

## Наблюдаемость и управляемость системы стабилизации уровней расплавленного металла на МНЛЗ

В.А. Кривонос, А.С. Митин

Автоматизация технологических процессов является решающим фактором в повышении производительности труда и улучшении качества выпускаемой продукции. За последнее десятилетие мировой объём разливаемой стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) превысил 60 %. В связи с ростом спроса на стальные изделия российских предприятий промышленного и гражданского строительства, а также потребности в товарной сортовой заготовке за рубежом, в России также существенно возросло количество стали, разливаемой на МНЛЗ. Одновременно с увеличением потребностей в объёмах производства растут требования к качеству непрерывно-литых заготовок [1].

Разливка стали на МНЛЗ, в настоящее время, является наиболее прогрессивным и эффективным способом литья, позволяющим получать высококачественные заготовки и создающим условия для комплексной автоматизации технологического процесса. Упрощенная схема начального участка МНЛЗ приведена на рисунке 1 [2].

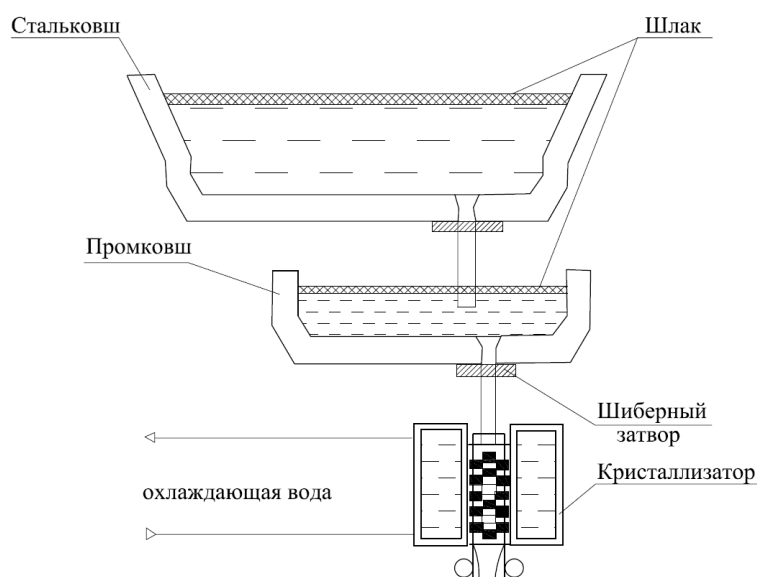


Рис. 1 Схема выпуска металла из кристаллизатора на МНЛЗ

Около 150 тонн металла подается на разливку в стальковше, из которого через шиберный затвор сталь поступает в промежуточный ковш (промковш). Из промковша по четырем ручьям (на схеме показан один), регулируемым шиберными затворами, металл подается в водоохлаждаемые кристаллизаторы, где осуществляется первоначальное формирование твердой поверхности заготовок. Дальнейшая кристаллизация и охлаждение слитка происходит в зонах водного и водо-воздушного охлаждения МНЛЗ.

Для получения слитка с однородной кристаллической структурой, предотвращения образования дефектов в заготовках, необходимо обеспечить высокую точность поддержания оптимального уровня металла в кристаллизаторах. В свою очередь, для обеспечения постоянных гидродинамических условий дозирования металла в кристаллизаторы необходимо стабилизировать уровень металла в промковше. Поддержание постоянного уровня в промковше при непрерывном снижении уровня в стальковше в процессе разливки достигается за счет управления шибером стальковша.

На поверхности расплавленного металла в стальковше находится слой шлака толщиной 0,22 – 0,25 м, который защищает металл от окисления. Выпуск шлака из стальковша крайне не желателен, так как шлак, попавший в промковш, может в дальнейшем поступить в кристаллизаторы, что приводит к дефекту в заготовках. В то же время, слишком раннее прекращение разливки приводит к тому, что довольно большое количество качественного металла вместе со шлаком уходит в отвал. Поэтому, повышение точности оценки уровней металла в стальковше, промковше и кристаллизаторах является актуальной задачей [3].

Процесс разливки стали сопровождается различными вомущающими факторами. К таким факторам относятся «залипание» и «размывание» шиберных затворов. Наибольшее воздействие струя расплавленного металла оказывает на погружные стаканы шиберного затвора, изменяя их геометрию и площадь. Проблема состоит в отсутствии оперативного контроля износа

погружного стакана и изменения площади выпускного отверстия. Явления «размывания» и «залипания» могут оказывать одновременное и поочерёдное воздействие на стакан. Изменение марки разливаемой стали может привести к изменению процессов «залипания» и «размывания» стаканов.

Оперативная информация о текущей степени повреждения шиберного затвора позволяет повысить качество стабилизации оптимальных уровней в промковше и кристаллизаторах за счет компенсации изменения площади выпускного отверстия адекватным перемещением подвижной пластины шибера. Кроме того, такая информация позволяет предотвратить аварийные ситуации за счет своевременной замены погружных стаканов. Поэтому оценка состояния шиберного затвора является важнейшей задачей для системы стабилизации уровней металла [4, 5].

#### **Математическая модель нелинейного наблюдателя состояния**

Для повышения точности оценки уровней металла на МНЛЗ, а также для оперативной оценки степени повреждения шиберных затворов предлагается разработать наблюдатель состояния на основе гидродинамических уравнений истечения жидкости через отверстие:

$$G_{СК}(t) = \mu \cdot S_1(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{1Э}(t)} ; \quad (1)$$

$$G_{ПК}(t) = \mu \cdot \sum_{i=1}^4 S_{2i}(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{2Э}(t)} , \quad (2)$$

где  $G_{СК}(t)$ ,  $G_{ПК}(t)$  – расходы металла из стальнойковша и промковша соответственно, м<sup>3</sup>/мин;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $S_1$ ,  $S_{2i}$  – площади выпускного отверстия шиберного затвора стальнойковша и  $i$  – го шиберного затвора промковша соответственно, м<sup>2</sup>;  $h_{1Э}$ ,  $h_{2Э}$  – значения уровней металла в стальнойковше и промковше, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Изменения уровня металла в стальнойковше, промковше и кристаллизаторе описываются дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$h'_{1\varnothing}(t) = -\frac{G_{CK}(t)}{S_{CK}(h_{1\varnothing})}, \quad (3)$$

где  $S_{CK}(h_{1\varnothing})$  - площадь горизонтального сечения внутренней части стальнойковша на уровне  $h_{1\varnothing}$ , м<sup>2</sup>.

$$h'_{2\varnothing}(t) = \frac{G_{CK}(t) - G_{ПК}(t)}{S_{ПК}(h_{2\varnothing})}, \quad (4)$$

где  $S_{ПК}(h_{2\varnothing})$  - площадь горизонтального сечения внутренней части промковша на уровне  $h_{2\varnothing}$ , м<sup>2</sup>.

$$h'_{3i}(t) = \frac{\mu \cdot S_{2i}(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{2\varnothing}(t)} - v_i(t) \cdot S_{KP}}{S_{KP}}, \quad (5)$$

где  $h_{3i}$  - значение уровня металла в  $i$  - том кристаллизаторе, м;  $v_i$  - скорость разливки металла в  $i$  - том кристаллизаторе, м/мин;  $S_{KP}$  - площадь поперечного сечения кристаллизатора, м<sup>2</sup>.

Использование наблюдателя состояния позволит повысить контроль и оценку параметров системы [6, 7]. На основании уравнений (3) - (5) движения объекта составим систему уравнений, описывающую поведение наблюдателя состояния [8]:

$$x_1(t) = h_{1\varnothing}(t); \quad x_2(t) = h_{2\varnothing}(t); \quad x_{3i}(t) = h_{3i}(t);$$

$$\hat{x}'_1(t) = -\frac{\mu \cdot (u_1(t) + \hat{x}_4(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_1(t)}}{S_{CK}(x_1)} + k_{11} \cdot \Delta x_1(t) + k_{12} \cdot \Delta x_2(t); \quad (6)$$

$$\hat{x}'_2(t) = \frac{\mu \cdot ((u_1(t) + \hat{x}_4(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_1(t)} - \sum_{i=1}^4 (u_{2i}(t) + \hat{x}_{5i}(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_2(t)})}{S_{ПК}(x_2)} + (7)$$

$$+ k_{21} \cdot \Delta x_1(t) + k_{22} \cdot \Delta x_2(t);$$

$$\hat{x}'_{3i}(t) = \frac{\mu \cdot (u_{2i}(t) + \hat{x}_{5i}(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_2(t)} - v_i(t) \cdot S_{KP}}{S_{KP}} + k_{3i} \cdot \Delta x_{3i}(t); \quad (8)$$

$$\hat{x}_4(t) = k_{41} \cdot \Delta x_1(t) + k_{42} \cdot \Delta x_2(t); \quad (9)$$

$$\hat{x}_{5i}(t) = k_{5i} \cdot \Delta x_{3i}(t), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (10)$$

где  $\hat{x}_1(t)$ ,  $\hat{x}_2(t)$ ,  $\hat{x}_{3i}(t)$  - оценка наблюдателем уровня металла в стальнойковше, промковше и  $i$ -ом кристаллизаторе соответственно, м;  $u_1(t)$ ,  $u_{2i}(t)$  -

расчетные площади выпускных отверстий шиберных затворов стальнойша и промковша соответственно при отсутствии повреждений;  $\hat{x}_4(t)$ ,  $\hat{x}_{5i}(t)$  - оценка наблюдателем изменений площадей выпускных отверстий шиберных затворов стальнойша и промковша соответственно за счет явлений «размывания» и «залипания», м<sup>2</sup>. Учитывая, что «размывание» и «залипание» отверстий сталеразливочного стакана протекает достаточно медленно, в модели состояния предполагается, что координаты  $\hat{x}_4(t)$ ,  $\hat{x}_{5i}(t)$  постоянны;  $\Delta x_1(t) = h_{1\ominus}(t) - \hat{x}_1(t)$ ,  $\Delta x_2(t) = h_{2\ominus}(t) - \hat{x}_2(t)$ ,  $\Delta x_{3i}(t) = h_{3i}(t) - \hat{x}_{3i}(t)$  - отклонения оценок наблюдателя от измеренных значений уровней металла в стальнойше, промковше и i-ом кристаллизаторе, м;  $k_{ij}$  - коэффициенты коррекции движения наблюдателя по результатам измерений.

Наблюдатель описывается нелинейными уравнениями. При выборе коэффициентов коррекции  $k_{ij}$  необходимо учитывать следующее:

- необходимо обеспечить сходимость процесса наблюдения в течение всего времени разливки, при любых возможных значениях координат состояния;

- ускорение переходных процессов в наблюдателе приводит, как правило, к повышению чувствительности оценок координат состояния к погрешностям измерения;

- по мере разливки величина  $x_1(t)$  монотонно снижается, что ведет к ускорению переходных процессов в наблюдателе. Поэтому для сохранения высокого качества наблюдения на весь период разливки стальнойша целесообразно изменять коэффициенты  $k_{ij}$  при снижении  $x_1(t)$ .

### **Наблюдаемость системы оценки уровней металла**

Для оценки наблюдаемости системы произведём линеаризацию уравнений (6) - (10) по переменным состояния  $\hat{x}_1$ ,  $\hat{x}_2$ ,  $\hat{x}_{3i}$ ,  $\hat{x}_4$ ,  $\hat{x}_{5i}$ , где  $i = \overline{1,4}$ . Линеаризованное уравнение наблюдателя в матричной форме имеет вид [9]:

$$\begin{aligned}\widehat{X}' &= A \cdot \widehat{X} + B \cdot U + K \cdot (Y - \widehat{Y}), \\ \widehat{Y} &= C \cdot \widehat{X},\end{aligned}\tag{11}$$

где  $X$  и  $\widehat{X}$  - вектор координат состояния и его оценка наблюдателем

соответственно;  $Y = \begin{bmatrix} h_{1\vartheta} \\ h_{2\vartheta} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \\ h_{34} \end{bmatrix}$ ,  $\widehat{Y} = \begin{bmatrix} \widehat{x}_1 \\ \widehat{x}_2 \\ \widehat{x}_{31} \\ \widehat{x}_{32} \\ \widehat{x}_{33} \\ \widehat{x}_{34} \end{bmatrix}$  - вектор выхода и его оценка

наблюдателем;  $U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \\ u_{24} \end{bmatrix}$  - вектор управляющих воздействий;  $B$  - матрица

управления;  $K$  - матрица коррекции движения наблюдателя;  $C$  - матрица состава измерений;  $A$  - собственная матрица движения оценок состояния наблюдателя, образованная соответствующими частными производными от нелинейных слагаемых правых частей уравнений (6) – (10):

$$\frac{\partial F_1}{\partial \widehat{x}_1} = -\frac{\mu \cdot u_1 \cdot g}{S_{CK} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_1}} = -\frac{G_{CK}}{2 \cdot S_{CK} \cdot \widehat{x}_1}; \quad \frac{\partial F_2}{\partial \widehat{x}_1} = \frac{\mu \cdot u_1 \cdot g}{S_{PK} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_1}} = \frac{G_{CK}}{2 \cdot S_{PK} \cdot \widehat{x}_1};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \widehat{x}_1} \dots \frac{\partial F_{11}}{\partial \widehat{x}_1} = 0; \quad \frac{\partial F_1}{\partial \widehat{x}_2} = \frac{\partial F_7}{\partial \widehat{x}_2} \dots \frac{\partial F_{11}}{\partial \widehat{x}_2} = 0;$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \widehat{x}_2} = -\frac{\mu \cdot \sum_{i=1}^4 (u_{2i} + \widehat{x}_{5i}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_2}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2} = \frac{G_{PK}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \widehat{x}_2} = \frac{\mu \cdot (u_{21} + x_{51}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_2}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2} = \frac{G_{KP1}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2};$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial \widehat{x}_2} = \frac{\mu \cdot (u_{22} + x_{52}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_2}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2} = \frac{G_{KP2}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2};$$

$$\frac{\partial F_5}{\partial \widehat{x}_2} = \frac{\mu \cdot (u_{23} + x_{53}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_2}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2} = \frac{G_{KP3}}{2 \cdot S_{KP} \cdot \widehat{x}_2}; \quad \frac{\partial F_6}{\partial \widehat{x}_{54}} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \widehat{x}_2}}{S_{KP}};$$



Таким образом, матрица  $A$  будет иметь вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{210} & a_{211} \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{49} & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{510} & 0 \\ 0 & a_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{611} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В настоящее время на большинстве МНЛЗ оценка уровня происходит косвенным способом при помощи измерения массы ковша с металлом и пересчете показаний в уровень. Уровень металла в кристаллизаторе измеряется при помощи датчиков, чаще всего изотопных. Сформируем матрицу измерений  $C$ , которая будет выглядеть следующим образом:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Произведем оценку наблюдаемости системы. В общем виде матрица наблюдаемости имеет вид [9]:



$$Q_n = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix},$$

где  $n = 11$  – количество наблюдаемых координат состояния.

Для рассматриваемой линеаризованной системы необходимое и достаточное условие наблюдаемости заключается в том, чтобы ранг матрицы  $Q_n$  был равен порядку системы, в данном случае 11.

Найдем определитель матрицы  $Q_{n1}$  размерностью 11x11:

$$\det Q_{n1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{210} & a_{211} \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{38} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{49} & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{510} & 0 \\ 0 & a_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{611} \end{vmatrix} = a_{27} \cdot a_{38} \cdot a_{49} \cdot a_{510} \cdot a_{611} =$$

$$= \frac{\mu^5 \cdot 4 \cdot g^2 \cdot \hat{x}_2^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_2}}{S_{ПК} \cdot S_{КР}^4} \neq 0.$$

При любых реальных значениях  $\hat{x}_2(t)$  определитель матрицы  $Q_{n1}$  не равен нулю, следовательно, ранг рассматриваемой матрицы равен 11, что удовлетворяет условиям наблюдаемости системы. Для того, чтобы процедура наблюдения сходилась, необходимо и достаточно выбрать матрицу  $K$  так, чтобы при любых  $h_{1z}$ ,  $h_{2z}$ ,  $h_{3i}$  собственные числа матрицы  $A - K \cdot C$  располагались в левой полуплоскости комплексной плоскости. При этом характеристическое уравнение системы (11) имеет вид [10]:

$$\det(A - K \cdot C - \lambda \cdot I) = 0.$$

## Управляемость системы оценки уровней металла

В рассматриваемой МНЛЗ можно выделить пять контуров управления уровнями металла:

- контур управлением уровнем металла в промковше;
- четыре контура управления уровнями металла в кристаллизаторах.

Регулируемые уровни металла, в данном случае, описывается уравнениями (7), (8). Произведем линеаризацию системы уравнений (7), (8) по переменным состояния  $x_2, x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}$  и управляющим воздействиям  $u_1, u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}$ . На основе полученных линеаризованных уравнений составим матрицу движения оценок состояния  $A$  и матрицу управления  $B$ .

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_2} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_{31}} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_{32}} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_{33}} & \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_{34}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_2} & \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_{31}} & \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_{32}} & \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_{33}} & \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_{34}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_2} & \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_{31}} & \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_{32}} & \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_{33}} & \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_{34}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_2} & \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_{31}} & \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_{32}} & \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_{33}} & \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_{34}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_2} & \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_{31}} & \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_{32}} & \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_{33}} & \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_{34}} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_2} = -\frac{G_{ПК}}{2 \cdot S_{ПК} \cdot \hat{x}_2}; \quad \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_2} = \frac{G_{КР1}}{2 \cdot S_{КР} \cdot \hat{x}_2}; \quad \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_2} = \frac{G_{КР2}}{2 \cdot S_{КР} \cdot \hat{x}_2}; \quad \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_2} = \frac{G_{КР3}}{2 \cdot S_{КР} \cdot \hat{x}_2};$$

$$\frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_2} = \frac{G_{КР2}}{2 \cdot S_{КР} \cdot \hat{x}_2}; \quad \frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_{3i}} = \frac{\partial F_3}{\partial \hat{x}_{3i}} = \frac{\partial F_4}{\partial \hat{x}_{3i}} = \frac{\partial F_5}{\partial \hat{x}_{3i}} = \frac{\partial F_6}{\partial \hat{x}_{3i}} = 0 \text{ при } i = \overline{1,4}.$$

Тогда матрица  $A$  принимает вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Запишем матрицу управления  $B$  и найдем частные производные по управляющим воздействиям:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_2}{\partial u_1} & \frac{\partial F_2}{\partial u_{21}} & \frac{\partial F_2}{\partial u_{22}} & \frac{\partial F_2}{\partial u_{23}} & \frac{\partial F_2}{\partial u_{24}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial u_1} & \frac{\partial F_3}{\partial u_{21}} & \frac{\partial F_3}{\partial u_{22}} & \frac{\partial F_3}{\partial u_{23}} & \frac{\partial F_3}{\partial u_{24}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial u_1} & \frac{\partial F_4}{\partial u_{21}} & \frac{\partial F_4}{\partial u_{22}} & \frac{\partial F_4}{\partial u_{23}} & \frac{\partial F_4}{\partial u_{24}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial u_1} & \frac{\partial F_5}{\partial u_{21}} & \frac{\partial F_5}{\partial u_{22}} & \frac{\partial F_5}{\partial u_{23}} & \frac{\partial F_5}{\partial u_{24}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial u_1} & \frac{\partial F_6}{\partial u_{21}} & \frac{\partial F_6}{\partial u_{22}} & \frac{\partial F_6}{\partial u_{23}} & \frac{\partial F_6}{\partial u_{24}} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial u_1} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_1}}{S_{ПК}}; \quad \frac{\partial F_2}{\partial u_{21}} = \frac{\partial F_2}{\partial u_{22}} = \frac{\partial F_2}{\partial u_{23}} = \frac{\partial F_2}{\partial u_{24}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_2}}{S_{ПК}};$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial u_{21}} = \frac{\partial F_4}{\partial u_{22}} = \frac{\partial F_5}{\partial u_{23}} = \frac{\partial F_6}{\partial u_{24}} = \frac{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_2}}{S_{КР}}; \quad \frac{\partial F_3}{\partial u_1} = \frac{\partial F_4}{\partial u_1} = \frac{\partial F_5}{\partial u_1} = \frac{\partial F_6}{\partial u_1} = 0;$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial u_{21}} = \frac{\partial F_5}{\partial u_{21}} = \frac{\partial F_6}{\partial u_{21}} = 0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial u_{22}} = \frac{\partial F_5}{\partial u_{22}} = \frac{\partial F_6}{\partial u_{22}} = 0; \quad \frac{\partial F_3}{\partial u_{23}} = \frac{\partial F_4}{\partial u_{23}} = \frac{\partial F_6}{\partial u_{23}} = 0;$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial u_{24}} = \frac{\partial F_4}{\partial u_{24}} = \frac{\partial F_5}{\partial u_{24}} = 0.$$

Таким образом, матрица  $B$  примет вид:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} \end{bmatrix}.$$

Произведем оценку управляемости системы. В общем виде матрица управляемости имеет вид [9]:

$$Q_y = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B].$$

где  $n = 5$  – количество наблюдаемых координат состояния.

Для рассматриваемой линеаризованной системы необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы  $Q_y$  был равен порядку системы, в данном случае 5.

Найдем определитель матрицы  $Q_{y1}$  размерностью  $5 \times 5$ :

$$\det Q_{y1} = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ 0 & b_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} \end{vmatrix} = b_{11} \cdot b_{22} \cdot b_{33} \cdot b_{44} \cdot b_{55} = \frac{4 \cdot \mu^5 \cdot g^2 \cdot \hat{x}_2^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \hat{x}_1}}{S_{ПК} \cdot S_{КР}^4} \neq 0.$$

При любых реальных значениях  $\hat{x}_1(t)$  и  $\hat{x}_2(t)$  определитель матрицы  $Q_{y1}$  не равен нулю, следовательно, ранг рассматриваемой матрицы равен 5, что удовлетворяет условиям управляемости системы.

### Заключение

Рассмотренная система управления уровнями металла в МНЛЗ наблюдаема и управляема на всем временном интервале разливки металла. Использование разработанного нелинейного наблюдателя состояния позволит повысить точность оценки уровней металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах, а также в кристаллизаторах. В свою очередь, это обеспечивает повышение качества стабилизации уровней и способствует своевременному завершению разливки стального ковша, предотвращая попадания шлака в заготовки.

Кроме того, наблюдатель осуществляет оперативную оценку степени повреждения шибберных затворов, что позволяет своевременно производить замену погружных стаканов и предотвращать аварийные ситуации.

### Литература:

1. Глинков Г.М., Маковский В.А. АСУ ТП в чёрной металлургии [Текст] // Учебник для вузов, 2-е изд. Перераб. И доп. М.: «Металлургия», 1999. - 310с.
2. Кривонос В.А., Митин А.С. Повышение точности оценки уровней металла в стальковше и промковше МНЛЗ с использованием нелинейного наблюдателя [Текст] // «Вестник» ВГТУ, Т.6, №4, 2010. – С.41-45.

3. Ya Meng, Brian G. Thomas Heat transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D [Текст] // Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 34B, No. 5, Oct., 2003, pp. 685-705.

4. Кривоносов В.А, Митин А.С. Диагностика повреждений шиберного затвора и повышение точности определения уровней металла в стальковше и промковше МНЛЗ [Текст] // «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика» -2010.- №10.- С.61-64.

5. F.M. Najjar, B.G. Thomas and D.E. Hershey: "Numerical study of steady turbulent flow through bifurcated nozzles in continuous casting" [Текст] // Metall. Mater. Trans. B (USA), 1995, vol. 26B (4), pp. 749-65.

6. Пшихопов В.Х, Медведев М.Ю. Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №2. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2011/431> (доступ свободный) – Загл. экрана. – Яз. рус.

7. Кривоносов В.А., Пирматов Д.С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1754> (доступ свободный) – Загл. экрана. – Яз. рус.

8. Кривоносов В.А., Митин А.С. Регулирование уровней металла в промковше и кристаллизаторах МНЛЗ в условиях «размывания» и «залипания» шиберных затворов [Текст] // Сборник докладов II - й Международной научной заочной конференции (Липецк, 2 октября 2010г.) / Под. ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко.- Липецк: Издательский центр «Де-факто», 2010. - С.41-48.

9. Luenberger D.G. “An Introduction to Observers” [Текст] // IEEE Trans on Automatic Control, Vol AC – 16 №6, Desember, 1971.

10. К. Браммер, Г.Зиффлинг Фильтр Калмана – Бьюси [Текст] // М.: Наука, 1982. - 200 с.

