

**МАТЕМАТИКА  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

---

---

УДК 004

**M. A. Романов, О. В. Толстель**

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ**

5

Поступила в редакцию 06.05.2021 г.  
Рецензия от 21.06.2021 г.

Описывается модернизация линии производства металличерепицы. Требовалось перевести линию на отечественные компоненты и внедрить устройства мелкодисперсной смазки металличерепицы для повышения качества продукции и уменьшения количества брака. Была построена параметрическая модель гидростанции, разработана математическая модель изменения температуры внутри гидростанции, определен вид передаточной функции, разработаны блок-схема алгоритма управления линии производства металличерепицы, программное обеспечение для оборудования марки «Овен» автоматизированной линии: логического контроллера PLC160 и панели оператора SP310-R.

*The modernization of the metal tile production line is described. It was required to transfer the line to domestic components and introduce devices for fine lubrication of metal tiles to improve the quality of products and reduce the number of rejects. A parametric model of the hydroelectric station was built, a mathematical model of the temperature change inside the hydroelectric station was developed, the type of transfer function was determined, a block diagram of the control algorithm for a metal tile production line was developed, software was developed for the equipment of the "Овен" brand of an automated line: a logical controller PLC160 and an operator panel SP310-R.*

**Ключевые слова:** программируемый логический контроллер (ПЛК), панель оператора, CoDeSyS, гидростанция, мелкодисперсная смазка, масляный туман, передаточная функция

**Keywords:** programmable logic controller (PLC), operator panel, CoDeSyS, hydrostation, fine grease, oil mist, transfer function

Металличерепица — кровельный материал, представляющий собой листы, изготовленные из тонколистовой стали, алюминия или меди, покрытые полимерным защитным слоем, профилированные методом холодного давления. Листы металличерепицы по внешнему виду напоминают кладку керамической черепицы, что позволяет во многом сохранить достоинства последней.



Металлочерепица применяется в качестве покрытия для скатных кровель с минимальным углом наклона ската  $14^\circ$ . Рекомендуется использовать данный вид кровельного покрытия в условиях с неагрессивной или слабоагрессивной степенью воздействия окружающей среды при температуре воздуха от  $-50$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

Производство металлочерепицы осуществляется на специальных полностью автоматических линиях путем профилирования металлического тонколистового ( $0,4$ – $0,5$  мм) проката методом холодного давления. Сначала прокат проходит через систему профилировочных роликов, создающих волнообразный профиль. После этого холодной штамповкой формируется поперечная волна. Именно благодаря данному виду штамповки металлический лист приобретает форму черепицы. Далее осуществляется нарезка на листы необходимой длины. После этого уже готовые изделия укладывают в пачки и упаковывают в транспортные пакеты.

В рамках данной работы ставились следующие задачи:

1. Определить компоненты для замены в линии производства металлочерепицы.
2. Внедрить в линию гидростанцию для подачи смазочного материала масляным туманом [1].
3. Разработать математическую модель изменения температуры парамасляной смеси в гидростанции.
4. Разработать программное обеспечение для линии.
5. Разработать панель оператора.

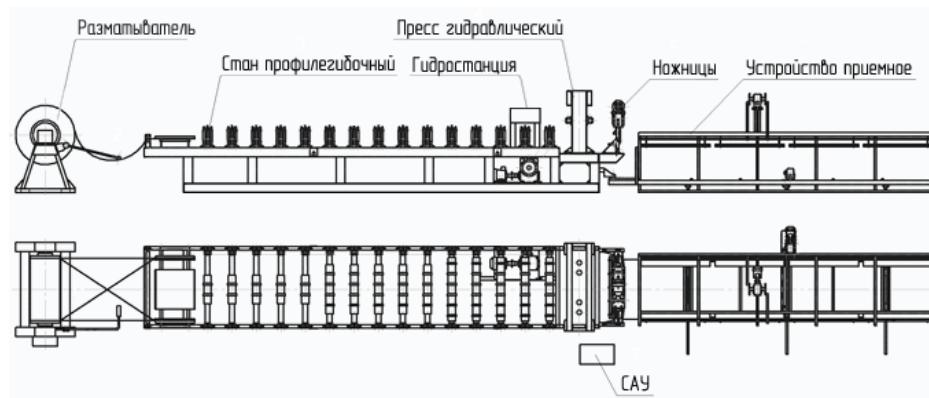
Далее рассмотрим выполнение поставленных задач.

### Описание линии производства металлочерепицы

Линия производства металлочерепицы состоит из следующих элементов:

- разматыватель, на который надевается рулон металла;
- станы профилегибочные, которые отвечают за приздание листу металла необходимой формы;
- гидростанция, которая смазывает металл перед гидравлическим прессом по принципу масляного тумана;
- пресс гидравлический для придания окончательной формы металлочерепице;
- ножницы для отреза металлочерепицы нужного размера;
- приемное устройство, в которое попадает отрезанный лист металлочерепицы;
- система автоматического управления, отвечающая за работоспособность линии [2].

На рисунке 1 представлена схема такой линии, на рисунке 2 – фрагмент автоматизированной линии производства металлочерепицы на предприятии.



7

Рис. 1. Схема линии производства металличерепицы [2]

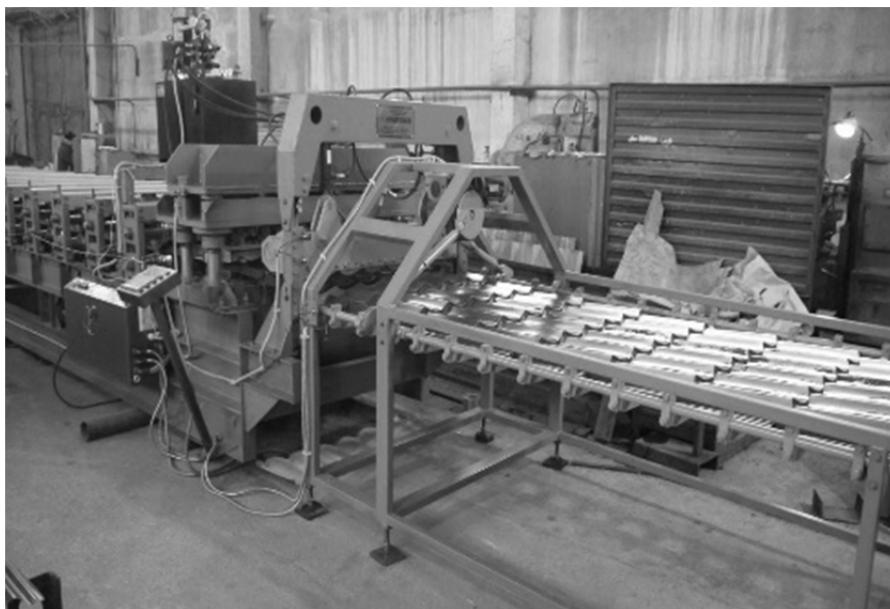


Рис. 2. Фрагмент автоматизированной линии  
производства металличерепицы на предприятии

На предприятии, где проводилась работа, линия была оснащена китайскими компонентами — контроллером Delta и сенсорной панелью Weintek.

Произведена замена китайских комплектующих на отечественные комплектующие от компании «ОВЕН» — ПЛК160 и СП310-Р, разработана модель внедрения в линию устройства мелкодисперсной смазки для повышения эффективности работы. Также для обновленной линии было написано программное обеспечение.



## Построение параметрической модели гидростанции

Моделирование (в широком смысле) является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценки характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента для эксперимента с моделью системы [3; 4].

8

В каждом реальном процессе параметры в силу различных причин не остаются постоянными, причем они могут меняться в довольно широком диапазоне. Поэтому необходимо проводить анализ функционирования смоделированного процесса при изменении различных параметров.

Смазка масляным туманом представляет собой один из видов жидкой смазки. Ее применяют для быстроходных подшипников качения, цилиндров компрессоров, тихоходных цепей, трущихся пар, требующих дополнительного охлаждения, поддержания постоянной температуры или вязкости масла, в среде, разрушающей консистентные или жидкие смазки. Масляный туман способствует более эффективному охлаждению смазываемых деталей и снижению коэффициента трения. Применим он и в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при обработке металлов резанием.

Мельчайшие частицы масла легко проникают в труднодоступные пазы, зазоры и полости и образуют масляную пленку на поверхностях трения. Существенным недостатком этого способа является только однократное применение масла. Воздух и масло, используемые для образования масляного тумана, необходимо подвергать тщательной очистке от пыли и посторонних примесей, воздух должен быть сухим.

Для избежания перегрева или, наоборот, переохлаждения паромасляной смеси на выходе из устройства мелкодисперсной смазки необходимо контролировать температуру внутри гидростанции. В данной статье рассмотрен математический расчет зависимости температуры внутри гидростанции от различных параметров и описан вывод передаточной функции по каналам управления и возмущения.

*Входные контролируемые параметры:*

- $t_{m1}$  — температура масла на входе;
- $t_{pmc1}$  — температура паромасляной смеси на входе;
- $t_{grp}$  — температура греющего пара на входе;
- $t_{oc}$  — температура окружающей среды.

*Управляемые выходные параметры:*

- $t_{pmc2}$  — температура паромасляной смеси на выходе;
- $t_{m2}$  — конечная температура масла;
- $t_k$  — температура конденсата на выходе;



$G_{\text{пмс}2}$  – расход паромасляной смеси на выходе;

$G_k$  – расход конденсата на выходе;

$G_m2$  – расход масла на выходе.

*Управляющие параметры:*

$G_{\text{грп}}$  – расход греющего пара на входе;

$G_{\text{пмс}1}$  – расход паромасляной смеси на входе;

$G_m1$  – расход масла.

*Входные неконтролируемые параметры:*

$i$  – энталпия пара.

На рисунке 3 представлена схема параметрической модели гидростанции.

9

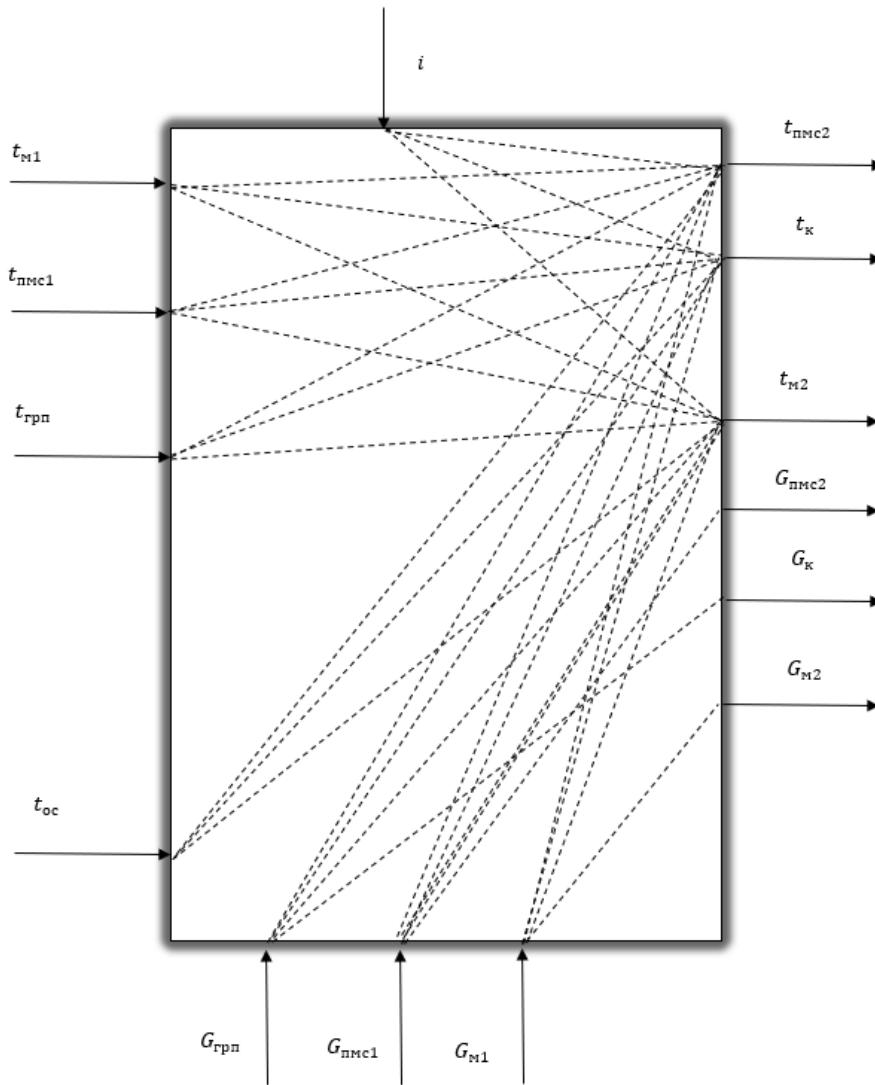


Рис. 3. Схема параметрической модели гидростанции



## Разработка математической модели изменения температуры внутри гидростанции

Математическая модель изменения температуры паромасляной смеси в гидростанции представляет собой совокупность передаточных функций по основным каналам передачи информации.

Температура паромасляной смеси должна находиться в районе  $+25^{\circ}\text{C}$  в зависимости от типа смазочного материала. Данное значение достигается за счет подачи греющего пара, а нагрев смеси происходит благодаря изменению расхода греющего пара на входе.

Для моделирования процесса изменения температуры паромасляной смеси и масла в гидростанции примем следующие допущения:

1) теплофизические характеристики паромасляной смеси, пара, конденсата и масла примем постоянными и равными среднему значению в рассматриваемом диапазоне величин;

2) объект с сосредоточенными параметрами;

3) толщина стенки гидростанции учитывается непосредственно в коэффициенте теплопередачи от паромасляной смеси к окружающей среде;

4) греющий пар полностью конденсируется.

Принимаем

$$c_m = c_{m1} = c_{m2} = c_m;$$

$$c_{pmc1} = c_{pmc2} = c_{pmc3} = c_{pmc};$$

$$G_{pmc1} = G_{pmc2} = G_{pmc3} = G_{pmc}.$$

$$G_{trp} = G_k = G_p$$

Составляем уравнения теплового баланса для гидростанции в установившемся режиме работы.

1. Теплопередача от греющего пара к паромасляной смеси:

$$Q_m = G_{trp} i + G_{pmc1} c_{pmc1} t_{pmc1} \quad (\text{Дж / с}); \quad (1)$$

$$Q_{yx} = G_{pmc2} c_{pmc2} t_{pmc2} + G_k c_k t_k \quad (\text{Дж / с}). \quad (2)$$

Нарушение теплового баланса на  $\Delta Q$  ведет к изменению температуры паромасляной смеси:

$$m_{pmc} c_{pmc} \frac{dt_{pmc}}{d\tau} = Q_m - Q_{yx} \quad (\text{Дж / с}); \quad (3)$$

$$G_{pmc} c_{pmc} \frac{dt_{pmc}}{d\tau} = G_{trp} i + G_{pmc1} c_{pmc1} t_{pmc1} - G_{pmc2} c_{pmc2} t_{pmc2} - G_k c_k t_k \quad (\text{Дж / с}), \quad (4)$$

где  $G_{pmc}$  – расход паромасляной смеси  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ ;



$c_{\text{пмс}}$  – удельная теплоемкость паромасляной смеси  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ ;  
 $t_{\text{пмс1}}, t_{\text{пмс2}}$  – температуры паромасляной смеси на входе и выходе установки ( $^\circ\text{C}$ );

$G_{\text{гпп}}$  – расход греющего пара  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ ;

$i$  – энталпия греющего пара  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)$ ;

$G_{\text{к}}$  – расход конденсата  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ ;

$c_{\text{к}}$  – удельная теплоемкость конденсата  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ ;

$t_{\text{к}}$  – температура конденсата ( $^\circ\text{C}$ ).

Изменяющиеся параметры:

II

$$Q_{\text{м}} = f(G_{\text{пмс}}, t_{\text{пмс1}}, i, G_{\text{п}});$$

$$Q_{\text{yx}} = f(G_{\text{пмс}}, t_{\text{пмс2}}, G_{\text{п}}, t_{\text{к}}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяющимся параметрам), заменив  $\frac{d}{dt}$  на  $p$ :

$$\begin{aligned} m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p \Delta t_{\text{пмс2}} &= \Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \\ &- \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{п}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{п}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{пмс2}} (m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}) &= \Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \\ &- \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{п}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{п}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{пмс2}} = \frac{\Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{п}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{п}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}}{m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}}. \quad (7)$$

2. Теплопередача от паромасляной смеси к маслу и окружающей среде:

$$Q_{\text{м}} = G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} + G_{\text{м1}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} (\text{Дж} / \text{с}); \quad (8)$$

$$Q_{\text{yx}} = G_{\text{м2}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} + KF(t_{\text{пмс2}} - t_{\text{oc}}) + G_{\text{пмс3}} c_{\text{пмс3}} t_{\text{пмс3}} (\text{Дж} / \text{с}). \quad (9)$$

Нарушение теплового баланса на  $\Delta Q$  ведет к изменению температуры масла  $t_{\text{м2}}$ :

$$m_{\text{м}} c_{\text{м}} \frac{dt_{\text{м2}}}{d\tau} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{yx}} (\text{Дж} / \text{с}); \quad (10)$$

$$m_{\text{м}} c_{\text{м}} \frac{dt_{\text{м2}}}{d\tau} = G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} + G_{\text{м1}} c_{\text{м1}} t_{\text{м1}} - KF(t_{\text{пмс2}} - t_{\text{oc}}) - G_{\text{пмс3}} c_{\text{пмс3}} t_{\text{пмс3}} (\text{Дж} / \text{с}), \quad (11)$$

где  $G_{\text{пмс}}$  – расход паромасляной смеси  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ ;



$c_{\text{пмс}}$  – удельная теплоемкость паромасляной смеси  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ ;  
 $G_{\text{m1}}, G_{\text{m2}}$  – расход масла на входе и выходе  $\left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right)$ ;  
 $c_m$  – удельная теплоемкость масла  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ ;  
 $t_{\text{m1}}, t_{\text{m2}}, t_{\text{пмс2}}, t_{\text{пмс3}}, t_{\text{oc}}$  – температуры масла, ПМС и окружающей среды ( $^\circ\text{C}$ );  
 $F$  – площадь поверхности стенок гидростанции ( $\text{м}^2$ );  
**12**  
 $K$  – коэффициент теплопередачи (от паромасляной смеси к окружающей среде)  $\left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$ .

Изменяющиеся параметры:

$$Q_m = f(G_{\text{m1}}, t_{\text{m1}}, t_{\text{пмс2}});$$

$$Q_{yx} = f(G_{\text{m2}}, t_{\text{m2}}, t_{\text{пмс3}}, t_{\text{oc}}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяющимся параметрам), заменив  $\frac{d}{dt}$  на  $p$ :

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{m2}} (m_m c_m p + G_{\text{m2}} c_m) &= \\ &= G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс2}} + \Delta G_{\text{m1}} c_m t_{\text{m1}} + G_{\text{m1}} c_m \Delta t_{\text{m1}} - \Delta G_{\text{m2}} c_m t_{\text{m2}} - \\ &\quad - KF \Delta t_{\text{пмс2}} + KF \Delta t_{\text{oc}} - G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс3}}. \end{aligned} \quad (12)$$

3. Составляем систему уравнений и решаем ее:

$$\Delta t_{\text{пмс2}} = \frac{\Delta G_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} + G_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс2}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс3}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_k t_k - G_{\text{пмс}} c_k \Delta t_k}{m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}} ; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{m2}} (m_m c_m p + G_{\text{m2}} c_m) &= G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс2}} + \Delta G_{\text{m1}} c_m t_{\text{m1}} + G_{\text{m1}} c_m \Delta t_{\text{m1}} - \Delta G_{\text{m2}} c_m t_{\text{m2}} - \\ &\quad - KF \Delta t_{\text{пмс2}} + KF \Delta t_{\text{oc}} - G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс3}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из уравнения (13)  $\Delta t_{\text{пмс2}}$  подставляем в уравнение (14):

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{m2}} (m_m c_m p + G_{\text{m2}} c_m) &= \\ &= \frac{p(\Delta G_{\text{m1}} c_m t_{\text{m1}} m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + G_{\text{m1}} c_m \Delta t_{\text{m1}} m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} - \Delta G_{\text{m2}} c_m t_{\text{m2}} m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + KF \Delta t_{\text{oc}} m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} -}{m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}} \\ &\quad - G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}^2 \Delta t_{\text{пмс3}} m_{\text{пмс}}) - G_{\text{пмс}} c_k \Delta t_k G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + \Delta G_{\text{пмс}} i G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + G_{\text{пмс}} \Delta i G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + \\ &\quad + \Delta G_{\text{m1}} c_m t_{\text{m1}} G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + G_{\text{m1}} c_m \Delta t_{\text{m1}} G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}^2 t_{\text{пмс1}} G_{\text{пмс}} + G_{\text{пмс}}^2 c_{\text{пмс}}^2 \Delta t_{\text{пмс1}} -}{m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}}$$



$$\begin{aligned}
 & \frac{-\Delta G_{M_2} c_M t_{M_2} G_{IMC} c_{IMC} - \Delta G_{IMC} c_{IMC}^2 t_{IMC2} G_{IMC} - \Delta G_{II} c_K t_K G_{IMC} c_{IMC} - \Delta G_{II} i KF -}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & \frac{-G_{II} \Delta i KF - \Delta G_{IMC} c_{IMC} t_{IMC1} KF - G_{IMC} c_{IMC} KF \Delta t_{IMC1} + \Delta G_{IMC} c_{IMC} t_{IMC2} KF + \Delta G_{II} c_K t_K KF +}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & \frac{+ G_{II} c_K \Delta t_K KF - KF \Delta t_{oc} G_{IMC} c_{IMC} - G_{DBC} c_{IMC}^2 \Delta t_{IMC3} G_{IMC}}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Пусть  $A = m_M c_M$ ,  $B = G_{M_2} c_M$ , тогда преобразованное выражение будет иметь вид

13

$$\begin{aligned}
 & \Delta t_{M_2} (A p + B) = \\
 & = \frac{p (\Delta G_{M_1} c_M t_{M_1} m_{IMC} c_{IMC} + G_{M_1} c_M \Delta t_{M_1} m_{IMC} c_{IMC} + G_{tp} c_{tp} \Delta t_{tp1} m_{IMC} c_{IMC} - \Delta G_{M_2} c_M t_{M_2} m_{IMC} c_{IMC} +)}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & + \frac{K F \Delta t_{oc} m_{IMC} c_{IMC} - G_{DBC} c_{IMC}^2 \Delta t_{IMC3} m_{IMC}) - G_{II} c_K \Delta t_K G_{IMC} c_{IMC} + \Delta G_{II} i G_{IMC} c_{IMC} +}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & + \frac{G_{II} \Delta i G_{IMC} c_{IMC} + \Delta G_{M_1} c_M t_{M_1} G_{IMC} c_{IMC} + G_{M_1} c_M \Delta t_{M_1} G_{IMC} c_{IMC} + \Delta G_{IMC} c_{IMC}^2 t_{IMC1} G_{IMC} +}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & + \frac{G_{IMC}^2 c_{IMC}^2 \Delta t_{IMC1} - \Delta G_{M_2} c_M t_{M_2} G_{IMC} c_{IMC} - \Delta G_{IMC} c_{IMC}^2 t_{IMC2} G_{IMC} - \Delta G_{II} c_K t_K G_{IMC} c_{IMC} -}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & - \frac{\Delta G_{II} i KF - G_{II} \Delta i KF - \Delta G_{IMC} c_{IMC} t_{IMC1} KF - G_{IMC} c_{IMC} KF \Delta t_{IMC1} + \Delta G_{IMC} c_{IMC} t_{IMC2} KF +}{m_{IMC} c_{IMC} p + G_{IMC} c_{IMC}} \\
 & + \frac{+ \Delta G_{II} c_K t_K KF + G_{II} c_K \Delta t_K KF - KF \Delta t_{oc} G_{nMC} c_{nMC} - G_{DBC} c_{nMC}^2 \Delta t_{nMC3} G_{nMC}}{m_{nMC} c_{nMC} p + G_{nMC} c_{nMC}}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Передаточная функция — это отношение изображения Лапласа переменной на выходе к изображению Лапласа переменной на входе. В данной статье в качестве выходного параметра принята регулируемая величина  $\Delta t_{M_2}$ .

Рассматриваем канал по управлению:

Изменение конечной температуры масла — изменение расхода греющего пара ( $\Delta t_{M_2} - \Delta G_{II}$ ):

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{M_2} (A p + B) &= \Delta G_{II} (i G_{IMC} c_{IMC} - c_K t_K G_{IMC} c_{IMC} + c_K t_K KF); \\
 \frac{\Delta t_{M_2}}{\Delta G_{II}} &= \frac{i G_{IMC} c_{IMC} - c_K t_K G_{IMC} c_{IMC} + c_K t_K KF}{A p + B} = \frac{k_1}{A p + B}, \quad (17)
 \end{aligned}$$

где  $k_1 = i G_{IMC} c_{IMC} - c_K t_K G_{IMC} c_{IMC} + c_K t_K KF$ .



Рассматриваем канал по возмущению:

1. Изменение конечной температуры масла – Изменение расхода масла ( $\Delta t_{m2} - \Delta G_m$ ):

$$\Delta t_m (Ap + B) = \Delta G_m (c_m t_{m1} m_{pmc} c_{pmc} p + c_m t_{m1} G_{pmc} c_{pmc});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta G_m} = \frac{c_m t_{m1} m_{pmc} c_{pmc} p + c_m t_{m1} G_{pmc} c_{pmc}}{Ap + B} = \frac{T_1 p + k_2}{Ap + B}, \quad (18)$$

где  $k_2 = c_m t_{m1} G_{pmc} c_{pmc}$ ,  $T_1 = c_m t_{m1} m_{pmc} c_{pmc}$ .

14

2. Изменение конечной температуры масла – Изменение начальной температуры масла ( $\Delta t_{m2} - \Delta t_{m1}$ ):

$$\Delta t_m (Ap + B) = \Delta t_{m1} (G_{m1} c_m m_{pmc} c_{pmc} p + G_{m1} c_m G_{pmc} c_{pmc});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{m1}} = \frac{G_{m1} c_m m_{pmc} c_{pmc} p + G_{m1} c_m G_{pmc} c_{pmc}}{Ap + B} = \frac{T_2 p + k_3}{Ap + B}, \quad (19)$$

где  $k_3 = G_{m1} c_m G_{pmc} c_{pmc}$ ,  $T_2 = G_{m1} c_m m_{pmc} c_{pmc}$ .

3. Изменение конечной температуры масла – Изменение расхода паромасляной смеси ( $\Delta t_{m2} - \Delta G_{pmc}$ ):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta G_{pmc} (c_{pmc}^2 t_{pmc1} G_{pmc} - c_{pmc}^2 t_{pmc2} G_{pmc} + c_{pmc} t_{pmc2} KF);$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta G_{pmc}} = \frac{c_{pmc}^2 t_{pmc1} G_{pmc} - c_{pmc}^2 t_{pmc2} G_{pmc} + c_{pmc} t_{pmc2} KF}{Ap + B} = \frac{k_4}{Ap + B}, \quad (20)$$

где  $k_4 = c_{pmc}^2 t_{pmc1} G_{pmc} - c_{pmc}^2 t_{pmc2} G_{pmc} + c_{pmc} t_{pmc2} KF$ .

4. Изменение конечной температуры масла – Изменение начальной температуры паромасляной смеси ( $\Delta t_{m2} - \Delta t_{pmc1}$ ):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta t_{pmc1} (G_{pmc}^2 c_{pmc}^2 - G_{pmc} c_{pmc} KF);$$

$$\frac{\Delta t_{m2}}{\Delta t_{pmc1}} = \frac{G_{pmc}^2 c_{pmc}^2 - G_{pmc} c_{pmc} KF}{Ap + B} = \frac{k_5}{Ap + B}, \quad (21)$$

где  $k_5 = G_{pmc}^2 c_{pmc}^2 - G_{pmc} c_{pmc} KF$ .

5. Изменение конечной температуры масла – Изменение окружающей среды ( $\Delta t_{m2} - \Delta t_{oc}$ ):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta t_{oc} (KF m_{pmc} c_{pmc} p - KFG_{pmc} c_{pmc});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{oc}} = \frac{KF m_{pmc} c_{pmc} p - KFG_{pmc} c_{pmc}}{Ap + B} = \frac{T_3 p + k_6}{Ap + B}, \quad (22)$$

где  $T_3 = K F m_{pmc} c_{pmc}$ ,  $k_6 = -K F G_{pmc} c_{pmc}$ .



6. Изменение конечной температуры продукта – Изменение энталпии греющего пара ( $\Delta t_{m2} - \Delta i$ ):

$$\Delta t_{m2}(Ap + B) = \Delta i(G_n G_{nmc} c_{nmc} - G_n KF);$$

$$\frac{\Delta t_{m2}}{\Delta t_{c1}} = \frac{G_n G_{nmc} c_{nmc} - G_n KF}{Ap + B} = \frac{k_8}{Ap + B}. \quad (23)$$

### Разработка блок-схемы алгоритма управления линии производства металличерепицы

Для разработки программного обеспечения линии производства металличерепицы была разработана блок-схема алгоритма [5], представленная на рисунке 4.

15

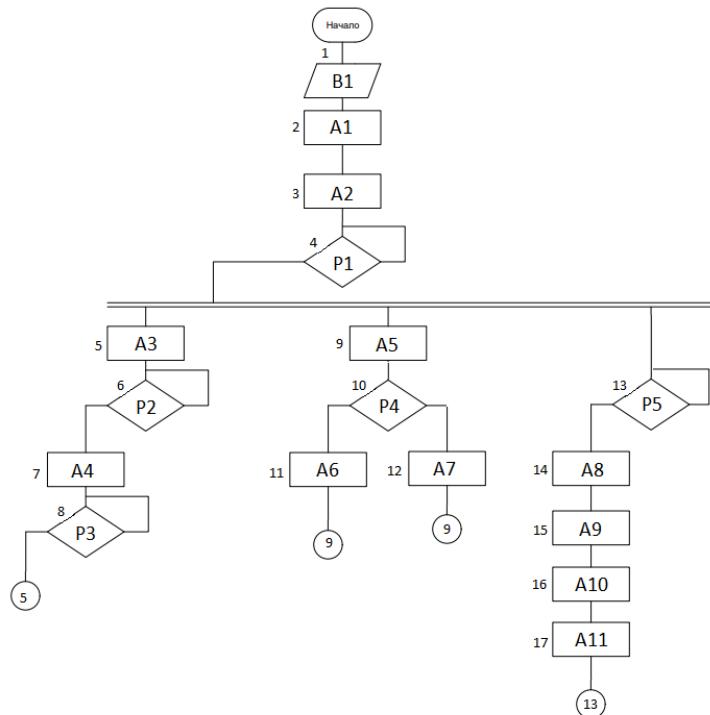


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления линии

После подачи питания в систему оператор вводит необходимые параметры (1). Далее происходит включение разматывателя (2) и включение привода для ввода металла (3). Система готова к запуску в автоматическом режиме. Происходит включение системы автоматического регулирования (4).

Разматыватель выключается (5). Если уровень натяжения металла превышает допустимое значение (6), разматыватель включается снова (7). Далее происходит проверка уровня натяжения металла (8) и, в случае превышения, выключение разматывателя снова (5).



Параллельно с этим происходит продув выходов смазки и подготовка ко включению разбрзгивателя (9). Если стан включен (10), происходит разбрзгивание смазки на металл (11). Данное действие выполняется, пока стан включен. Если стан выключен (10), то подача смазки прекращается (12) и происходит повторная проверка (9).

Стан работает только тогда, когда датчик на выходе показывает, что длина готовой продукции недостаточна (13). Если длины достаточно, стан выключается (14), происходит опускания ножа (15), поднятие ножа (16) и повторное включение стана (17) с возвратом к проверке длины готовой продукции (13).

16

### Разработка программного обеспечения для автоматизированной линии производства металлоочерепицы

В качестве ПЛК для реализации был выбран ПЛК160 от компании «ОВЕН» (рис. 5).



Рис. 5. Программируемый логический контроллер ПЛК160 [6]

На основе блок-схемы алгоритма, представленной в предыдущем разделе, разработано ПО для линии в среде CoDeSyS v2.3.

Были заданы глобальные переменные (рис. 6).

```
Global_Variables
0001 VAR_GLOBAL
0002   Vkluchenie_razmat: BOOL;
0003   Vkluchenie_stanok: BOOL;
0004   NOZH_opuchen: BOOL;
0005   Vkluchenie_privod: BOOL;
0006   Vkluchenie_podachi_smazki: BOOL;
0007   Prodov_vyhodov_smazki: BOOL;
0008   Zadanaya_dlyna: INT;
0009   Tekuschaya_dlyna: INT;
0010   Vkluchenie_sistemy: BOOL;
0011   Auto_rezhim: BOOL;
0012   Ruchnoi_rezhim: BOOL;
0013   SYSTEMA_ON: BOOL;
0014   Kol: INT;
0015   Zadannoe_kolichestvo_detaley: INT;
0016   Sbros: BOOL;
0017 END_VAR
```

Рис. 6. Область описания переменных



На рисунке 7 представлены фрагменты кода программы — соответственно ее начало и конец.

0001	SYSTEMA_ON:=TRUE;
0002	Sbros:=FALSE;
0003	Auto_rezhim:=FALSE;
0004	Ruchnoi_rezhim:=TRUE;
0005	Vkluchenie_razmat:=FALSE;
0006	Vkluchenie_privod:=FALSE;
0007	Vkluchenie_stanok:=FALSE;
0008	NOZH_opuchen:=FALSE;
0009	Produc_vyhodov_smazki:=FALSE;
0010	Vkluchenie_podachi_smazki:=FALSE;
0011	Zadanaya_dlyna:=0;
0012	Tekuschaya_dlyna:=0;
0013	Kolichestvo_detaley:=0;
0014	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0015	IF SYSTEMA_ON=TRUE THEN
0016	IF Sbros=TRUE THEN
0017	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0018	Zadanaya_dlyna:=0;
0019	Kolichestvo_detaley:=0;
0020	Tekuschaya_dlyna:=0;
0021	END_IF
0022	IF Vkluchenie_razmat=TRUE THEN
0023	IF Vkluchenie_stanok=TRUE THEN
0024	Produc_vyhodov_smazki:=TRUE;
0025	timer(IN:= NOT timer.Q, PT:=T#1s );
0026	IF timer.Q
0027	THEN
0028	iReg:=iVar;
0029	END_IF
0030	Produc_vyhodov_smazki:=FALSE;
0031	Vkluchenie_privod:=TRUE;
0032	IF Sbros=TRUE THEN
0033	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0034	Zadanaya_dlyna:=0;
0035	Kolichestvo_detaley:=0;
0036	Tekuschaya_dlyna:=0;
0037	END_IF
0038	END_IF
0039	END_IF
0040	.
0041	IF Auto_rezhim=TRUE THEN
0042	IF Sbros=TRUE THEN
0043	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;

17

*a*

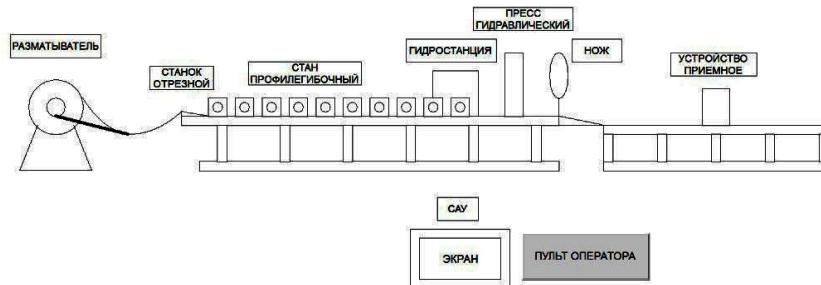
0044	Zadanaya_dlyna:=0;
0045	Kolichestvo_detaley:=0;
0046	Tekuschaya_dlyna:=0;
0047	END_IF
0048	REPEAT
0049	Vkluchenie_razmat:=TRUE;
0050	Vkluchenie_privod:=TRUE;
0051	Vkluchenie_stanok:=TRUE;
0052	IF Tekuschaya_dlyna=Zadanaya_dlyna THEN
0053	Vkluchenie_razmat:=FALSE;
0054	Vkluchenie_privod:=FALSE;
0055	Vkluchenie_stanok:=FALSE;
0056	NOZH_opuchen:=TRUE;
0057	NOZH_opuchen:=FALSE;
0058	Kolichestvo_detaley:=Kolichestvo_detaley+1;
0059	END_IF
0060	UNTIL Kolichestvo_detaley=Zadannoe_kolichestvo_detaley
0061	.
0062	END_REPEAT
0063	IF Sbros=TRUE THEN
0064	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0065	Zadanaya_dlyna:=0;
0066	.
0067	Tekuschaya_dlyna:=0;
0068	END_IF
0069	END_IF
0070	END_IF
0071	.
0072	.
0073	IF Sbros=TRUE THEN
0074	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0075	Zadanaya_dlyna:=0;
0076	Kolichestvo_detaley:=0;
0077	Tekuschaya_dlyna:=0;
0078	END_IF

*б*

Рис. 7. Фрагменты кода программы:  
*а* — начало; *б* — конец



На рисунке 8 показана мнемосхема производственной линии [7].



18

Рис. 8. Мнемосхема производственной линии

Для управления линией с компьютера используется панель оператора, настроенная, как показано ниже на рисунке 9.

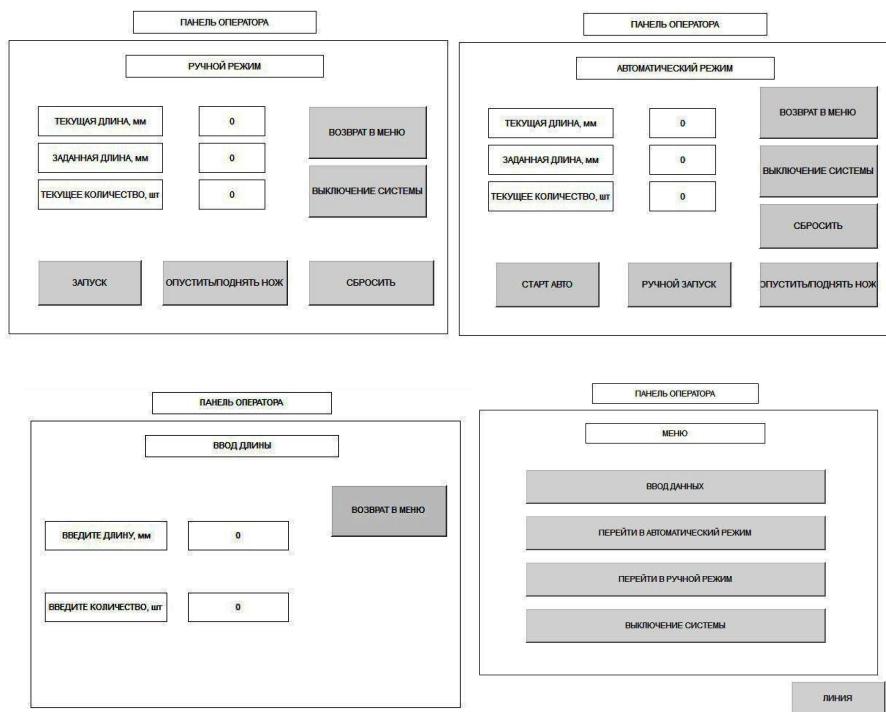


Рис. 9. Фрагменты графического интерфейса панели оператора

Для панели оператора СП310-Р от компании «ОВЕН» был разработан графический интерфейс в специальной программе «Конфигуратор СП300», который дублирует графический интерфейс в среде CoDeSyS v2.3. Внешний вид панели оператора представлен на рисунке 10, полный графический интерфейс для панели оператора – на рисунке 11.



19

Рис. 10. Внешний вид панели оператора

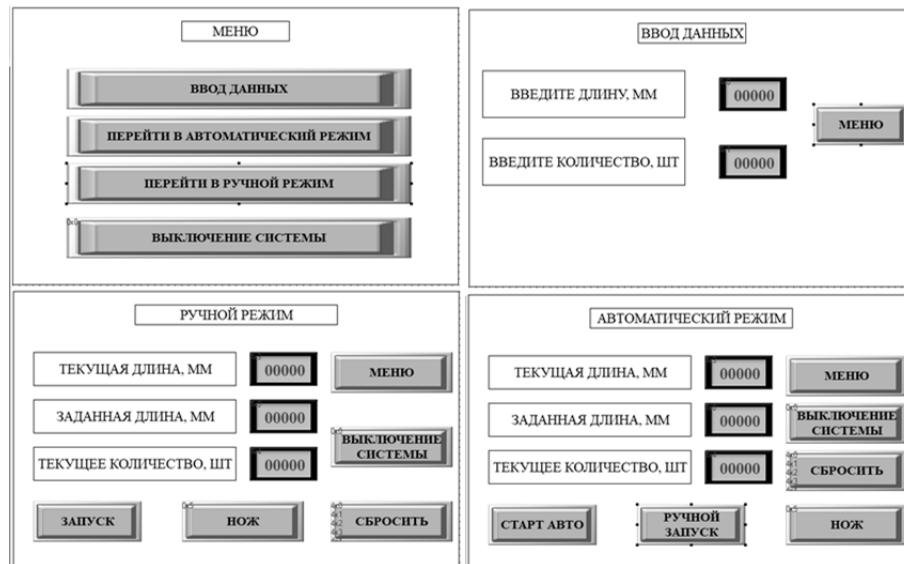


Рис. 11. Полный графический интерфейс для панели оператора

### Выводы

В результате работы была обновлена линия производства металлочерепицы: заменены ПЛК и графическая панель оператора, смоделирован процесс изменения температуры внутри гидростанции, разработано программное обеспечение для обновленной линии. Данные результаты работы полностью удовлетворяют поставленным задачам и могут быть использованы на других линиях.



### **Список литературы**

1. Смазка масляным туманом. URL: <http://for-engineer.info/lubricate/smazka-maslyanym-tumanom.html> (дата обращения: 01.04.2021).
2. Оборудование для производства металличерепицы. URL: <http://znpo.lipetsk.ru/m1.htm> (дата обращения: 02.04.2021).
3. Сердобинцев С.П. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии : учеб. пособие. Калининград, 2006.
4. Будченко Н.С., Коган А.П. Управление техническими системами и процессами : учеб.-метод. пособие по курсовой работе для студентов бакалавриата по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование». Калининград, 2015.
5. ГОСТ 21.404-85. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. Утв. 18.04.1985. М., 1986.
6. ОВЕН. Оборудование для автоматизации : [офиц. сайт]. URL: <http://www.owen.ru/> (дата обращения: 01.04.2021).
7. Оборудование, применяемое в производстве металличерепицы. URL: <https://promzn.ru/stanki-i-oborudovanie/primenyaemoe-v-proizvodstve-metalloccherepitsy.html> (дата обращения: 24.04.2021).

### **Об авторах**

Михаил Андреевич Романов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [mikhail.romanov@baltacademcenter.ru](mailto:mikhail.romanov@baltacademcenter.ru)

Олег Владимирович Толстель — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [tolstel.oleg@mail.ru](mailto:tolstel.oleg@mail.ru)

### **The authors**

Mikhail A. Romanov, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: [mikhail.romanov@baltacademcenter.ru](mailto:mikhail.romanov@baltacademcenter.ru)

Dr Oleg V. Tolstel, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: [tolstel.oleg@mail.ru](mailto:tolstel.oleg@mail.ru)