русскоязычном разделе Трудов Симпозиума, действительно, мало кто в мире мог прочитать, то работа [10], опубликованная в советском журнале «Автоматика и телемеханика» в 1978 г. (то есть в том же году, что и ключевой текст Ришале [6]), была доступна в авторитетной переводной версии журнала, но все же осталась незамеченной. Вывод из этой «тройственной» истории очевидный: идея MPC витала в воздухе: ее оставалось только уловить. И она родилась не на ровном месте.

Предтечи

Можно говорить о нескольких «источниках и составных частях» MPC.

- В начале 60-х гг. появилась теория аналитического конструирования регуляторов Калмана-Летова [11, 12], в которой задача оптимизации в условиях LQG

(линейный объект, квадратический критерий качества, нормально распределенная помеха, нет ограничений на управляющую переменную) сводилась к динамическому программированию и выводу соответствующего уравнения Риккати. Красивый результат (в том числе гарантирующий устойчивость управления), но малоподходящий к реальности управления ТП, где объект не обязательно линеен, критерий необязательно квадратичен, помеха необязательно нормальная, а управления могут быть стеснены.

- В тот же год появился фильтр Калмана, открывающий возможность прогнозирования поведения стохастического объекта с учетом реальных измерений выходных переменных (составляющая «G») [13].

- В 1963-м А.И. Пропой интерпретировал задачу конструирования регулятора как многопараметрическую оптимизацию движения системы относительно вектора управлений на ограниченном интервале. Получающуюся при этом задачу математического программирования можно решать численными методами (градиентным, поисковым или эволюционным) [14]. Принципиально это открывало возможность расшатать жесткие требования к составляющим «L» и «Q».

- В 1964 г. Ф. Киши [15] представил достаточно четкое описание оптимизации на *скользящем* горизонте прогнозирования. Это разрешало проблему «замкнутости-разомкнутости»: в MPC разомкнутая («программная») и простая в реализации оптимизация повторяется на каждом шаге, а прогноз обновляется с учетом нового измеренного состояния объекта, что компенсирует внешние возмущения и неточности модели. Пожалуй, это можно считать решительным предвосхищением метода MPC, но оно было упущено большинством исследователей².

- Целый ряд работ (как до, так и после появления MPC) был посвящен попыткам, оставаясь в рамках аналитического (или квазианалитического) подхода и гарантируя устойчивость решения, отойти от Q-критерия качества или нестесненного управления (в случае ТП оба условия, действительно, нельзя гарантировать) [18–23].

- Наконец, нельзя не упомянуть идею «двухшкальной» модели в контуре управления [24], появившуюся гораздо раньше. В MPC процедура оценивания текущих возмущений как разницы выходов объекта и выходов модели протекает в реальном времени работы ТП, а процедура численного поиска оптимального управления протекает в ускоренном масштабе времени на основе прогнозирования значения критерия потерь при различных вариантах управления.

Метод MPC синтезировал эти идеи и кратко сводился к следующему.

В систему встроена заранее построенная (как правило, по экспериментальным данным) динамическая модель объекта, описывающая зависимость регулируемых переменных (control variables, CV) от управляющих

¹ <https://www.controlglobal.com/home/article/11296813/remembers-digital-pioneer-charles-r-cutler>

² Как в 1914 г. сформулировал Френсис Дарвин, “в науке заслуга отдается тем людям, которые убеждают других в своей идее, а не тем, кому она пришла в голову первому” [16]. Правда, первому в 1906 г. эта мысль пришла в голову Уильяму Ослеру [17].

воздействий (manipulated variables, MV) и наблюдаемых возмущений (disturbance variables, DV). Также задан критерий оценки результата управления, например, минимум дисперсии регулируемых переменных на конечном интервале прогнозирования (задача стабилизации режима вокруг заданных уставок).

На каждом такте работы системы:

- по имеющимся значениям MV и DV вычисляются значения CV на заданном горизонте;

- во встроенном модуле линейного или квадратичного программирования по заданному критерию и с соблюдением имеющихся технических и технологических ограничений вычисляется оптимальная последовательность MV на будущих тактах управления;

- на следующем такте (интервал между тактами обычно составляет от нескольких десятков секунд до 1...3 мин) описанные выше действия повторяются с учетом вновь накопленных технологических измерений.

Сопоставление прогнозируемого и измеряемого значений CV позволяет судить о близости модели текущему состоянию объекта. При значительном изменении характеристик объекта и условий его работы (например, при замене элементов оборудования или при существенном изменении характеристик сырья) модель должна перестраиваться.

MPC не только стабилизирует объект, но и оптимизирует его работу по заданному критерию (максимум производительности, минимум себестоимости или удельного энергопотребления, пр.). Ключевое преимущество APC – снижение отклонений CV от заданных уставок, что позволяет приблизить их к границам технологически допустимого и экономически эффективного режима. (Этот феномен называют «снятием запаса по качеству».)

КАК MPC-СИСТЕМЫ РАЗВИВАЛИСЬ ДАЛЬШЕ?

Краткая генеалогия MPC (рис. 1) в целом соответствует принятой периодизации [25]. Для большей детализации отсылаем читателя к работе [26].

Первое программное обеспечение, реализующее метод предиктивного эвристического управления Ричале [6], получило название IDCOM (*IDentification and COMmand*) и использовало модель в форме импульсной характеристики и целевую функцию на конечном интервале прогнозирования. Практически параллельно этой разработке Катлер и Ремакер реализовали идеологически близкий алгоритм DMC (*Dynamic Matrix*

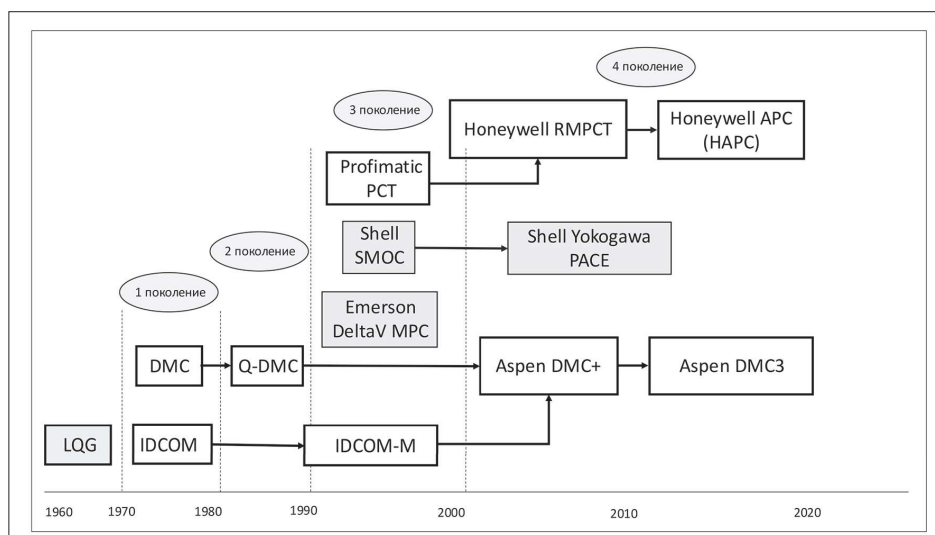


Рис. 1. Четыре поколения MPC

Control) [7, 27] и вскоре описали применение DMC к управлению реакторно-регенераторной секцией установки каталитического крекинга, причем алгоритм был модифицирован для учета нелинейностей и ограничений [28]. Начальные версии IDCOM и DMC представляли собой *первое поколение* MPC-технологий; они оказали огромное влияние на управление технологическими процессами и определили промышленную парадигму MPC.

Второе поколение представлено квадратичным DMC (Q-DMC), строго описанным в 1986 г. в работе [29]. В Q-DMC методом квадратичного программирования решалась MPC-задача управления линейным объектом с квадратичной целевой функцией и с ограничениями на входные/выходные переменные в форме линейных неравенств.

Поскольку алгоритм Q-DMC не предусматривал обработку несовместных решений, инженеры сразу нескольких компаний (Shell, ADERSA, Setpoint, Inc.) разработали новые версии MPC-контроллеров. В алгоритме IDCOM-M (M – *Multivariable*), впервые описанном в 1988 г. [30], использовались две отдельные целевые функции, одна – для выходных переменных, а другая при наличии дополнительных степеней свободы – для входных. После начальной фазы технология MPC постепенно начала демонстрировать огромные преимущества и, таким образом, получила более широкое распространение в 1990-х гг. Компания Shell Research разработала многомерный оптимизирующий контроллер SMOC (*Shell Multivariable Optimizing Controller*) [31], который можно рассматривать как мост между традиционными MPC-алгоритмами и задачами, сформулированными в формализме пространства состояний. Для оценки состояний объекта и неизмеряемых возмущений в SMOC использовался фильтр Калмана. IDCOM-M и SMOC принадлежали к *третьему поколению* MPC, предполагающему наличие нескольких типов ограничений и содержащему механизмы обработки несовместных решений. В том же поколении находятся и некоторые другие алгоритмы,

например, PCT (*Predictive Control Technology*, Profimatics), RMPС (*Robust Multivariable Predictive Control*, Honeywell Inc.) или DeltaV MPC (решение Emerson Electric Co., практически встроенное в PCU DeltaV).

В период 1990-х гг. высокая конкуренция и слияния MPC-поставщиков привели к значительным изменениям в промышленном ландшафте MPC. Крупные компании, занимающиеся MPC, начали поглощения и стремились доминировать на рынке. В 1995 г. PCT и RMPС были объединены в решение RMPCT, робастную технологию предиктивного управления от корпорации Honeywell. А в 1998 г. Q-DMC и SMCA (один из клонов IDCОM-M) были интегрированы компанией AspenTech в решение DMC-plus, а затем в DMC3 с развитой опцией нелинейности. Honeywell RMPCT/Honeywell APC, Aspen DMC-plus/DMC3 и Shell Yokogawa PACE принадлежат уже к *четвертому поколению* MPC-систем, снабженному графическими пользовательскими интерфейсами на базе ОС Windows, специальными технологиями идентификации моделей и несколькими уровнями оптимизации ТП.

Сегодня можно наблюдать дальнейшее развитие технологий, сосредоточенное не столько на улучшении алгоритмов, сколько на совершенствовании процесса разработки и внедрения промышленных MPC-решений. Эти алгоритмы (возможно, их следует отнести к пятому поколению) призваны сделать такой процесс быстрым и простым как для разработчика, так и для клиента, и максимально упростить их сопровождение.

МИРОВОЙ РЫНОК APC: СЕГМЕНТАЦИЯ ПО ИНДУСТРИИ, ГЕОГРАФИИ И КОМПОНЕНТАМ, КОНКУРЕНЦИЯ

По состоянию на 2025 г. мировой рынок прогнозирующего управления (MPC плюс виртуальные анализаторы) достиг 630 млн. долл. США, а к 2035 г. ожидается на уровне 1,67 млрд. долл. США (при сложном проценте CAGR = 10,2%) [32]. Движущими силами роста на этом рынке являются постоянный спрос на автоматизацию процессов, соблюдение все более строгих стандартов качества, экологии, энергосбережения и безопасности, усложнение самих технологических процессов. Особенно широко технология MPC распространена в отраслях химико-технологического типа, благодаря способности справляться с многопараметрическими взаимодействиями в ТП и обеспечивать оптимизацию не только в текущий момент времени, а в течение всего времени процесса.

Помимо нефтегаза, химии и нефтехимии (совокупно 45% рынка) MPC активно применяются в энергетике (20%), фармацевтике и металлургии (по 8,5%). Географически лидируют технологически инновационная Северная Америка (38% рынка), нацеленная на соблюдение строгих законодательных норм Европа (29%), высокопотенциальный Азиатско-Тихоокеанский регион (24%)³.

³Заметим, что доступная на сегодня оценка рынка [32] может не поспевать за быстро меняющимися реалиями.

⁴У этой компании традиционно высокая доля в нефтепереработке и нефтехимии (в определенные исторические периоды до четверти рынка).

Соотношение объема рынка по программному обеспечению (ПО) и услугам в MPC-сегменте на сегодня оценивается как 45% на 55%. Усложнение решаемых MPC-задач повышает стоимость ПО, но объем сервиса (установка, техобслуживание и консалтинг) увеличивается опережающими темпами в связи с ростом сложности проектов и огромным спросом на аналитику данных. Текущее соотношение объема услуг и ПО (1,22) к 2035 г. может достичь уровня 1,5. Заметим также, что MPC-продукты не вечны: в целом 40% продаж приходится на новые системы, 60% — на модернизируемые.

На мировом рынке MPC царит жесткая конкуренция, и тон задают ключевые игроки, такие как Aspen Technology, Honeywell International Inc.⁴, ABB Ltd., Yokogawa Electric Corporation, Emerson Electric Corporation, Siemens AG, General Electric SE, Rockwell Automation Inc. и Schneider Electric SE. Новые игроки (преимущественно китайские — SUPCON Technology Co., Ltd., Hollysys Automation Technology, Ltd. и др.) пока уступают лидерам по объему бизнеса и широте продуктового портфеля. Появление новых игроков на обозримом временном горизонте умеренно или низко вероятно, как низко вероятно и возникновение новых продуктов, угрожающих нынешней роли MPC-технологий.

К ограничениям роста следует отнести недостаток средств базового регулирования и устаревающую инфраструктуру систем управления, что удорожает и замедляет процесс внедрения MPC-систем; достаточно дорогой вход в MPC-проекты для небольших производителей; острый недостаток у заказчиков специалистов по различным аспектам MPC; «культурное» сопротивление потенциальных пользователей (опасения потерять рабочее место, нежелание вкладываться в приобретение новых навыков, пр.); несовершенство процесса передачи установленных систем местным структурам поддержки, чреватое угрозой для непрерывности производства.

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ APC

Функциональность MPC-продуктов исторически определялась развитием их технических компонент. Так, за последние десятилетия возросшие возможности компьютеров значительно повысили вычислительную мощность MPC-алгоритмов; это позволило за счет параллельных вычислений, суррогатного моделирования и эффективных численных методов решать сложные задачи оптимизации в режиме реального времени. Развитие облачных вычислений радикально упростило хранение и обработку данных из различных источников и сделало возможным централизованный мониторинг и управление несколькими процессами и сразу на нескольких технологических площадках, что актуально для географически распределенных предприятий. Разработка удобных пользовательских интерфейсов и передовых инструментов визуализации облегчила более широкое

внедрение MPC-технологий, поскольку позволила операторам легко понимать сложные стратегии управления и принимать обоснованные решения на основе данных в режиме реального времени.

Остановимся на нескольких главных текущих трендах развития MPC, которые в ближайшей временной перспективе могут превратить эти системы в ключевой инструмент современной промышленной автоматизации [32].

Интеграция с другими системами автоматизации

На рис. 2 представлено окружение современных MPC-систем. В овалах показаны смежные системы автоматизации и их связи с MPC (двусторонние влияния и информационный обмен). Пунктиром отмечены промежуточные системы, через которые при необходимости осуществляются указанные связи. Показаны только прямые связи компонентов окружения с MPC, что не означает отсутствия связей между компонентами. В прямоугольниках представлены инструменты, которые могут использоваться при разработке и/или сопровождении MPC.

MPC и PCU

Традиционная архитектура MPC позиционировалась как надстройка над распределенной системой управления, получающая данные от контрольно-измерительных приборов и возвращающая уставки на управляемые переменные и задания на исполнительные механизмы в систему базового регулирования ТП.

Основные PCU-вендоры, включая ABB, Honeywell, Rockwell, Schneider Electric, Siemens, Yokogawa, в 2024–2025 гг. обновили или выпустили новые релизы своих продуктов, облегчающие взаимодействие с MPC-приложениями (например, путем включения специальных рабочих станций MPC). Компания Emerson, следуя своей стратегии построения встроенных (*embedded*) APC добавила в PCU DeltaV модули, усиливающие инструменты повышения операционной эффективности и оптимизации ТП [32].

MPC и интеллектуальные АСУТП

Последний термин применяется в русскоязычном профессиональном сообществе [33] для систем, обозначаемых в зарубежных публикациях как не-MPC компоненты APC-систем (инференциальное управление, процедурная автоматизация, управление последовательностями, пр.).

Наиболее частым образцом взаимодействия с интеллектуальными АСУТП является совместная работа MPC и системы процедурной автоматизации (ПА), отвечающей за автоматический перевод технологической установки в другой рабочий режим, например, при пере-



Рис. 2. Окружение MPC-систем

ходе на выпуск продукта другой марки. В этом случае MPC выполняет управление работой технологической установки в стабильном режиме, а в момент перехода должна отключаться и передавать управление системе ПА, вновь забирая контроль после завершения процесса переключения и нормализации работы.

Эффективная работа такой связки невозможна без интеграции этих двух систем для синхронизации «первенства» управления. Интеграция чаще всего выполняется через PCU, к которой подключены обе системы, что требует дополнительных инженеринговых работ и может быть затруднительной из-за нежелания заказчика вмешиваться в работающую PCU. Применение ПО от одного разработчика систем MPC и ПА, обладающих стандартным механизмом интеграции для совместной работы, является существенным преимуществом при построении комплексных систем усовершенствованного управления технологической установкой.

MPC и системы производственного планирования

Разрыв «стратегической» оптимизации (оптимизационное производственное планирование в масштабе предприятия и даже компании) и «тактической» оптимизации отдельной технологической установки (MPC-система) ощущался разработчиками и пользователями систем промышленной автоматизации достаточно давно. За это время появились и были опробованы два основных подхода. Исторически первым было направление оптимизации в реальном времени (*Real-time Optimization, RTO*), решающее эту проблему путем моделирования текущего состояния ТП (на основе статической и, как правило, нелинейной, модели процесса) и его оптимизации с учетом экономической целесообразности и технологических ограничений. Результаты RTO-оптимизации передаются в MPC-систему, реализующую найденный режим за счет прогнозирования поведения объекта [34, 35]. Другой подход — так называемая «сквозная» оптимизация, когда оптимизационный план работы предприятия детализируется до уровня календарного плана

или производственного расписания и передается в мастер-контроллер MPC, откуда каскадируется на MPC-контроллеры нижнего уровня, обеспечивающие максимально достижимое исполнение плана [36, 37]. Как и в случае связки систем MPC и интеллектуальных АСУТП, рассмотренной выше, вопрос взаимодействия MPC и RTO является очень важным, поэтому наиболее эффективными видится применение систем одного вендора, имеющего методологически, архитектурно и технически проработанный механизм, обеспечивающий согласованную работу модулей.

Отметим роль систем высокоточного моделирования ТП как для построения моделей ТП в RTO-подходе, так и для уточнения моделей в оптимизационном производственном планировании.

MPC и системы смешения

Системы автоматического управления смешением нефтепродуктов принято выделять в отдельный класс задач, где существует два типа подсистем: система управления смешением (СУС) и on-line оптимизация качества смеси (слово «on-line» используется для того, чтобы отличить эти системы от систем off-line оптимизации, применяемых для оперативного планирования смешения до начала приготовления партии) [38].

СУС отвечает за то, чтобы максимально точно реализовать заданный рецепт смеси на имеющемся оборудовании без какого-либо учета качества продукции. On-line оптимизация, в свою очередь, отвечает за подстройку рецепта смешения в процессе приготовления, гарантируя качество смеси и обеспечивая максимальный экономический эффект.

В случае использования систем MPC и виртуальных анализаторов (ВА) на технологических установках, выходящие потоки которых направляются на смешение, результаты расчетов MPC/ВА являются источниками данных о качестве этих компонентов для систем on-line оптимизации. Кроме того, системы MPC технологических установок и система on-line оптимизации смешения могут включаться в контур управления системы сквозной оптимизации, рассматривающей комплексную задачу оптимизации производства и формирующей целевые задания для этих систем с учётом их ограничений [36].

Автоматизированное смешение нефтепродуктов (рис. 2) можно рассматривать и как самостоятельную MPC-задачу, и как задачу управления последовательностями в рамках APC-технологии, и как часть задачи сквозной оптимизации.

MPC и компьютерные тренажеры

Указанная важная двухсторонняя связь проявляется в двух аспектах.

- Присутствие MPC-системы на реальном рабочем месте оператора ТП определяет необходимость ее включения в полномасштабный компьютерный тренажер. Хотя на практике допускаются определенные упрощения в воспроизведении функциональности и эффектов многопараметрического управления, она должна быть достаточной для того, чтоб оператор мог ознакомиться и обучиться

работе с MPC-системой, глубже понять принципы ее функционирования и уметь использовать ее преимущества. Тренажер позволяет предоставить оператору реалистичные сценарии для повышения его уверенности в использовании MPC-приложения (вплоть до включения/выключения отдельных MPC-модулей) и обеспечения возможности мониторинга основных эффектов системы. В качестве примера позитивного влияния тренинга с включением MPC-системы на интенсивность ее использования в реальной работе операторов укажем на работу [39].

- Точные динамические модели ТП могут использоваться при построении и инжиниринге моделей MPC-контроллеров и виртуальных анализаторов (эта связь также отражена на рис. 2). Тренажерная среда обеспечивает также средство совершенствования операторского MPC-интерфейса в РСУ, что экономит время и ресурсы, поскольку позволяет вносить изменения в РСУ и тестировать другие части системы управления задолго до их ввода в эксплуатацию.

Разработка индивидуальных решений и отраслевые альянсы

APC-системы все чаще адаптируются к конкретным отраслям и приложениям. Поставщики разрабатывают отраслевые APC-платформы, учитывающие уникальные характеристики процессов, нормативные требования и операционные цели. Этому способствует сотрудничество APC-вендоров с отраслевыми лидерами и производителями инновационных компонентов APC-технологий.

В последние годы можно отметить обновление рамочного соглашения между компаниями Yokogawa и Shell по разработке APC-систем для технологических площадок Shell по всему миру; приобретение корпорацией Emerson компании Fluxa, поставщика оптимизационных решений для перерабатывающих отраслей; партнерство ABB и Tata Consultancy Services для внедрения APC-систем; стратегический альянс Aspen Technology и Microsoft для интеграции Aspen-APC с ИИ-технологиями Microsoft Azure [32].

Фокус на экологичность, энергоэффективность и устойчивость производства

Появление ESG-повестки (Environmental, Social, Governance) как условия достижения устойчивости производства сделало MPC особенно привлекательным инструментом для пользователей. Прежде всего, это касается защиты окружающей среды (снижение выбросов и сокращение отходов), энергосбережения, соблюдения других нормативных требований. Достижение этих целей крайне важно при принятии решений о потенциальных инвестициях в производство, особенно в Европейском регионе, где это закреплено нормативно. Наиболее заметно в этой связи анонсирование компанией Schneider Electric нового решения EcoStruxure™, нацеленного на достижение промышленными предприятиями целей устойчивого развития с помощью MPC-технологий [32], в том числе на основе оптимизации энергопотребления и виртуальных анализаторов состава выбросов [40].

MPC и искусственный интеллект/машинное обучение

Как и повсюду, это, возможно, наиболее острый тренд, потенциально обеспечивающий APC-системам более

⁵ <https://www.adnoc.ae/en/news-and-media/press-releases/2023/adnoc-deploys-aiqs-world-first-robowell-ai-solution-in-offshore-operations>

глубокий анализ данных и более точное прогнозирование будущего поведения объекта. В контексте MPC это касается, прежде всего, построения самообучаемых контроллеров и виртуальных анализаторов по большим историческим данным, где ИИ обеспечивает отсортровку плохих данных, выявление наиболее связанных MV и CV, идентификацию моделей и их адаптацию при изменении условий работы процесса. В последнее время появились первые практические примеры, подтверждающие эти ожидания. В 2023 г. компании AIQ и Halliburton запустили MPC-решение с поддержкой ИИ для газлифтных скважин на месторождении Национальной нефтяной компании Абу-Даби (ADNOC)⁵. Система работает в автономном режиме, самонастраивается в меняющихся условиях эксплуатации, максимизирует добычу, обеспечивает соблюдение параметров безопасности и снижает риск простоев скважины. В 2024 г. компания ABB Ltd. внедрила на крупнейшем в Японии цементном заводе Tokuyama Nanuo систему ABB Ability Expert Optimizer, позволившую снизить энергопотребление цементной печи примерно на 3% при сохранении качества продукции. Система основана на прогнозирующем управлении с помощью линейных и нелинейных моделей объекта, нечеткой логики и искусственных нейронных сетей⁶.

Особую роль ИИ может сыграть в построении виртуальных анализаторов качества, без которых уже невозможно представить MPC-решения во многих перерабатывающих отраслях [4]. Традиционно ВА строились как регрессионные модели, прогнозирующие показатели качества по измеряемым значениям косвенных переменных ТП. Но при этом возникали проблемы с качеством обучающей выборки, часто принадлежащей сравнительно узкому диапазону эксплуатации ТП, из-за чего влияние отдельных факторов трудно отличить от шума [41]. В последние годы предпринимаются активные попытки использовать для построения ВА искусственные нейронные сети, в том числе в процессах химико-технологического типа [40, 42]. Разумеется, они не могут преодолеть недостаточную информационную насыщенность имеющихся данных, но могут обнаружить скрытые зависимости в данных, позволяющие построить ВА в случаях, где это не получается традиционными регрессионными методами. Здесь может помочь гибридное моделирование (с использованием фундаментальных зависимостей и машинного обучения) за счет формирования (генерирования) исходных данных и использования упрощенных нелинейных моделей показателей качества с подбором их коэффициентов на основе статистических/оптимизационных методов [41].

В целом, в отличие от других отраслей (нефтедобыча, металлургия, получение цемента) в химико-технологических процессах не хватает больших незашумлен-

ных данных, необходимых для построения методами машинного обучения надежных зависимостей между переменными сильносвязного динамического объекта [41]. В этой связи всеобщий оптимизм по поводу перспектив ИИ в случае этих процессов может не оправдаться. Можно предположить, однако, что благодаря высокому исследовательскому интересу к указанной теме, ситуация прояснится в ближайшие годы.

Несмотря на мощь современных MPC-систем, они все еще остаются «черными» ящиками, не раскрывающими логику своих действий и заранее не предупреждающими о них операторов. Это может затруднять использование систем, если операторы не так опытны, времени на принятие решений не так много, а ситуация на объекте критическая. Новый ИИ-тренд связан с предоставлением операторам объяснений работы MPC и рекомендаций по взаимодействию с ним. Это способствовало бы сохранению и повышению доверия операторов к MPC, необходимого для эффективной и безопасной работы пары «Оператор-MPC». Указанный тренд, осознаваемый пользователями и разработчиками [43], находится на начальной стадии реализации MPC-вендорами⁷. Такой подход укладывается в русло исследований по повышению доверия к интеллектуальной технике в ситуациях высокого потенциального риска и в перспективе может привести к появлению диалога «Оператор-MPC» (например, на основе языковых моделей), обеспечивающего их взаимную адаптацию [44].

СОВЕТСКАЯ И РОССИЙСКАЯ ИСТОРИЯ MPC

Отечественные проекты (до появления мировых платформ)

В Советском Союзе предложенный проф. Перельманом алгоритм динамической оптимизации был опробован на практике уже в середине 1970-х гг. в управлении обжигом клинкера во вращающихся цементных печах [45]. Объект описывался динамической линейной зависимостью температуры в зоне спекания от подачи топлива на горелку, а критерий учитывал как квадрат отклонения температуры в обе стороны от заданной «слепой» зоны, так и цену управления, линейно-пропорциональную расходу газа [46]. В системе использовались только отечественные компоненты (промышленная ЭВМ ПС-300⁸, микропроцессорные малоканальные контроллеры Ремиконт Р-130, алгоритм численной оптимизации типа градиентного спуска и пр.). Алгоритм успешно проработал до середины 80-х гг., был перенесен на другие печи Себряковского цементного завода, а затем на Новороссийский цементный завод. В пилотном испытании системы было достигнуто четырехкратное увеличение лабораторных проб клинкера, соответствующих наиболее премиальной марке цемента Портланд 500,

⁶ https://library.e.abb.com/public/6422a72fe47e41b3af57933eae5e6c50/ABB_Brochure_EO%20for%20cement_190820_a_RU_highRes.pdf?x-sign=uoilKh8iP8alCrJkvVRsOsMVE04T7eTYrOxXBDK4AGpXGFxOzD5XY1sTE9c6gts

⁷ <https://www.aspentech.com/en/products/msc/aspens-va-for-dmc3>

⁸ https://www.ipu.ru/sites/default/files/page_file/ivanov1.pdf

при экономии топливного газа на 1,5% [47]. Это дало заводу дополнительную годовую прибыль в 135 тыс. руб./г.⁹

К середине 80-х гг. алгоритм был доработан для управления отдельными процессами металлургии [48] и нефтехимии¹⁰. Последнее внедрение на Нижнекамском НХК было наиболее успешным, но все же в сложившихся реалиях позднего СССР и перехода к новому экономическому укладу у российского МРС-проекта не было перспектив. Важно не забывать причины такого результата.

- Несовершенство вычислительной техники: использование математической модели в контуре управления в режиме реального времени требовало объема вычислений, превышавшего ресурсы тогдашних промышленных ЭВМ и ПЛК.

- Недоверие операторов к непонятной для них «слишком умной» технологии, якобы, грозящей сменить их «у руля» (при том, что тогда такую возможность ни создатели МРС-систем, ни руководство предприятий всерьез не рассматривали).

- Традиционное для плано-директивной экономики отсутствие живого интереса со стороны производства к практическому применению идей академической науки даже в тех редких случаях, когда академические идеи сулили очевидную прибыль (эта традиция оказалась, к сожалению, долговечнее самой плановой экономики).

- Непонимание самими разработчиками принципов разработки, сопровождения и развития коммерческого продукта, без чего самостоятельно выжить МРС-системы не могли.

Через несколько лет после запуска все советские промышленные внедрения сошли со сцены; а переход к рынку, казалось, поставил точку на российской истории МРС.

В составе мировых вендоров: российская команда Honeywell

С начала 2000-х гг. в РФ пришли мировые APC-вендоры (Honeywell, AspenTech, Yokogawa, Emerson). Специалисты по высокотехнологичной промышленной автоматизации из ИПУ РАН, после распада СССР разрабатывавшие и внедрявшие свои решения в составе компании Петроком, перешли в российское подразделение корпорации Honeywell и включились в реализацию первых российских проектов на базе продукта Honeywell Forge Controller (изначально – Profit Controller) для систем класса СУУТП и Honeywell Profit Optimizer для систем класса RTO [49, 50].

За период с 2004 по 2022 гг. было осуществлено порядка 100 проектов на промышленных предприятиях РФ и стран СНГ, из них 85% – на объектах нефте- и газопереработки, 7% – на объектах нефтехимии и производства полимеров, по 4% – на производствах минеральных удобрений и в горнорудной промышленности. Размерность создаваемых систем достигала серьезных масштабов. Для примера, в ходе реализации одного из проектов на производстве пиролиза реализованная система включала

25 МРС-блоков (многопараметрических контроллеров) для всех основных секций производства. Также было реализовано несколько проектов по созданию систем групповой динамической оптимизации для различных объектов нефте- и газопереработки, на которых уже были внедрены СУУТП.

Большинство проектов выполнялось «под ключ» с осуществлением полного цикла проектных работ – от предпроектных обследований и тестирования объекта до конфигурирования и пуско-наладочных работ, включая работы по поставке, монтажу и подключению аппаратного обеспечения СУУТП. Компания предоставляла услуги по интеграционному конфигурированию РСУ при внедрении СУУТП не только для РСУ Honeywell EPKS, но и для РСУ других производителей, привлекая к работам соответствующих субподрядчиков. После завершения проектов АО «Хоневелл» обеспечивало техническую поддержку созданных систем как в гарантийный период, так и в ходе отдельных работ по техническому обслуживанию и модернизации систем.

После ужесточения требований по информационной безопасности (ИБ) к проектам СУУТП в 2010-х гг., инженерная команда АО «Хоневелл» адаптировала конфигурацию разрабатываемых систем к новым условиям и включила в перечень своих услуг разработку проектов по ИБ и поставку аппаратных средств защиты.

Отдавая должное техническому уровню программных продуктов корпорации Honeywell, необходимо отметить вклад инженерной команды специалистов АО «Хоневелл», обеспечивших такие серьезные результаты. Первоначально базирясь на знаниях и навыках специалистов компании Петроком (перешедших в АО «Хоневелл» в 2005 г.), российская команда за годы участия в десятках проектов наработала серьезный практический опыт их реализации и кадрово укрепились. Также существенную роль сыграл настрой менеджмента АО «Хоневелл» осуществлять проекты за счет собственных инженерных ресурсов с минимальным привлечением сторонних подрядчиков.

СУУТП-рынок в эти годы на территории РФ и СНГ активно развивался, что в итоге привело к довольно жесткой конкуренции между основными мировыми компаниями-вендорами. В ходе тендерной борьбы цена предложения зачастую падала к уровню себестоимости, что заставляло вендоров оптимизировать свои подходы к реализации проектов. Объем проектов, реализованных командой АО «Хоневелл» в таких условиях, очевидно свидетельствует о том, что команда стала лидером на российском рынке, наработала и использовала лучшие инженерные практики, снижающие проектные затраты без ухудшения качества проведенных работ.

Но в 2022 г. российская СУУТП-история сделала еще один крутой поворот: вместе с другими вендорами корпорация Honeywell покинула российский рынок,

⁹ С учетом инфляции сейчас это сумма может быть эквивалента примерно 50 млн. руб.

¹⁰ Миронов В.А., Золотухин В.Я. Перельман И.И., Дозорцев В.М. и др. Способ управления процессом полимеризации простых полиэфиров. Патент РФ 2046809. Дата заявки: 10.04.1992.

приостановив новые проекты и оставив пользователям серьезную инсталлированную базу без сопровождения и технической поддержки.

Новые российские решения: преимущества, опыт внедрения

Первые отечественные СУУТП начали появляться на рынке еще в начале 2020-х гг. Ситуация радикально изменилась в 2022 г., когда многие команды активно приступили к самостоятельной разработке средств MPC и RTO (по состоянию на конец 2025 г. в реестре Министерства цифрового развития зарегистрировано около 10 отечественных продуктов класса СУУТП, информацию о которых легко найти в поисковых системах). Однако количественный рост не всегда сопровождается зрелостью решений: часть этих систем пока находится на этапах прототипирования или ограниченного пилотного применения и не может быть охарактеризована как полностью зрелая промышленная продукция.

С одной стороны, столь быстрый рост демонстрирует наличие у российских разработчиков компетенций, достаточных для создания высокотехнологичных систем управления и оптимизации. С другой, очевидно, что не все новые продукты пройдут проверку временем: скорее всего, рынок консолидируется вокруг трех-четырех наиболее устойчивых и технологически развитых вендоров, обладающих необходимыми техническими, организационными и ресурсными возможностями для поддержания и развития продукта.

Причины описанного «бурного расцвета» во многом связаны со снижением порога вхождения на российский рынок в нынешних условиях. Во-первых, доступна обширная литература, охватывающая теоретические и практические аспекты применения методов MPC, что существенно упрощает разработку алгоритмической части новых систем. Во-вторых, доступны современные инструменты разработки: кроссплатформенные среды исполнения, универсальные фреймворки построения пользовательских интерфейсов, промышленные СУБД и развитые математические библиотеки. В совокупности эти средства, доступные в открытых лицензиях, позволяют существенно сократить затраты на построение целевых программных комплексов. В-третьих, опыт российских специалистов в работе с лучшими зарубежными промышленными системами обеспечил необходимый уровень компетенций и послужил «компасом» при разработке отечественных решений, направляя выбор архитектурных и прикладных подходов и сокращая длительные экспериментальные циклы. Указанные факторы объясняют многократное сокращение трудоемкости создания продуктов в современных условиях по сравнению с первыми поколениями APC-систем, разрабатывавшимися в 70–90-е гг.

СУУТП-решение компании «Центр цифровых технологий»

Показателен в этой связи опыт российской компании «Центр цифровых технологий» (ЦЦТ), в состав которой в 2022 г. после ухода из страны корпорации Honeywell вошла часть ее российского СУУТП-подразделения, ориентированная на разработку собственного решения.

Была принята стратегия разработки единой платформы систем управления RTE (Real-Time Environment), объединяющей несколько классов высокотехнологичных решений реального времени: системы смешения (РТ-Микс), процедурной автоматизации (РТ-СмартКонтроль) и усовершенствованного управления (РТ-Оптимус)¹¹. Такой подход обеспечивает единство архитектуры, сокращает стоимость владения и позволяет эффективно внедрять комплексные сценарии автоматизации на промышленных предприятиях. При разработке платформы особое внимание уделено требованиям кроссплатформенности и санкционной независимости всех компонентов, что является критически важным в современных условиях.

Отмеченное выше разделение рыночных проектов (40% — новые, 60% — модернизируемые) в России становится еще более ярким. Оставленная западными производителями установленная база устаревает гораздо быстрее, лишенная вендорной поддержки и сопровождения. Совместимость РТ-Оптимус с APC производства Honeywell облегчает, удешевляет и ускоряет переход заказчиков на отечественное решение.

РТ-Оптимус включает в себя среду off-line моделирования, набор функциональных блоков для исполнения в среде RTE (виртуальные анализаторы, многопараметрические контроллеры, блок пользовательских вычислений и др.), операторский интерфейс и интерфейс визуализации исторических данных. Среда off-line моделирования обеспечивает конфигурирование модельных матриц контроллеров СУУТП, симуляцию их работы без подключения к реальному процессу, а также задание настроечных параметров с последующим экспортом конфигурации в RTE. Поддержка импорта моделей контроллеров и виртуальных анализаторов из Honeywell Profit Suite позволяет существенно снизить трудозатраты при модернизации существующих систем автоматизации.

В РТ-Оптимус реализованы алгоритмы прогнозирующего управления, использующие динамическую модель управляемого объекта и обеспечивающие возможность управления технологическими объектами различной сложности — от отдельных аппаратов до блоков и установок. При наличии достаточного числа степеней свободы система автоматически выбирает и поддерживает режим работы, оптимальный по заданному инженером критерию.

Функциональный блок виртуального анализатора на сегодняшний день поддерживает работу с линейными регрессионными моделями, которые лучшим образом зарекомендовали себя в реальных условиях эксплуатации. Блок поддерживает как ручную, так и автоматическую подстройку по данным лабораторного контроля или по информации от поточных анализаторов, что существенно повышает точность прогнозирования. Широкий набор параметров, включая скорость подстройки, критерии валидации поступающих данных и другие параметры, предоставляет инженеру тонкий контроль над процессом подстройки.

¹¹ Все три этих компонента рассматриваются в современной литературе как составляющие широкого APC-решения.

Операторский интерфейс СУУТП, реализованный на базе Web-технологий, не требует дополнительных затрат на конфигурирование и не потребляет ресурсы РСУ. Он становится доступен сразу после создания контроллера в среде RTE, автоматически подгружая списки контроллеров, виртуальных анализаторов и их переменных. Дополнительным компонентом является кроссплатформенная утилита просмотра исторических данных, собираемых приложениями RTE, обеспечивающая удобный доступ к архивной информации для анализа и диагностики.

Учитывая специфику российских рынков и потребности промышленных заказчиков, ЦЦТ предлагает бессрочное лицензирование и гибкую ценовую политику, адаптированную к различным масштабам предприятий, что снижает барьеры внедрения и повышает доступность современных решений в области промышленной автоматизации.

Начиная с 2024 г. СУУТП на базе RT-Оптимус активно внедряются для различных промышленных производств. На начало 2026 г. успешно завершены три проекта на нефтегазоперерабатывающих предприятиях и несколько проектов находятся в стадии реализации.

ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

За 15 лет пребывания западных APC-вендоров в России их общими усилиями выполнено более 200 промышленных внедрений (больше половины из них реализовано российским подразделением корпорации Honeywell). Даже если в «работе» половина российских систем (а это средняя по миру доля), их надо профессионально поддерживать. Без этого инсталлированные системы быстро потускнеют: по мере накапливающихся изменений в технологии и РСУ потребуются все более глубокая модернизация моделей; реальная эффективность и коэффициент использования систем будут снижаться.

Версии операционных систем (ОС) серверов и станций СУУТП устарели, их использование представляет угрозу безопасности ИТ-инфраструктуры, поскольку эти ОС лишены многих исправлений уязвимостей и защитных патчей и становятся легкой мишенью для кибератак. Кроме того, эти ОС несовместимы со многими современными средствами кибербезопасности: антивирусы, системы обнаружения и предотвращения вторжений, EDR-платформы и даже современные протоколы шифрования либо не поддерживаются, либо работают с ограниченной функциональностью. В условиях, когда уязвимости в таких системах становятся публично известными, а патчи не выпускаются, риск компрометации всей сети многократно возрастает — особенно если эти системы взаимодействуют с другими сегментами инфраструктуры.

По сути, для сохранения СУУТП как высокоприбыльного направления автоматизации нет альтернативы разработке отечественных решений.

Сейчас сразу несколько российских команд вовлечены в этот процесс — некоторые начали еще до ухода мировых производителей, другие — «осколки» мировых

вендоров. Исходя из опыта авторов, к ключевым условиям успешного импортозамещения можно отнести следующие.

Требуется комплексное понимание предметной области (теория автоматического управления, теория оптимального управления, процессы и аппараты химической технологии, высокоточное моделирование ТП, РСУ, пр.). В СУУТП много тонкостей, которые долго и трудно достичь «с нуля»; очень полезен разнообразный и глубокий опыт разработки, внедрения и сопровождения систем, желателен в компаниях-производителях.

Нет смысла повторять чужое МРС-решение, оно долго не проживет. Необходим реалистичный, но в то же время амбициозный план развития продукта — это укрепит команду и впечатлит заказчика. В идеале нужно достичь практически бесшовной миграции с западного на российское решение.

В перспективе небольшое число (два - три) серьезных конкурентов всегда хорошо для рынка, и работы должно хватить всем. Но разработать свою систему в сжатое время — крайне непростое дело. СУУТП-команда ЦЦТ обладает давней историей и богатой экспертизой. Ее специалисты участвовали в первых российских МРС-проектах Института проблем управления АН СССР (1970–80-е гг.); в СП «Петроком» (1990–2000 гг.) разрабатывали и внедряли смежные системы промышленной автоматизации (компьютерные тренажеры, высокоточное моделирование ТП, элементы процедурной автоматизации, др.); в русле APC-направления корпорации Honeywell (2005–2022 гг.) реализовали первые российские СУУТП, выполнив порядка 100 проектов на предприятиях нефтепереработки, нефтехимии, химии и металлургии; наконец, в составе ЦЦТ (с 2016 до 2022 г. — МФТИ, затем — группа Рубитех) в сжатые сроки создала и вывела на рынок отечественное СУУТП-решение RT-Оптимус, глубоко интегрированное с собственной широкой линейкой высокотехнологичных систем автоматизации. Опираясь на зародившуюся в 70-х гг. экспертизу в разработке МРС-технологии, опыт коммерческой реализации проектов и системной поддержки пользователей, ЦЦТ реализует комплексный подход к построению СУУТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы APC прошли долгий и впечатляющий путь — от первых теоретических размышлений о математических алгоритмах до реализации и внедрения сложных коммерческих решений. Подходы к построению APC-систем практически одновременно зародились как в западных, так и в советских научных кругах, однако с наступлением глобальной интеграции экономик и технологий западные компании, обладая более развитой инфраструктурой, инвестиционным капиталом и маркетинговой мощью, быстро заняли подготовленную, но уже опустевшую российскую нишу, а их решения стали эталоном эффективности. Но с этим успехом пришел и новый уровень

зависимости — от поставщиков, лицензий, сервисных поддержек и технологических патентов. Решения, созданные на западе, не просто были внедрены, они были интегрированы в производственные цепочки. С изменением политической ситуации и вводом санкций, эта зависимость стала болезненной реальностью — прекратились как поставки новых версий ПО, так и поддержка внедренных решений.

Последняя проблема, вне зависимости от санкционных ограничений и географии, является ключевым ограничителем эффективности СУУТП. Импортозамещение в этой сфере — это не просто попытка заменить устаревающие решения на отечественные аналоги. Это вызов, который представляет отечественной промышленности и разработчикам уникальную возможность пересмотреть подход к автоматизации: выстроить долгосрочное взаимодействие, обеспечить мониторинг, поддержку и развитие системы совместно с отечественным вендором. Для успешного внедрения новой или модернизируемой СУУТП необходимо, чтобы исполнитель обладал комплексным пониманием предметной области, значительным опытом в разработке, внедрении и сопровождении систем, включая работу в компаниях-производителях и четкий план развития продукта.

Внедрение СУУТП — это не разовый проект, а начало долгой жизни системы оптимизации. Успех зависит от синергии разработчиков и пользователей. Вендоры должны ориентироваться на перспективу, а не повторять устаревшие решения, а заказчики — воспринимать российские технологии не как дешевую замену утраченных мировых решений, а как стратегический инструмент оптимизации производства.

Необходима продуманная политика сопровождения, последовательного замещения и дальнейшего развития систем на предприятии, включая укрепление собственных команд эксплуатации. Только системный подход к обеспечению операционной эффективности, где ключевую роль играет СУУТП, позволит не только сохранить, но и усилить конкурентоспособность отечественной промышленности. Системы принесут реальную пользу лишь при условии активного участия заказчика, гибкого подхода и долгосрочного партнерства с вендором.

Авторы настоящей работы среди безусловных оптимистов относительно возможности решения этой важнейшей задачи.

Список литературы

1. Model Predictive Control: The Genesis of an Idea // IEEE Control Systems. 2025. Vol. 45 (4). Pp. 86–88.
2. Skogestad S., Adams T.A., II. Origins of Dynamics Matrix Control: The Yearly Writings of Charles R. Cutler. PSE Press: Hamilton, 2025.
3. Smith C. L. Advanced process control. Beyond Single-Loop Control. — John Wiley & Sons, 2010. 450p.
4. Бахтадзе Н.Н. Виртуальные анализаторы (идентификационный подход) // Автоматика и телемеханика. 2004. № 11. С. 3–24.
5. Zheng Fan, Hong Zhao, Anjin Wu, Ke Che. Design of Sequential Control System for Continuous Chemical Reaction Process Based on PCS7 / Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Information Processing (ICIIP '19), 2020. Pp. 298 – 302.
6. Richalet J., Rault A., Testud J.L., Papon J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes // Automatica, 1978, 14, 413–428.
7. Cutler C.R., Ramaker B.L. Dynamic matrix control—A computer control algorithm // In Proc. Joint Autom. Control Conf., San Francisco, CA, USA, 1980.
8. Richalet J., Rault A., Testud J.L., Papon J. Algorithmic control of industrial processes. / In Proceedings of the 4th IFAC symposium on identification and system parameter estimation. 1976, p. 1119–1167.
9. Перельман И.И. Идентификация моделей для прогнозирования выходной реакции объекта // Тр. IV Симпозиума ИФАК по идентификации и оценке параметров систем. Тбилиси, 1976. Т. 3. С. 112–121.
10. Перельман И.И. Динамическая оптимизация в АСУ ТП на базе алгоритмов условного прогнозирования // Автоматика и телемеханика. 1978. № 9. С. 146–160.
11. Kalman R. E. Contributions to the theory of optimal control // Bol. Soc. Mat. Mexicana. 1960. Vol.5. No.1 Pp. 102–120.
12. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов // Автоматика и телемеханика, 1960. Т.1. № 4. С. 436–441; № 5. С. 561–568; № 6. С. 661–665. 1961. Т.22, № 4. С. 425–435. 1962. Т. 23. № 11. С. 1405–1413.
13. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. No.1 Pp. 35–45.
14. Проний А.И. Применение методов линейного программирования для синтеза импульсных автоматических систем // Автоматика и телемеханика. 1963. 24:7. С. 912–920.
15. Kishi F.H. On line computer control techniques and their application to re-entry aerospace vehicle control / In Advances in Control Systems, С. Т. Leondes, Ed., Elsevier, 1964, vol.1, pp. 245–357.
16. Роусон Х. Неписанные законы жизни. — М.: Изд-во ЭКСМО-Пресс, 2002. — 384 с.
17. Osler W. (1950). Aphorisms from His Bedside Teachings and Writings (W. B. Bean, Ed.). Charles C. Thomas. # 221. p. 129.
18. Deley G.W. Optimal Bounded Control of Linear Sample-Data System Using Quadratic Performance Criteria // NASA Publication, 1963. — SUDAER-148.
19. Антонов В.Г., Шепелявый А.И. Оптимальное управление на конечном интервале времени для дискретных систем в задаче минимизации неоднородного квадратического функционала // Автоматика и телемеханика. 1973. № 4. С.43–50.11.
20. Martin D.H., Jacobson D.H. Optimal Control Lows for a Class of Constrained Linear-Quadratic problems // Automatica. 1979. Vol. 15. N 4. Pp. 431–440.
21. Дозорцев В.М. Об устойчивости управления в задачах численной оптимизации технологических процессов по экономическим критериям // Численные методы в задачах оптимального экономического планирования, вып.1. М.: ВНИИСИ, 1983. С. 27–35.13.

22. Дозорцев В.М. Оптимальное управление технологическими процессами при неквадратических критериях качества / В сб. «Теоретические и прикладные задачи оптимизации». М.: Издательство "Наука", 1985. С. 89-94.
23. Makila P.M. et al. Constrained LQG Control with Process Applications // Automatica. 1984.Vol. 20. N 1. Pp. 15-29.
24. Ziebolts H., Paynter N.M. Possibilities of Two-Time Scale Computing Systems for Control and Simulation of Dynamic Systems // Proc. NEC. 1953. Vol.9. Pp. 215-223.
25. Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology // Control Engineering Practice, 2003. Vol. 11. Pp. 733–764.
26. Lukec I. Advanced process control: a history overview. How APC has been developing over the last decades. URL: <https://test.simulatelive.com>
27. Cutler C., Morshedi A., Haydel J. An industrial perspective on advanced control. / In AICHE annual meeting, Washington, DC. 1983.
28. Prett D.M., Gillette R.D. Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit / In: Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
29. Garcia C.E., Morshedi A. Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC) // Chemical Engineering Communications. 1986. Vol. 46(1-3). Pp. 73-87.
30. Grosdidier P. et al. The IDCOM-M controller / In T. J. McAvoy et al. (Eds.) / Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model-based process control. Oxford: Pergamon Press, 1988. Pp. 31–36.
31. Marquis P., Broustail J.P. SMOС, a bridge between state space and model predictive controllers: Application to the automation of a hydrotreating unit / In T. J. McAvoy et al. (Eds.), Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model-based process control (pp. 37–43). Oxford: Pergamon Press, 1988.
32. Advanced Process Control Market by Size, Growth and Forecast – 2035 / Market Research Future. ID: MRFR/ICT/3378-CR 114. 2023. <https://www.marketresearchfuture.com>
33. Трофимов В.Б., Кулаков С.М. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 12(1). С. 113-113.
34. Trierweiler J.O. Real-Time Optimization of Industrial Processes / In Baillieul J., Samad T. (eds) Encyclopedia of Systems and Control. Springer, London, 2014.
35. Marchetti A.G., Ferramosca A., González A.H. Steady-state target optimization designs for integrating real-time optimization and model predictive control // Journal of Process Control. 2014. Vol. 24. No. 1. Pp. 129-145.
36. Дозорцев В.М., Баулин Е.С., Аносов А.А., Боронин А.Б. Сквозная оптимизация производства: реальная возможность или отдаленная перспектива? // Автоматизация в промышленности. 2022. № 3. С. 3-12.
37. Lu J.Z. Closing the gap between planning and control: A multiscale MPC cascade approach // Annual Reviews in Control. 2015. Vol. 40. Pp. 3-13.
38. Аносов А.А., Ефитов Г.Л., Пузин Д.Г. Автоматизированная система оптимального управления станцией смешения бензинов на НПЗ // Автоматизация в промышленности. №4. 2010
39. Toro R. et al. An Operator Training Simulator System for MMM Comminution and Classification Circuits. 2011.
40. Perera Y.S. et al. The role of artificial intelligence-driven soft sensors in advanced sustainable process industries: A critical review // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 121. 105988.
41. Дозорцев В.М., Аносов А.А., Баулин Е.С. и др. Искусственный интеллект в задачах управления химико-технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. 2024. № 10. С. 3-9.
42. Штакин Д.В., Снегирев О.Ю., Торгашов А.Ю. Метод построения виртуальных анализаторов в условиях малой обучающей выборки для управления качеством целевых продуктов фракционатора установки гидрокрекинга // Автоматизация в промышленности. 2024. № 6. С. 7-12.
43. Trivella F. From black-box to transparent advisor: The next evolution of APC and AI // Asian Downstream Summit, 2026.
44. Дозорцев В.М., Венгер А.Л. Взаимодействие человека-оператора с искусственным интеллектом: проблема доверия // Институт психологии РАН. Организационная психология и психология труда. 2022. Т.7. № 2. 204-232.
45. Dozortsev V.M., Itskovich E.L., Nikoiforov I.V., Perel'man I.I. Computer Control of a Cement Plant // Proc. IFAC/IFIP Symp. Real-Time Digital Control Appl. Guadalajara (Mexico). 1983. Vol. 1. Pp. 205-210.
46. Perel'man I.I. Dozortsev V.M. Quasioptimal Process Control with Production Cost Minimization // Proc. 2nd IFAC/IFORS Symposium Optim. Methods. Varna (Bulgaria), 1979. Pp. 271-278.
47. Перельман И.И., Дозорцев В.М., Шидлович В.С. Новый алгоритм динамической оптимизации обжига // Цемент, 1982, № 8. С. 18-19.
48. Перельман И.И., Усиевич Н.А., Дозорцев В.М. и др. Динамическая оптимизация ТП на примере управления методической печью. – М.: Институт проблем управления АН СССР, 1988. 40 с.
49. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19.
50. Захаркин М.А., Кнеллер Д.В. Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (APC) // Датчики и системы. 2010. № 10. С. 51-57.

Авторы благодарят независимого APC-консультанта С. Альтиулера за ценные замечания по содержанию статьи.

Дозорцев Виктор Михайлович – д-р техн. наук, директор по развитию бизнеса,

Коростелев Александр Яковлевич – канд. техн. наук, ведущий инженер,

Малашкевич Александрович Владимирович – ведущий консультант,

Аносов Андрей Александрович – канд. техн. наук, директор по разработке программного обеспечения,

Агафонов Дмитрий Витальевич – генеральный директор, ООО «Центр цифровых технологий» (группа Рубитех).