

## Методология построения адаптивной системы

### ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ГРУЗОВЫМИ ТЕРМИНАЛАМИ

А.М. Ольшанский (ГОУ ВПО СамГУПО)

*Рассматривается методология создания адаптивной системы оперативного управления железнодорожными грузовыми терминалами – источниками зарождения и погашения грузопотоков. Представлена постановка и решение указанной задачи адаптивного управления с применением математического аппарата теории автоматического управления и нейронных сетей, а также принципиальный алгоритм оперативного управления, представленный в виде последовательно реализуемых блоков, каждый из которых решает одну главную задачу. Предлагаемая автором методология может быть применена для регулирования работы грузовых терминалов, размещенных как на железнодорожных станциях ОАО "РЖД", так и в логистических центрах и станциях, принадлежащих иным собственникам железнодорожной инфраструктуры.*

*Ключевые слова: логистическая система, нейронная сеть, адаптивное управление, железнодорожный терминал, грузовые перевозки.*

В настоящее время эффективному управлению транспортными, складскими и иными логистическими системами уделяется повышенное внимание. Это обусловлено необходимостью снизить величину транспортно-емкости валового национального продукта, иными словами, уменьшить величину транспортной (логистической) составляющей в конечной цене продукции.

Объектом исследования в настоящей работе выступает элементарная железнодорожная грузовая логистическая система, функционирующая в специфической многофакторной внешней рыночной среде. Предметом исследования выступают условия экономически оптимального управления функционированием данной системы. Упомянутые системы встречаются как на железнодорожных станциях общего пользования, которые принадлежат ОАО "РЖД", так и на объектах железнодорожной инфраструктуры, принадлежащей иным собственникам.

Вопросы оптимальной организации работы таких логистических систем возникают постоянно, по мере изменения внешних условий работы железнодорожной станции, линии, транспортного логистического терминала и т.п. Этим вопросам посвящены многие научные труды советских и российских исследователей в области железнодорожного транспорта, таких как А.А. Сметов, В.Г. Галабурда, А.Т. Дерибас, В.В. Повороженко, Е.В. Бережная и др. Основные результаты этих исследований нашли свое отражение в действующих на железнодорожном транспорте нормативных документах и ТП работы конкретных структурных подразделений.

Однако современные рыночные реалии требуют от железнодорожного транспорта достижения комплексной экономической эффективности деятельности в новых условиях, когда на рынке железнодорожных перевозок представлены компании-операторы, обладающие собственным вагонным парком; в условиях законодательно прописанной возможности существования нескольких перевозчиков и владельцев инфраструктуры. Поэтому на железнодорожном транспорте все чаще встречаются задачи построения логистических цепочек с применением экономического критерия оптимальности.

Важными показателями, характеризующими перевозочный процесс в целом, выступает оборот грузового

вагона – время, которое проходит от начала погрузки в вагон и до следующей погрузки в этот же вагон, и среднее время нахождения вагона под грузовыми операциями. В среднем на сети железных дорог около 70% времени оборота вагона приходится на стоянку грузового вагона, из которых около 45% – время на проведение начально-конечных операций. Поэтому оптимизация работы грузовых терминалов (грузовых фронтов), представляется важной задачей, определяющей конкурентоспособность как железнодорожного транспорта, так и эффективность использования объединенного парка вагонов и, в конечном счете, скорость доставки грузов, тем самым минимизируя стоимость замороженного оборотного капитала в пути, а значит, и параметры производственного цикла.

Причем с передачей вагонного парка ОАО "РЖД" иным операторам эта проблема не потеряет актуальности, так как перед владельцем инфраструктуры будет поставлен вопрос об эффективном использовании уже объединенного парка вагонов (единого пула вагонов), грамотном и рациональном продвижении вагонопотоков с учетом интересов как операторов подвижного состава, так и ОАО "РЖД", и государства. А этого в перспективе сделать невозможно без построения комплексной логистической схемы продвижения вагонопотоков, учитывающей рациональную организацию работы на грузовых фронтах прибытия или отправления.

Для владельцев логистических терминалов, работающих с вагонами различной принадлежности, рациональная работа грузовых фронтов повысит экономическую эффективность логистических центров, то есть рассматриваемые в настоящей статье проблемы актуальны и для частного бизнеса.

Работа исследуемой логистической системы на любой железнодорожной станции осуществляется в условиях постоянного изменения входных параметров, которые делятся на функциональные классы: технико-технологические (тип и производительность преобразователя грузопотоков системы, режим работы системы (часов в сутки), наличие/отсутствие входного буфера, время задержки материального потока в системе и т.п.); экономические (доходность с единицы грузопотока в единицу времени, себестоимость переработки грузопотока, рентабельность функционирования и т.п.); рыночные (чис-

ло обслуживаемых клиентов, типы и предпочтения клиентов, величина и характер изменения спроса со стороны клиентов каждого типа).

Эти параметры должны быть учтены; неполный учет перечисленных факторов или его отсутствие приводит к отказам от перевозки грузов, возникшим по вине железной дороги, оттоку грузопотока на иные виды транспорта (что не всегда рационально с точки зрения снижения транспортных издержек в региональном и государственном масштабе), появлению нерациональных перевозок и т.п.

И именно здесь возникает необходимость в разработке универсальной системы адаптивного управления работой грузовых терминалов, которая бы позволила максимально учесть требования как технологии перевозочного процесса, так и изменения в оперативной конъюнктуре рынка, а также изменения, возникающие в процессе функционирования железнодорожной станции как технической системы.

Цель настоящего исследования — разработка математической модели и построение алгоритма адаптивного управления железнодорожной логистической системой, обеспечивающего гибкое реагирование на изменение оперативной рыночной конъюнктуры в районе тяготения, обслуживаемом данной системой.

Цель предопределила постановку и решение следующих задач:

- анализ дерева целей грузового логистического терминала как логистической системы;
- построение модели и алгоритма адаптивного оперативного управления логистической системой;
- определение экономического эффекта путем имитационных экспериментов с построенной моделью;
- разработка методологии для элементарной логистической системы.

Элементарным звеном железнодорожной грузовой транспортной системы является грузовой фронт — единственный объект из множества определенного класса, обладающий рядом постоянных и переменных признаков, и представляющий собой участок железнодорожного пути с необходимыми сооружениями и устройствами, предназначенный для проведения грузовых операций [1].

Программа грузовых фронтов определяется типовым ТП работы транспортной системы, единым ТП работы станции и подъездных путей, технико-распорядительным актом станции и прочими нормативными документами, а также рядом существенных технологических ограничений [2].

Оперативное управление грузовым фронтом состоит в обеспечении функционирования системы в соответствии с намеченным планом и условиями, определенными на этапе координации. Оно заключается в периодическом или непрерывном сравнении поведения системы с требуемым и соответствующем изменении его с помощью управляющих воздействий.

Целью оперативного управления является реализация во времени составленного плана, поэтому оно

*Когда я не могу управлять событиями,  
я предоставляю им самим управлять собой.*

Генри Форд

всегда должно рассматриваться как функция нескольких величин, в том числе — времени.

Суточный план работы грузового фронта определяется исходя из требований клиентов, обратившихся к владельцу данного грузового фронта. Процесс формирования плана работы грузового фронта подробнее рассмотрен в [3].

Грузовой фронт как элементарная логистическая система на железнодорожном транспорте не может диктовать свои цели всей станции, однако испытывает на себе воздействие целей железнодорожного транспорта в целом и конкретной логистической цепи в частности.

При этом часто эти цели находятся в существенном противоречии. Так цель, диктуемая грузовому фронту как элементу логистической цепи, состоит в обеспечении минимальной стоимости выполняемых услуг.

Цель, которую ставят грузовому фронту маркетинговые ограничения и рыночные требования, ориентирована в большей степени на удовлетворение нужд клиента, на формирование максимальной добавленной стоимости, ограниченной, однако, реалиями рыночного спроса.

Железнодорожному же транспорту как производственно-технической системе свойственно, в первую очередь, стремление к максимальной безопасности всех перевозок, и в выполнении утвержденного графика движения и плана формирования поездов.

Таким образом, грузовой фронт как система обладает вполне четким набором приоритетов в целях, который можно сформулировать в виде следующего списка:

- технические цели — безопасность движения, выполнения погрузочных работ, соблюдение ограничений по пропускной способности;
- технологические цели — наличие резерва пропускной способности на станции (грузовом районе), стремление к оптимизации технико-экономических показателей фронта;
- экономические цели — цели, связанные с недопущением роста затрат и себестоимости работ на фронте;
- рыночные цели — цели, связанные с максимизацией прибыли владельца логистической цепочки.

Указанный набор приоритетов грузового фронта определяет следующую схему адаптивной системы управления:

- блок распознавания и моделирования поступающих грузопотоков, представляющий собой систему, определяющую закон изменения входного грузопотока по времени по заданным критериям (в качестве которых, например, может выступать минимизация квадрата отклонения найденной зависимости от реального грузопотока);
- блок определения оптимального размера партии грузопотока в зависимости от расходов на обслужива-

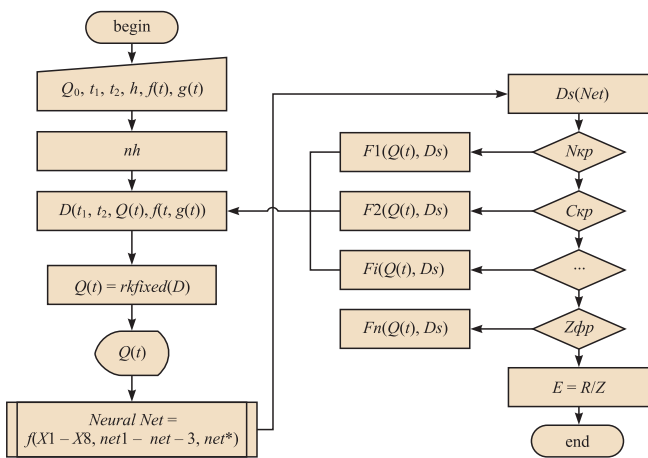


Рис. 1. Принципиальный алгоритм функционирования грузового фронта

живание партии, ущерба от появления дефицита грузопотока в системе [4];

- блок расчета траектории свободного и вынужденного движения логистической системы в соответствующих фазовых координатах;
- блок адаптивной нейродиагностики системы;
- алгоритм принятия решения об оптимизации работы логистической системы на основе минимума затрат на управление и полученного диагноза от нейронной сети.

Основной алгоритм управления грузовым фронтом, лежащий в основе перечисленных блоков, представлен на рис. 1.

Введенный таким образом грузовой фронт представляет собой систему, в которую встроены нелинейный элемент, непосредственно реализующий алгоритм обратной связи и несколько сценариев управления грузовым фронтом. Подобная система может быть применена как к грузовому фронту — отдельной элементарной системе, так и грузовому фронту с буфером.

Согласно рис. 1, выходной грузопоток  $Q(t)$  (т, кг) с грузового фронта определяется как сумма решений, обусловленных начальными положением грузового фронта ( $Q_0$ ), особенностями входного грузопотока  $f(t)$ , с определенным шагом  $h$ , задаваемым пользователем, на заданном интервале времени  $[t_1, t_2]$  вычисляется итоговая функция грузопотока  $Q(t)$ . С учетом внешних условий работы станции (грузового района) ( $g(t), X_1, \dots, X_8$ ), нейронная сеть (*Neural Net*) проводит диагностику эксплуатационной обстановки, после чего выносит одно из решений ( $Ds$ ).

Представленный алгоритм является полисистемным в смысле, употребляемом в [5], так как представляет собой частный случай, когда нейронной сетью уже поставлен один из диагнозов относительно работы грузового фронта. Однако таких диагнозов может быть несколько групп, и для каждой группы диагнозов нижняя часть алгоритма  $F_i(Q(t), Ds)$ , расположенная после вывода решения нейронной сети, будет индивидуальной. Таким образом, алгоритм распадается

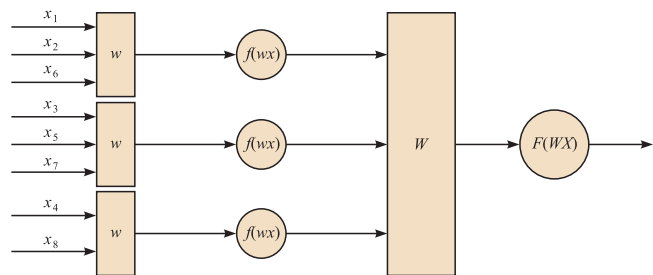


Рис. 2. Схема нейронной сети для системы адаптивного управления грузовыми фронтами

на несколько слоев, которые соединяются в точке расчета экономической эффективности решения  $E$ .

В общем случае работа каждого грузового фронта может быть описана неоднородным линейным дифференциальным уравнением с заданными начальными условиями:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = A(t)Q(t) + B(t)G(t) + \xi(t) + u(Q(t), F), \quad (1)$$

где  $\xi(t)$  — случайный процесс, характеризующийся своим математическим ожиданием, набором моментов;  $A(t)$  — коэффициент (в общем случае — матрица), учитывающий динамику работы грузовой системы во времени;  $B(t)$  — коэффициент (или матрица), учитывающая изменение во времени входящих воздействий  $G(t)$ ;  $u(Q(t), F)$  — управление работой грузового фронта (функция от времени, величины грузопотока  $Q(t)$  и целевого критерия  $F$  (ден. ед.) отклонения величины затрат на переработку грузов на грузовом фронте от оптимального либо нормативного значения).

Разработка модели оптимального управления грузовым фронтом подробнее представлена в [6].

Влияние ТП, изменение эксплуатационных показателей работы станции, влияние внешних возмущений будет оценивать нейронная сеть, схема которой представлена на рис. 2.

Основные показатели, на основании которых нейронная сеть должна принять решение о начале реализации одного из четырех сценариев управления, подаются на вход нейронной сети в нормированном виде, и представляют собой относительную величину отклонения от оптимальных и допустимых значений следующих величин (в списке указана исходная единица измерения величины):

- $x_1$  — время задержки в работе грузовой системы, час;
- $x_2$  — объем задержанной порции грузопотока, т;
- $x_3$  — свободный резерв перерабатывающей способности грузовой системы, %;
- $x_4$  — мгновенные незапланированные затраты, руб.;
- $x_5$  — оперативный коэффициент неравномерности, %;
- $x_6$  — скорость обработки грузопотока, т/ед. вр.;
- $x_7$  — процент потерь и искажений, %;
- $x_8$  — степень отклонения от оптимального значения затрат на переработку грузопотока.

Для работы нейронной сети с учетом физического и экономического смысла указанных выше критериев рекомендовано ввести в действие два слоя нейронов. Ин-

формация поступает на входы первого слоя, состоящего из трех независимых нейронов, каждый из которых выдает собственный выходной сигнал. Выходы нейронов первого слоя поступают на вход следующего нейрона, который преобразовывает информацию и выдает на выходе характеристическое число, определяющее диагноз для грузовой системы, а следовательно, и выбор необходимого управляющего воздействия.

Нейронная сеть выдает следующие диагнозы:

- процесс протекает нормально, внешнего воздействия не требуется (значение  $D_s < 0,1$ );
- необходимо мягкое управление с обратной связью ( $0,1 \leq D_s < 0,4$ );
- необходимо жесткое управление с перераспределением грузопотока на иные грузовые фронты ( $0,4 \leq D_s < 0,7$ );
- для нормализации ситуации следует прекратить подачу входного грузопотока на грузовой фронт, ситуация критическая ( $D_s \geq 0,7$ ).

Согласно системе целей грузового фронта последние два диагноза и соответствующие им сценарии управления находятся вне зоны оптимальности по экономическим критериям, так как в рассматриваемой ситуации речь идет о восстановлении пропускной способности и работоспособности грузовых фронтов.

Сценарий управления работой грузового фронта заключается в применении такого управления, которое с достаточной степенью достоверности и точности приведет сложившуюся картину на фронте к оптимально рассчитанной траектории, или же отклонение от таковой не превысит определенной точности. Одним из вариантов управления, наиболее наглядно представленным в опыте эксплуатационной работы железнодорожного транспорта, может выступать регулирование потока через входящий буфер (вплоть до ограничения поступления грузопотока).

Общие принципы построения управления грузовыми фронтами, выявленные на основе анализа практики железной дороги — филиала ОАО "РЖД" и проверенные на экспериментальных математических моделях, можно сформулировать следующим образом:

- грузовой фронт является системой, функционирующей в режиме РВ и в изменяющейся эксплуатационной обстановке, вследствие чего может быть представлен определенными эволюционными дифференциальными уравнениями;
- поведение грузового фронта как разомкнутой системы при постоянном внешнем воздействии (это чаще всего встречается в практике работы железнодорожного транспорта) может быть представлено в виде разомкнутой системы, однако лишь для целей описания и мониторинга событий, но не для управления;
- оптимальное управление как единичным грузовым фронтом, так и группой грузовых фронтов станции возможно только с использованием механизма обратной связи. Проведение разомкнутого управления возможно только с нелинейным логическим элементом, согласно рис. 1, и на короткий временной период;

- для определения экономической эффективности процесса управления выдвигается предположение о том, что в рассматриваемой ситуации вернуться к управлению по скорости, при этом основное влияние на результат работы грузового фронта вносит внешняя составляющая.

В ряде случаев построение программного управления не является экономически эффективным, так как, несмотря на математическую оптимальность решения, затраты на поддержание такого режима управления оказываются несоразмерно большими, чем возможная выгода от системы управления. Кроме того, работа грузового фронта осуществляется в условиях связи со станцией, по крайней мере, это описывается в ТП различных логистических систем. В таком случае следует ввести режим управления работой грузового фронта с использованием обратной связи.

Математически управление с обратной связью основывается на принципе динамического программирования Беллмана [7].

Система управления грузовым фронтом с обратной связью может быть реализована как непосредственно путем решения уравнения с обратной связью, так и в виде набора сценариев, включающихся после проверки выполнения некоторых условий, в том числе по пропускной способности станции, по непосредственным ограничениям самого грузового фронта, а также по экономическим критериям.

Анализ ситуаций, встречающихся в практике эксплуатационной работы, в сочетании с экспериментами над моделью грузового фронта вида

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_u \left\{ \frac{\partial \varphi(t, Q)}{\partial t} + \frac{\partial \varphi(t, Q)}{\partial Q} \times \right. \\ \left. \times (a \times \sin wt + u(t)) - \lambda Q^2(t) \right\} = 0, \\ \varphi(t_2, Q) = -F(Q) = -\lambda Q^2(t), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $u(t)$  — управление грузопотоком, поступающим на грузовой фронт;  $Q(t, u)$  — выходной грузопоток фронта;  $a, w$  — соответственно величина амплитуды и частоты внешнего воздействия на грузовой фронт;  $\varphi(t_2, Q)$  — функция граничного условия;  $\lambda$  — удельная величина затрат на управление грузопотоком, штрафных ед./ед. грузопотока;

при квадратичном функционале качества управления и синусоидальных внешних воздействиях при зафиксированных моментах начала и окончания управления  $t_1$  и  $t_2$ , позволяет сделать следующий вывод: адаптивное управление грузовыми фронтами при сформулированных условиях и допущениях должно строиться с учетом как самой искомой функции управления, так и с учетом первой производной функции управления по времени.

Экономическая эффективность полученных решений определяется по изменению следующих интегральных показателей:

- коэффициент полезной загрузки логистической системы по времени;

- физический коэффициент загрузки логистической системы;
- величина поступающих доходов в грузовую систему в течение расчетного периода управления;
- величина грузопотока, получившая обоснованный отказ в обслуживании в расчетный период.

Созданная логистическая система признается стремящейся к экономически эффективному функционированию, если:

- снижается величина отклоненного грузопотока;
- повышается приток доходов в систему;
- повышается временная интенсивность занятия мощностей в системе.

В качестве объекта имитации автором выбран образ логистической системы, представляющей собой терминально-складской комплекс с шестью подъездными путями разной специализации, расположенный в одном из грузовых районов грузовой железнодорожной станции г. Самара.

Средний суточный экономический эффект, вычисленный на основе показателей, характерных для условий снижения объемов эксплуатационной работы (ноябрь 2008 г.), показывает, что при новом способе управления системой коэффициент физической загрузки мощностей повысился на 7,62% по сравнению с традиционным способом управления. Величина собираемых доходов в сутки выросла на 1910 руб./сут., годовой прирост доходов – 697,15 тыс. руб. (без учета сезонной неравномерности и в услови-

ях минимального месяца загрузки в году) при условии поддержания технологических и технических параметров работы грузовых фронтов в пределах требований, устанавливаемых Правилами технической эксплуатации железных дорог РФ и ТП работы дистанции погрузочно-разгрузочных работ.

#### Список литературы

1. *Ольшанский А.М., Рязанов А.Ю.* Эволюция понятия "грузовой фронт"// Материалы 34 научной конференции студентов и аспирантов "Дни студенческой науки". Самара. СамГАПС. 2007.
2. *Грунтов П.С., Дьяков Ю.В., Макарошкин А.М.* Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте: учебник для ВУЗов/ под ред. П.С.Грунтова. М.: Транспорт. 1994.
3. *Рязанов А.Ю.* Модель гармонизации экономических интересов при взаимодействии с транспортными системами.// Вестник Самарского государственного экономического университета: научный журнал. Самара. Изд. СГЭУ. 2009. № 2 (52).
4. *Рыжиков Ю.И.* Теория очередей и управление запасами. СПб. Питер. 2001.
5. *Черкашин А.К.* Полисистемный анализ и синтез. Отв. ред. В.С.Михеев. Новосибирск. Изд. "Наука. Сибирское предприятие". 1997.
6. *Ольшанский А.М.* Оптимальное многокритериальное управление работой грузовых систем.// Вестник транспорта Поволжья. Научный журнал. №3(15), 2008. Самара. Изд. СамГУПС.
7. *Пантелеев А.В, Бортакровский А.С.* Теория управления в примерах и задачах: учебное пособие. М.: Высш. шк. 2003.

*Ольшанский Алексей Михайлович – аспирант Института управления и экономики ГОУ ВПО Самарский государственный университет путей сообщения МТ РФ.*

*Контактные телефоны: (846) 303-73-25, 999-07-76.*

*E-mail: olshanam@mail.ru*

#### ЕcoRPC – система управления роботами

Новая система управления EсоRPC (Robot and Process Control) роботами от компании Дюрр основана на промышленном ПК и является мультикинетической и многопроцессной. Система позволяет одновременное управление четырьмя роботами или четырьмя различными процессами.

Секрет повышенной производительности заключается в гораздо более короткой длительности цикла процессора. Помимо мультикинетики и многопроцессности это отличительное свойство дает и другие важные преимущества: значительно сокращается период сканирования ТП, благодаря чему достигается более высокая безопасность работы системы. Если зафиксирован выход параметров ТП за допустимые пределы, имеется возможность своевременно остановить оборудование, не доводя до аварии. Другое преимущество состоит в том, что компоненты установки могут быть лучше синхронизированы друг с другом. Наиболее ощутимо это проявляется в процессах, выполняемых с очень высокой скоростью или требующих очень большой точности в отношении передвижения машин или дозирования материала.

Система программирования EсоScreen 3D-OnSite компании Дюрр, значительно облегчающая программирование и параметризацию, предоставляет возможность 3D-визуализации роботизированного процесса нанесения покрытий. Данная система позволяет выполнить все эти действия как непосредственно на установке, не прерывая производственный процесс, так и дистанционно из офиса. Коммуникация с системой управления роботами для загрузки и пересылки файлов осуществляется через Ethernet. Система EсоScreen 3D-OnSite предоставляет также функции, которые обычно встречаются только в системах программирования в автономном режиме: моделирование работы роботов в соответствии со стандартом RRS

(RRS: realistic robot simulation), контроль коллизий, моделирование мультикинетики для ≤16 роботов, видеозапись и др. Кроме того, система программирования предоставляет возможность автоматической генерации траектории выполняемого ТП (например, линий окраски), а также огромный запас возможностей администрирования данных с помощью менеджера БД. Модуль диагностики позволяет осуществлять одновременную запись и архивацию всех сигналов одной или нескольких систем управления роботами с высокой скоростью считывания. Для графического анализа данных модуль диагностики оснащен широким выбором инструментов. Также возможно долгосрочное архивирование данных в БД SQL.

Новая технология управления успешно применяется уже в различных проектах. В автомобилестроении в области герметизации швов уже многие производители выбрали роботизированные установки с системой EсоRPC, позволяющей осуществлять управление роботами и процессами нанесения покрытий и герметизирующих материалов на единой платформе. Недавно успешно завершился первый проект, где для управления роботизированным нанесением покрытий во всех сферах применялась система управления EсоRPC: для проекта компанией Дюрр были предоставлены системы роботов и оборудования для нанесения ПВХ и лакокрасочных материалов. В целом были установлены два робота для нанесения защитного покрытия на основании днища и 20 окрасочных роботов для нанесения базисного, заполняющего и прозрачного лака как снаружи, так и внутри. При внутренней покраске, проходящей в "стартстопном" режиме, роботы были дополнительно снабжены 10 устройствами-манипуляторами. Для нанесения базисного и прозрачного лака была установлена новая грунтовочная станция компании Дюрр.

*Http://www.durr.com*