



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАЕМОГО МЕТАЛЛА ПЕРЕД ВЫДАЧЕЙ ИЗ ПЕЧЕЙ ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ РЕЖИМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова, Т.У. Ахметов (ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет»)

В работе для нестационарных условий функционирования современных листопркатных станов определены условия энергосберегающих режимов нагрева непрерывно-литых заготовок, неостывших после разливки. Показано, что существующая конструкция методических печей и принятая концепция распределения тепловых нагрузок, ориентированные на реализацию максимальной производительности, не обеспечивают эффективного использования энергосберегающего нагрева. Выполнено исследование, доказывающее, что используемая для управления температура печи, измеряемая термомпарами в защитных карборундовых чехлах, неоднозначно отражает текущее состояние нагреваемого металла при переходных динамических режимах. Поэтому при реализации энергосберегающих режимов целесообразно использовать температуру поверхности нагреваемого металла. Для исключения возможности выдачи на стан заготовок с недостаточным для процесса прокатки тепловым состоянием предложена и опробована в реальных производственных условиях методика оценки теплового состояния каждой заготовки перед выдачей из печи.

Ключевые слова: производство листового проката, критерий рационального управления, тепловой режим нагрева, температура поверхности заготовки, температура рабочего пространства печи, прогнозирование теплового состояния заготовки.

Проблемы энергосберегающего управления нагревом непрерывно-литых заготовок при нестационарных режимах работы листопркатных станов

Производство листового проката на станах горячей прокатки, является одним из сложнейших процессов металлургического производства. Высокая энергоемкость участка нагрева заготовок под прокатку в методических печах прокатных станов требует реализации энергосберегающих режимов нагрева [1, 2], что предъявляет для АСУТП нагрева металла повышенные требования к информационному и математическому обеспечению процесса [3–5].

Современные высокопроизводительные прокатные станы работают в нестационарных режимах. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») в течение суток представлено на рис. 1.

Начальная температура партии подаваемых на нагрев непрерывно-литых заготовок изменяется в диапазоне 0...600°C. Печи стана 2000 с шагающими балками со сводовым верхним и боковым нижним отоплением предназначены для нагрева заготовок толщиной 250 мм и длиной 5000...12000 мм. Печи имеют 10 зон, отапливаемых природным газом.

Приоритетной задачей рационального энергосберегающего автоматизированного управления тепловым режимом нагрева металла в таких нестационарных условиях является обеспечение своевременной подачи на стан нагретых до заданного по сечению температурного состояния заготовок при минимальных затратах топлива на нагрев.

Критерий такого рационального управления нагревом металла можно выразить в виде функционала:

$$J = \sum_{i=1}^n [t_i(T) - t_i^3(\tau)]^2 + \beta \int_0^T U^2(\tau) d\tau \rightarrow \min,$$

где T и τ — соответственно фиксированное заданное время нагрева и текущее время, с; $t_i(T)$ и $t_i^3(\tau)$ — действительные текущие и заданные в конце нагрева значения температуры по слоям заготовки, °C; β — масштабный коэффициент; $U(\tau) = K \cdot V_r(\tau)$ — управляющее воздействие, °C; $V_r(\tau)$ — текущий расход топлива (природного газа), м³/ч; K — коэффициент передачи по каналу «расход топлива — температура рабочего пространства печи».

Связь между расходом топлива (управляющим воздействием) и температурой рабочего пространства можно выразить в виде уравнения:

$$\frac{dt_{\text{рп}}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{T_0} [K \cdot V_r(\tau) - t_{\text{рп}}(\tau)] \text{ при}$$

$$U_{\min} \leq U(\tau) \leq U_{\max},$$

где $t_{\text{рп}}(\tau)$ — температура рабочего пространства, °C, T_0 — постоянная времени, характеризующая инерционность процесса теплопередачи от продуктов горения топлива к температуре рабочего пространства, с.

Кроме ограничений на управление необходимо учитывать ограничения на температуру рабочего пространства и температуру поверхности нагреваемого металла (верхнего слоя окалины):

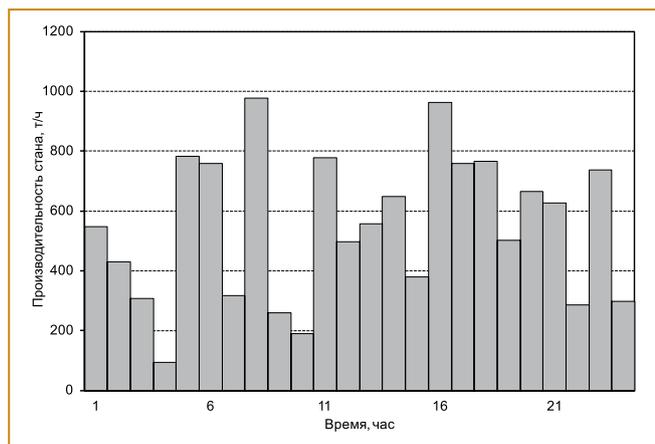


Рис. 1. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «ММК» в течение суток

$$t_{рп}(\tau) < t_{рп}^{max}(\tau) = 1380 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{пов}(\tau) < t_{пов}^{max}(\tau) = 1340 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_{пов}(\tau)$ — температура поверхности нагреваемых заготовок.

Теоретически с использованием принципа максимума Понтрягина Л.С. определено, что в производственных ситуациях, например, при производительности стана меньше 600 т/ч (рис. 1), когда нагревательные печи не являются лимитирующим звеном в ТП, основной нагрев металла должен осуществляться на заключительном интервале заданного времени нагрева [4]. В этом случае поддерживать металл на высоком температурном уровне приходится минимальное время, затрачивая меньше тепловой энергии. Кроме того, это способствует снижению потерь металла от окисления, составляющих значительную долю в стоимости нагрева. При этом эффективнее используется тепло продуктов сгорания в последующих зонах по ходу продуктов сгорания.

Используемые реальные режимы нагрева и конструкции большинства методических печей, имеющих на выходе из печей зоны выдержки (томильные зоны), мало способствуют реализации энергосберегающих режимов нагрева. Эти режимы рассчитаны на достижение максимальной производительности печи.

В условиях неравномерной производительности стана при смешанном посаде и наличии томильных зон (12...15% от общей тепловой нагрузки печи) технологи, обоснованно стремясь обеспечить некоторый, часто завышенный запас нагретого металла, реализуют режим максимальной производительности печи за счет интенсификации нагрева при входе металла в отопляемые зоны. Такой режим нагрева заготовок холодного (с тем-

пературой < 100°С) посада при производительности стана > 600 т/ч, когда нагревательные печи становятся «узким местом» в общем ТП, сохраняется и при нагреве заготовок горячего посада с температурой > 400°С и малой (< 600 т/ч) производительности прокатного стана. При этом готовый к выдаче металл длительное время находится в нагревательной печи. Это приводит к повышенному удельному расходу топлива и увеличению потерь металла с окалиной.

Совершенствование информационного обеспечения для реализации энергосберегающего нагрева при нестационарном режиме работы печей

Реализация рационального энергосберегающего автоматизированного управления тепловым режимом в нестационарных условиях работы нагревательных печей требует более совершенной системы информационного обеспечения. Общепринятым источником информации при реализации автоматизированного управления тепловым режимом методических печей является температура рабочего пространства, измеряемая термопарами в массивных (толщиной ≥5 мм) карборундовых чехлах, установленных в отопляемых зонах. Этот параметр объективно характеризует интенсивность теплообмена между греющей средой и поверхностью нагреваемых заготовок в стационарных условиях. Однако температура рабочего пространства в динамических переходных режимах, характерных для современного производства, неоднозначно отражает текущее тепловое состояние нагреваемого металла.

Изменение во времени температуры рабочего пространства печи, измеряемой термопарой градуировки ТПП, температуры поверхности нагреваемых сортовых заготовок, измеряемой пирометром спектрального отношения, расхода природного газа и расхода воздуха во второй сварочной зоне методической печи № 2 ЛПЦ-2 ОАО «Уральская сталь» представлено на рис. 2.

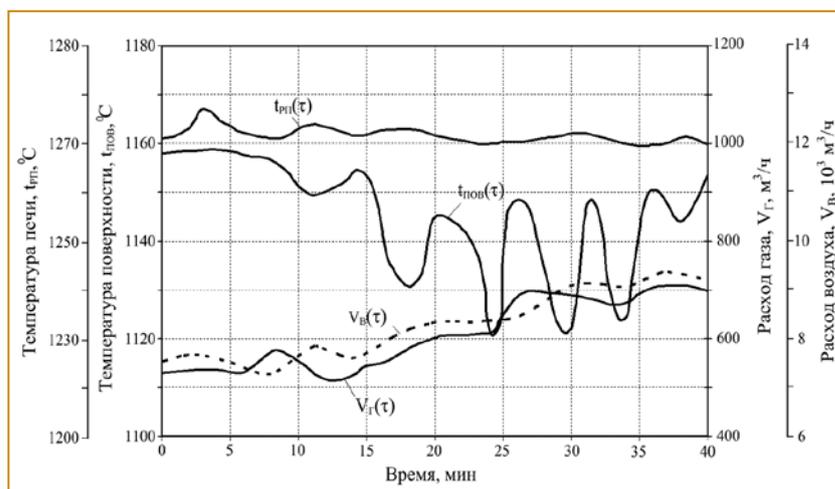


Рис. 2. Изменение во времени расхода природного газа – $V_g(\tau)$, воздуха – $V_v(\tau)$, температуры поверхности нагреваемой заготовки $t_{пов}(\tau)$ и рабочего пространства $t_{рп}(\tau)$ при автоматическом управлении тепловым режимом во второй сварочной зоне печи № 2 ЛПЦ-200А ОАО «Уральская сталь»

Управление тепловым режимом печи с шагающими балками, сводовым верхним и боковым нижним отоплением осуществлялось по температуре рабочего пространства при использовании типового ПИД-закона регулирования. Анализ данных для различных типов печей и разных способов управления тепловой нагрузкой показывает, что температура рабочего пространства в переходных нестационарных режимах работы печи неоперативно и неоднозначно характеризует текущее тепловое состояние нагреваемых заготовок. Это приводит к увеличению разброса по тепловому состоянию выдаваемых на прокат заготовок и последующих проблем при покате этих заготовок.

Целесообразность использования температуры поверхности заготовки для оперативного автоматизированного управления тепловым режимом промышленных печей осознана давно, но особенно актуальной стала в современных условиях проведения политики энергосбережения. Основным препятствием к использованию этого параметра для управления нагревом металла является неоправданно преувеличенное затруднение достоверного измерения температуры окисляющейся поверхности через излучающий слой продуктов сгорания, когда эта поверхность отражает тепловое излучение огнеупорной кладки.

Однако при этом не учитываются следующие обстоятельства:

- при использовании температуры рабочего пространства обеспечивается более точное измерение только температуры рабочего спая термопары, помещенного в защитный массивный карборундовый чехол, установленный в отопляемой зоне, на значительном расстоянии от нагреваемого металла;

- постоянная времени, количественно характеризующая инерционные свойства информационного канала измерения температуры рабочего пространства, составляет 160...200 с, в то время как аналогичный показатель для канала измерения температуры поверхности с использованием оптического пирометра составляет 10...16 с;

- не все так благополучно и со стабильностью номинальных статических характеристик (НСХ) (или градуировок) платиносодержащих термопар, работающих в диапазоне 1000...1600 °С в окислительной среде.

Для обеспечения необходимой термической стойкости при резком изменении температур, содержание Al_2O_3 в материале защитного чехла составляет 70...80% при пористости 5...10%. Поэтому даже незначительное количество SiO_2 приводит к образованию силицида Pt_2Si_5 , разрушающего платину и нарушающего стабильность НСХ термопары. Также при нестационарных условиях работы современных методических печей температура рабочего пространства неоднозначно отражает текущее тепловое состояние нагреваемого металла (рис. 2). При этом от системы автоматического управления в динамических режимах требуется повышенная оперативность и целенаправленность реали-

зации управляющих воздействий, что возможно при использовании в качестве управляемого параметра температуры поверхности нагреваемого металла.

Теоретическое обоснование методики оценки теплового состояния нагреваемого металла перед выдачей из печи

Основным, вполне обоснованным возражением технологического персонала против энергосберегающего режима управления нагревом при снижении тепловой нагрузки в первой отопляемой зоне (с учетом начальной температуры посадки) является довод повышения вероятности и опасности выдачи на стан недогретого металла. В этом случае потери от поломки валков стана будут гораздо больше, чем эффект от экономии расхода топлива. Однако качество нагрева металла в производственных условиях определяется перед выдачей заготовки из печи технологами субъективно.

Проблему достоверного определения текущего реального теплового состояния каждой нагреваемой непрерывно-литой заготовки перед выдачей из печи удалось решить расчетным путем с использованием текущих значений температуры рабочего пространства и температуры поверхности нагреваемой заготовки в томильной зоне. Тепловое состояние нагреваемой заготовки определяется температурой ее поверхности и разностью температур между поверхностью и центром. Для инструментального контроля доступна только температура поверхности.

Для методических печей высокопроизводительных прокатных станов характерен многоступенчатый нагрев, заключительным этапом которого является период выдержки металла в томильной зоне. Выдержку металла в томильной зоне при автоматической стабилизации температуры поверхности можно представить как симметричный нагрев массивной пластины при граничных условиях первого рода. Распределение температуры по сечению в начальный момент времени выдержки металла можно представить достаточно простым уравнением вида:

$$T(x) = t_{ц}(\tau) + \Delta t_0(\tau) \frac{x^2}{S^2},$$

где $t_{ц}(\tau)$ — температура центра заготовки, Δt_0 — разность температур между поверхностью и центром заготовки; x — текущая координата по толщине заготовки, м; S — половина реальной толщины заготовки, м.

Изменение температуры поверхности нагреваемой заготовки определяется соотношением двух тепловых потоков: наружного (внешнего) q_n от рабочего пространства к поверхности заготовки и внутреннего от поверхности к внутренним слоям заготовки — q_b .

При описании теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью нагреваемого металла по закону Ньютона величину внешнего теплового потока на металл $q_n(\tau)$ можно определить по формуле:

$$q_n(\tau) = \alpha_{п} [t_{рп}(\tau) - t_{пов}(\tau)] \cdot F_m,$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), $F_{\text{м}}$ — площадь поверхности нагреваемого металла, м².

Величина внутреннего теплового потока $q_{\text{в}}(\tau)$ зависит от величины $F_{\text{м}}$, значения коэффициента теплопроводности металла λ , Вт/м °С и определяется величиной текущего перепада температуры между поверхностью и центром.

Принимаем, что для диапазона температур металла в томильной зоне 1150...1250 °С величина λ мало зависит от температуры. При постоянной температуре поверхности между разностью температуры по сечению заготовки и разностью между температурой рабочего пространства и температурой поверхности существует детерминированная связь, которая положена в основу разработанной методики определения реального текущего теплового состояния нагреваемой заготовки. В первом приближении при равенстве внутреннего и внешнего тепловых потоков эта связь может быть выражена уравнением:

$$t_{\text{рп}}(\tau) - t_{\text{пов}}(\tau) = \frac{\lambda \pi}{2\alpha_{\text{п}} S} [t_{\text{пов}}(\tau) - t_{\text{ц}}(\tau)].$$

Полученное выражение позволяет рассчитать текущее значение перепада температуры по сечению нагреваемой заготовки независимо от предыстории процесса, пользуясь только измерением текущего значения температуры рабочего пространства и температуры поверхности заготовки, учитывая теплофизические свойства стали и величину коэффициента теплоотдачи. Величину коэффициента теплоотдачи можно экспериментально определить по методике, изложенной в работе [6].

Измерение температуры поверхности нагреваемого металла целесообразно осуществлять через визирную трубу с отдувом и водяным патрубком для защиты пирометра. Труба установлена в боковой

стене печи под углом 25...30° к поверхности металла и развернута против хода металла под углом. Угол выбирается таким образом, чтобы минимизировать попадание в поле визирования боковых поверхностей и подины при дискретном расположении заготовок в печах с шагающими балками.

Проверка достоверности и точности методики оценки теплового состояния нагреваемых заготовок перед выдачей из печи в реальных производственных условиях

Для проверки работоспособности и объективной достоверности рассматриваемого способа оценки реального теплового состояния заготовок сравнивались измеренная пирометром частичного излучения температура раската после черновой группы клетей и расчетное (прогнозируемое) значение температуры раската для каждой выданной заготовки из печи № 6 стана 2500 ОАО «ММК». Техническая реализация системы контроля представлена в [7].

Изменение во времени параметров теплового режима в томильной зоне печи № 6 стана 2500 ОАО ММК при автоматическом управлении тепловым режимом по температуре поверхности нагреваемого металла представлено на рис. 3. Там же представлено изменение во времени величины отклонения расчетной температуры раската от измеренного для каждой выданной из печи заготовки

$$\Delta T(\tau) = T_{\text{изм}}(\tau) - T_{\text{рас}}(\tau),$$

где $T_{\text{изм}}(\tau)$, $T_{\text{рас}}(\tau)$ — измеренная и расчетная температура раската заготовки после черновой группы клетей, °С.

Измерение температуры поверхности осуществлялось пирометром полного излучения, свизированным на поверхность заготовки второй в очереди на выдачу. Измерение температуры рабочего пространства производилось термопарой градуировки ТПП без карборундового чехла (для уменьшения инерционности), установленной в томильной зоне в непосредственной близости с пирометром. При максимальном расходе топлива в случае нагрева металла холодного посада наблюдается некоторое завышение расчетной температуры раската, вследствие влияния излучения продуктов сгорания, направленных на поверхность металла соответствующим наклоном горелок в томильной зоне. После введения коррекции на расход газа было скомпенсировано влияние продуктов сгорания на расчетные параметры. На рис. 4 изображено изменение во времени величины основных контролируемых величин процесса после введения коррекции.

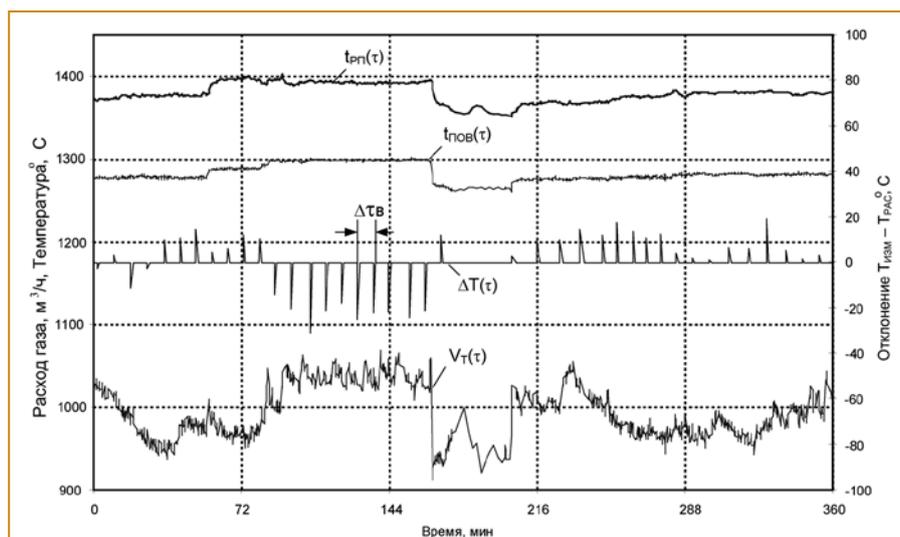


Рис. 3. Изменение во времени параметров теплового режима в томильной зоне печи № 6 стана 2500 ОАО «ММК» при управлении тепловым режимом по температуре поверхности

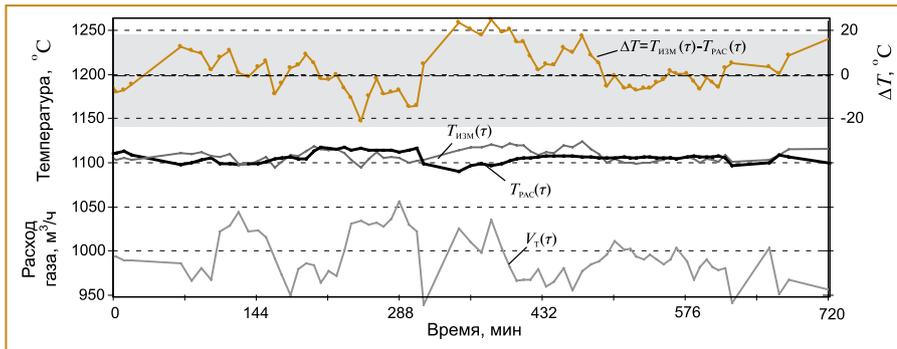


Рис. 4. Изменение во времени параметров теплового режима в пятой зоне печи № 6: $\Delta T(\tau) V_T(\tau) T_{РАС}(\tau)$, $T_{ИЗМ}(\tau)$ при коррекции прогнозируемого расчетного значения $T_{РАС}(\tau)$ по $V_T(\tau)$

Анализ полученных результатов показывает, что рассмотренная методика определения реального теплового состояния нагреваемых заготовок перед выдачей их из печи гарантированно обеспечивает точность прогноза по температуре раската в пределах $\pm 20^\circ\text{C}$.

Результаты и рекомендации при реализации энергосберегающего режима нагрева в методических печах

Опыт перевода управления тепловым режимом методических печей, работающих в нестационарных режимах, по температуре поверхности вместо температуры рабочего пространства показал следующие результаты. За счет оперативности и объективности управляющих воздействий удельный расход топлива снижается на 2...4%. Одновременно увеличивается средняя температура раската на 4...5 $^\circ\text{C}$, что приводит к снижению удельного расхода электроэнергии на 0,2...0,3%.

Использование предложенной методики контроля реального теплового состояния нагреваемого металла позволяет исключить выдачу на стан недостаточно нагретых заготовок при реализации энергосберегающего режима управления нагревом металла. Полученные результаты наглядно демонстрируют простоту технической реализации предложенной методики, если управление

тепловым режимом нагрева будет организовано по температуре поверхности нагреваемых заготовок. Это позволяет сделать вывод о целесообразности интеграции системы контроля теплового состояния заготовок в АСУТП нагревательных печей в качестве одного из типовых элементов.

Список литературы

1. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Нужин Д.В., Волков А.В. Информационное обеспечение топливосберегающего нагрева металла // Сталь. 2007. №9. С.56-59.
2. Румянцев М.И., Шубин И.Г., Носенко О.Ю. Конструирование модели для расчета температуры низколегированных сталей при прокате на ШСГП // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 1. С.54-57.
3. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Жадинский Д.Ю. Информационное обеспечение энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой // Металлург. 2005. № 9. С.64-67.
4. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Нужин Д.В. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом металла перед прокаткой в современных методических печах // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 1. С.14-20.
5. Логунова О.С., Мацко И.И., Сафонов Д.С. Моделирование теплового состояния бесконечно протяженного тела с учетом динамически изменяющихся граничных условиях третьего рода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2012. №27 (286). Вып. 13. С. 74-85.
6. Буглак Л.И., Вольфман И.Б., Ефройнович С.Ю. и др. Автоматизация методических печей. М.: Металлургия. 1981. 196 с.
7. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Обухова Т.Г., Седельников С.В., Овчинников И.Ю. Опробование информационной системы контроля теплового состояния заготовок перед выдачей из методической печи. // Сталь. 2006. № 12. С.75-78.

Парсункин Борис Николаевич — д-р техн. наук, проф.,

Андреев Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой,

Логунова Оксана Сергеевна — д-р техн. наук, проф.,

Ахметов Тимур Уралович — аспирант «Магнитогорского государственного технического университета».

Контактный телефон 8(3519)29-84-32, 29-85-58

E-mail: andreev.asc@gmail.com Logunova66@mail.ru

GE выпускает в продажу операторские интерфейсы для промышленного Internet

Компания GE Intelligent Platforms объявила о выпуске первой модели новой линейки операторских интерфейсов, специально разработанных для использования всех преимуществ промышленного Internet. QuickPanel+ позволяет управлять технологическим процессом, запускать архивные данные, отображать текущую информацию через современный сенсорный экран, обладающий высокой производительностью и отвечающий всем требованиям современных пользователей.

QuickPanel+ - это операторский интерфейс общего назначения, который можно подключать к различным ПЛК. Функ-

ции управления, отображения и хранения архивных данных могут выполняться единым интерфейсом оператора благодаря увеличенному быстродействию и объему памяти. Новейший емкостной сенсорный экран, такой же чувствительный, как у планшета или смартфона, надежно защищен от воздействий неблагоприятной промышленной среды и позволяет работать даже в перчатках.

Дополнительным преимуществом QuickPanel+ является полнофункциональный браузер и поддержка мультимедиа благодаря ОС Windows EC7. Первые модели QuickPanel+ с 7- и 12-дюймовым экраном уже доступны в России.

[Http://www.ge.com](http://www.ge.com)