



*The investigation results of dynamics of the crystallizer swinging mechanism of the slugs continuous casting machine, in which hydroelectric drive is applied, are examined.*

*Д. Н. АНДРИАНОВ, С. М. КАБИШОВ, Белорусский национальный технический университет,  
С. В. КОРНЕЕВ, ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова»*

УДК 621.74.047

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМА КАЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

Качение кристаллизатора используется для снижения силы трения между формирующейся заготовкой и кристаллизатором во время вытягивания заготовки и уменьшения растягивающих напряжений в ее поверхностном слое, вызывающих образование трещин. Кроме того, при изменении направления движения кристаллизатора в твердой оболочке возникают напряжения сжатия, что обеспечивает эффект самозаваривания трещин.

Скорость разливки обусловлена условиями затвердевания металла, а, следовательно, зависит от марки стали, температуры металла и сечения слитка. Частота и амплитуда колебаний кристаллизатора в свою очередь зависит от скорости разливки.

Известно, что неглубокие отметины возникают тогда, когда кристаллизатор колеблется с высокой частотой и относительно коротким ходом, что сокращает время, затрачиваемое на отрицательную реакцию срыва.

В зависимости от скорости разливки сортового металла существующие электромеханические привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ обеспечивают частоту колебаний в диапазоне от 0,8 до 4,2 Гц и амплитуду перемещений от 3 до 6 мм [1]. Одним из возможных путей повышения скорости разливки является выбор оптимальной частоты колебаний, а также изменение амплитуды перемещений кристаллизатора МНЛЗ. Решение этой задачи может быть достигнуто применением электрогидравлического следящего привода (ЭГСП) поступательного перемещения, имеющего обратную связь по перемещению выходного звена привода.

Традиционная конструкция широко используемого электромеханического привода реализована по схеме преобразования вращательного движения вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение кристаллизатора через редуктор с эксцентриковым механизмом, задающим амплитуду качаний, и систему направляющих, обеспечивающих вертикальное перемещение кристаллизатора.

Основными недостатками данного привода являются наличие люфтов в механической передаче и тяжелые условия работы при наличии большой массы качающихся частей (масса стола вместе с кристаллизатором для разливки заготовок сечением 300x400 и 250x300 мм составляет 4–5 т), не позволяющих увеличить частоту качания, а также значительные временные затраты, необходимые на изменение параметров качания кристаллизатора (амплитуда, закон перемещения).

Приведенные выше недостатки устраняются при использовании электрогидравлического привода для качания кристаллизатора, который в настоящее время широко применяется на МНЛЗ ведущих мировых фирм-производителей стального проката.

За основу для исследования динамики механизма качания кристаллизатора была взята конструкция механизма качания кристаллизатора фирмы VAI (Voest-Alpine Industrieanlagenbau, Австрия), разработавшей гидравлическое устройство качания кристаллизатора «Dynaflax» [2], которое может быть установлено в машинах непрерывной отливки слябов, блюмов или сортовых заготовок.

В состав устройства качания «Dynaflax» входит электрогидравлический привод с обратной связью по положению штока гидроцилиндра. В этом устройстве также внедрена система направляющих на пластинчатых пружинах. Объединение гидравлического привода и системы направляющих обеспечивает

высокую степень гибкости при настройке параметров качания (ход, частота, синусоидальная или несинусоидальная кривая качания) в процессе непрерывной разливки.

Существуют также конструкции механизма качания, в которых качанию подвергается непосредственно гильза кристаллизатора, а стол и другое оборудование остаются неподвижными. Например, фирмой «Paul Wurth» (Люксембург) было разработано устройство «Вибромолд» [3], которое представляет собой гильзовый кристаллизатор со встроенным гидравлическим механизмом качания. «Вибромолд» обеспечивает частоту колебаний 0–10 Гц, амплитуду 0–6 мм.

При стандартном режиме качания амплитуда колебаний остается постоянной (по причине сложности ее регулировки), а частота изменяется в сторону увеличения при повышении скорости разливки. При инвертированном режиме имеется возможность изменять амплитуду колебаний одновременно с частотой, поэтому при увеличении скорости разливки частоту уменьшают, а амплитуду повышают, получая при этом необходимую скорость опережения.

Таким образом, электрогидравлический привод может обеспечивать амплитуду колебаний кристаллизатора, равную 1–5 мм и большую частоту колебаний (1–7 Гц), чем электромеханический привод. Причем большей частоте соответствует меньшая амплитуда колебаний.

Необходимая для приведения в действие механизма качания сила складывается из силы инерции движущихся масс, силы трения в кристаллизаторе, гидроцилиндрах и направляющих, а также из позиционной нагрузки при сжатии пружин. Наибольшая инерционная нагрузка имеет место при максимальной частоте колебаний.

Жидкая составляющая гарнисажа, образующегося из поступающего в зазор между слитком и кристаллизатором шлака, служит смазывающей пленкой, обеспечивающей жидкостное трение по площади контакта. При увеличении скорости разливки увеличивается длина зоны жидкого трения и при определенной скорости достигает максимального значения, а далее начинает уменьшаться. Для каждой шлакообразующей смеси существует оптимальная скорость разливки, при которой область жидкостного трения является наибольшей. В зависимости от поступления шлакообразующей смеси в зазор между стенкой кристаллизатора и коркой слитка, а также вязкости расплавленной ШОС реальная сила трения может изменяться в пределах 1–5 кН [4].

Рассмотрим компоновку механизма качания кристаллизатора с двухсторонним симметричным расположением гидроцилиндров. Схема механизма качания приведена на рис. 1.

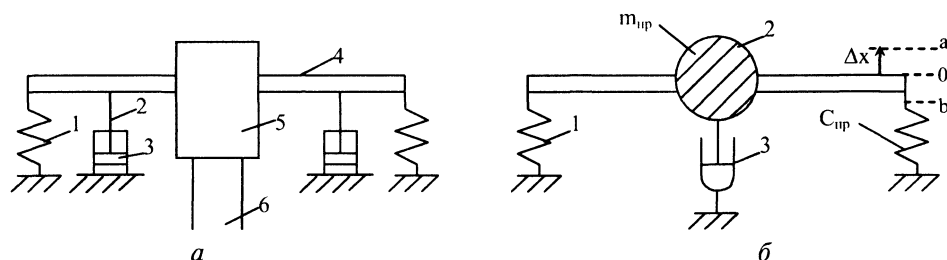


Рис. 1. Схема механизма качания кристаллизатора: а – кинематическая схема механизма качания кристаллизатора (1 – пружина; 2 – шток гидроцилиндра; 3 – поршень гидроцилиндра; 4 – стол качания; 5 – кристаллизатор; 6 – заготовка); б – эквивалентная динамическая схема механизма качания (1 – элемент упругости; 2 – приведенная масса стола и кристаллизатора; 3 – элемент трения)

Функциональная схема гидросистемы для варианта компоновки механизма качания кристаллизатора (см. рис. 1) показана на рис. 2.

С помощью устройства управления 2 (см. рис. 1) происходит генерация сигнала управления определенного напряжения и формы (например, синусоидального). Этому сигналу должно соответствовать определенное перемещение штока гидроцилиндра, которое жестко связано с перемещением стола качания с закрепленным на нем кристаллизатором. Этот сигнал подается одновременно к обоим гидроцилиндрам. Для синхронизации движения гидроцилиндров имеется обратная связь по положению гидроцилиндров, состоящая из датчика фактического положения штока гидроцилиндра 5 и устройства сравнения сигнала обратной связи с задающим сигналом 3. Полученный

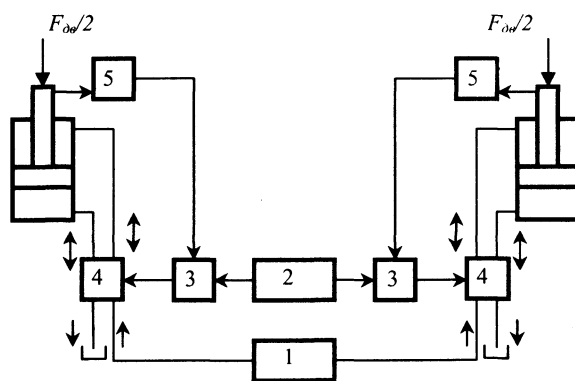


Рис. 2. Функциональная схема гидросистемы механизма качания кристаллизатора с двумя гидроцилиндрами: 1 – гидростанция; 2 – устройство управления; 3 – устройство сравнения; 4 – распределительное устройство; 5 – датчик фактического положения штока гидроцилиндра

на выходе устройства сравнения сигнал рассогласования поступает на катушки электромагнитов распределительных устройств 4, которые могут представлять собой однокаскадный пропорциональный распределитель либо электрогидравлический усилитель с управлением типа «сопло-заслонка-золотник» или «золотник-золотник».

Поток жидкости от гидростанции 1 поступает к распределительному устройству 4 и повторяет на выходе из него усиленный по мощности задающий сигнал.

Структурная схема ЭГСП для одного гидроцилиндра представлена на рис. 3.

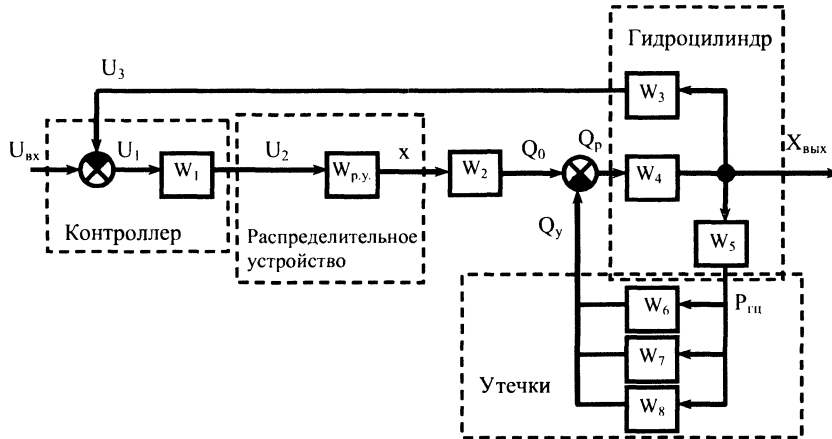


Рис. 3. Структурная схема ЭГСП для одного гидроцилиндра

Передаточные функции отдельных звеньев этой системы имеют вид  
звено усилителя сигнала рассогласования:

$$W_1(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = k_1, \quad (1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – соответственно напряжения на входе и выходе усилителя сигнала рассогласования, В;  $k_1$  – коэффициент усиления усилителя сигнала рассогласования;

звено распределительного устройства:

в качестве распределительного устройства может выступать пропорциональный распределитель или электрогидравлический усилитель (ЭГУ) с соответствующей ему передаточной функцией  $W_{р.у.}(s)$ .  
Нахождение передаточных функций электрогидравлического усилителя типа «сопло-заслонка-золотник» и «золотник-золотник» рассмотрено в [5, 6];

звено преобразования перемещения золотника в расход, поступающий в гидроцилиндр без учета его потерь:

$$W_2(s) = \frac{Q_0(s)}{x(s)} = k_2, \quad (2)$$

где  $Q_0$  – расход жидкости через рабочую щель золотника без нагрузки, м<sup>3</sup>/с;  $x$  – перемещение

золотника управляющего каскада, м;  $k_2 = k_{Qx} = \mu b_y \sqrt{\frac{p_{пит}}{\rho}}$  – коэффициент усиления золотника по

расходу, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $b_y$  – длина кромки рабочего окна золотника, м;  $p_{пит} = p_n - p_{сл}$  – давление питания, Па;  $p_n$  – давление напорное, Па;  $p_{сл}$  – давление на сливе, Па;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

звено сигнала датчика перемещения:

$$W_3(s) = \frac{X_{вых}(s)}{U_3(s)} = \frac{k_3}{T_3 s + 1}, \quad (5)$$

где  $k_3$  – коэффициент усиления сигнала датчика перемещения;  $T_3$  – постоянная времени усилителя сигнала датчика перемещения, с;

звено преобразования полезного расхода  $Q_p$  в перемещение плунжера гидроцилиндра  $X_{вых}$ :

$$W_4(s) = \frac{X_{вых}(s)}{Q_p(s)} = \frac{1}{S_n s}, \quad (3)$$

где  $S_{\Pi}$  – площадь поршня в рабочей полости, м<sup>2</sup>;  
звено нагружения гидроцилиндра:

$$W_5(s) = \frac{p_{гц}(s)}{X_{вых}(s)} = \frac{ms^2 + h_{тр}s + C_{\Sigma}}{S_{\Pi}}, \quad (4)$$

где  $p_{гц}$  – перепад давления нагрузки, Н/м<sup>2</sup>;  $m$  – приведенная масса стола качания и кристаллизатора, кг;  $h_{тр}$  – коэффициент трения, Н·с/м;  $C_{\Sigma}$  – суммарная жесткость пружин, Н/м;  
звено потерь расхода, обусловленных сжимаемостью жидкости:

$$W_6(s) = \frac{Q_6(s)}{p_{гц}(s)} = \frac{S_{\Pi}^2 s}{C_{ж}} = k_6 s, \quad (6)$$

где  $Q_6$  – потери расхода, м<sup>3</sup>/с;  $C_{ж}$  – коэффициент жесткости жидкости, Н/м;  
звено утечек через неуплотненные элементы:

$$W_7(s) = \frac{Q_7(s)}{p_{гц}(s)} = k_7, \quad (7)$$

где  $Q_7$  – потери расхода, м<sup>3</sup>/с;  $k_7$  – коэффициент утечек, м<sup>3</sup>/(Н·с);  
звено потерь расхода в распределителе:

$$W_8(s) = \frac{Q_8(s)}{p_{гц}(s)} = k_8, \quad (8)$$

где  $Q_8$  – потери расхода, м<sup>3</sup>/с;  $k_8$  – коэффициент внутренней проводимости, м<sup>3</sup>/(Н·с);  
Общая передаточная функция структурной схемы будет иметь вид

$$W_{общ}(s) = \frac{x(s)}{U_{вых}(s)} = \frac{W_{п.у.}(s)W_1(s)W_3(s)W_5(s)}{1 + W_{п.у.}(s)W_1(s)W_3(s)W_5(s)W_{10}(s) + W_5(s)W_6(s)W_{12}(s) + W_5(s)W_6(s)W_{13}(s) + W_5(s)W_6(s)W_{14}(s)}. \quad (9)$$

Зависимость амплитуды колебаний выходного звена привода от частоты:

$$A_{общ}(\omega) = \sqrt{\text{Re}(W_{общ}(\omega))^2 + \text{Im}(W_{общ}(\omega))^2}. \quad (10)$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика электрогидравлического привода с пропорциональным распределителем, полученная подстановкой в выражения (9) и (10) соответствующих передаточных функций (1)–(8), представлена на рис. 4, а логарифмическая амплитудная частотная характеристика электрогидравлического привода с ЭГУ типа «сопло–заслонка–золотник» – на рис. 5.

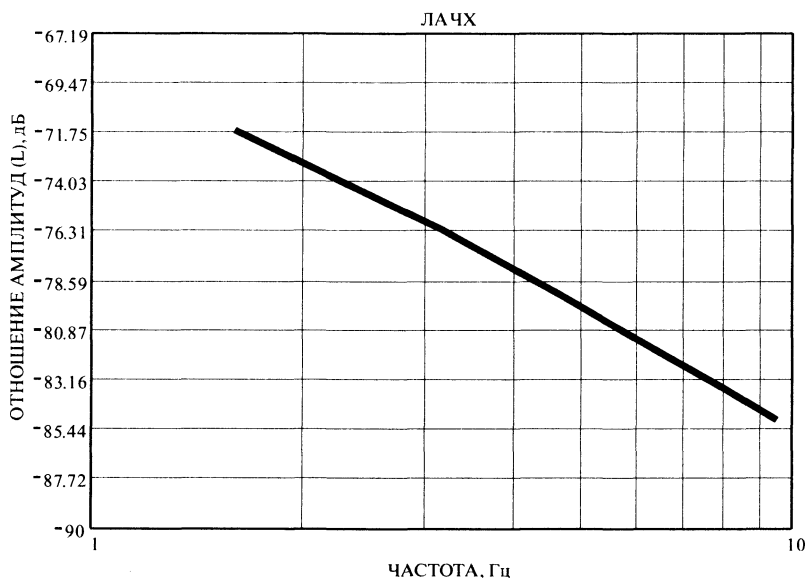


Рис. 4. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика электрогидравлического привода с пропорциональным распределителем

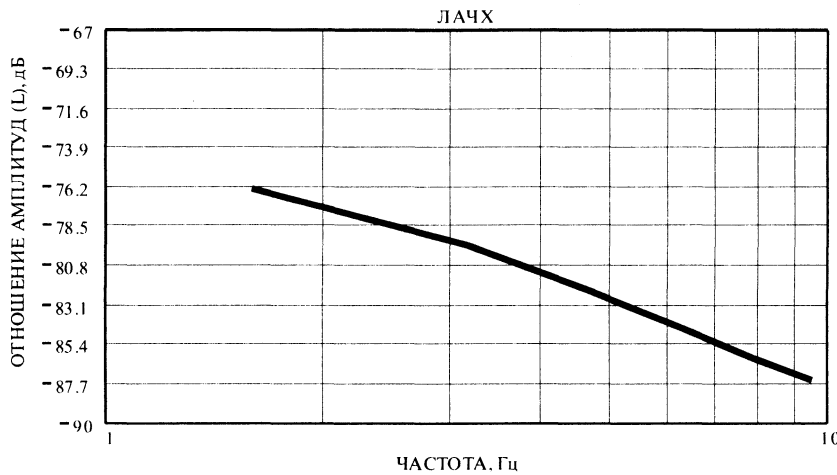


Рис. 5. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика электрогидравлического привода с ЭГУ типа «сопло-заслонка-золотник»

В реальном электрогидравлическом приводе мощность ограничена и поэтому амплитудная частотная характеристика электрогидравлического привода ограничена по частоте. Возможности привода в обеспечении частоты колебаний ограничиваются максимально допустимыми давлением и расходом через распределительный гидроаппарат (пропорциональный распределитель либо ЭГУ). Для выбранных гидрораспределителей при максимально допустимом рабочем давлении 31,5 МПа ограничение по частоте колебаний кристаллизатора составляет 11 Гц.

Из рис. 4, 5 следует, что, несмотря на различия в динамике пропорционального распределителя и электрогидравлического усилителя (спад ЛАЧХ пропорционального распределителя составляет – 15 дБ на уровне 100 Гц, а электрогидравлического усилителя типа «сопло-заслонка-золотник» – 1 дБ на уровне 100 Гц при уровнях входного сигнала 25 %) динамика привода механизма качания в диапазоне частот от 0 до 10 Гц практически одинаковая (максимальная разница в характеристиках составляет 3–4 дБ при спаде ЛАЧХ в –15 дБ).

### Выводы

Динамические свойства привода механизма качания кристаллизатора в основном определяются такими параметрами механизма, как масса перемещаемых частей (кристаллизатор со столом качания) и жесткость пружин, поэтому для улучшения динамики следует стремиться к уменьшению массы подвижных частей. Для обеспечения параметров качания, таких, как максимальная рабочая частота колебаний, равная 7 Гц, и максимальная амплитуда, равная 4 мм, возможно применение в электрогидравлическом следящем приводе в качестве управляющего устройства как пропорционального распределителя, так и электрогидравлического усилителя, причем электрогидравлический следящий привод с электрогидравлическим усилителем имеет практически аналогичные динамические свойства, что и электрогидравлический следящий привод с пропорциональным распределителем, поэтому для механизма качания кристаллизатора возможно использование электрогидравлического следящего привода без применения сервогидравлики.

### Литература

1. Целиков А.И., Полуниин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов В 3-х т. Т.2 Машины и агрегаты сталеплавильных цехов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988.
2. Кель Р., Мервальд К., Пепплъ Й., Тене Х. Освоение устройства качания кристаллизатора Динафлекс на предприятии «Лех-Шталверке» // Сталь. 2001. №2. С. 52–55.
3. Кель Н., Лонарди Э., Шерген П. Гильзовый кристаллизатор высокоскоростных МНЛЗ со встроенным механизмом гидравлического качания Вибромолд // Сталь. 1999. №4. С. 23–26.
4. Ногтев В.П., Юрченко Д.В., Сатосин М.В. Сопоставление эффективности шлакообразующих смесей путем измерения силы трения в кристаллизаторе // Сталь. 1999. №11. С. 25–26.
5. Шагинян А.С., Болотский В.В. Электрогидравлические усилители. Гомель: УО ГГТУ им П.О. Сухого.
6. Болотский В.В., Андрианов Д.Н. Математическое моделирование высокоскоростных МНЛЗ с электрогидравлическим приводом // Литье и металлургия. 2004. №1. С. 30–33.