

*к.т.н. Сотніков О.Л.,  
Родіонов М.О.*

*(ДВНЗ "Донецький національний технічний університет",  
Донецьк, Україна, e-mail: r-n-a@ukr.net)*

## **ВРІВНОВАЖУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ХИТАННЯ КРИСТАЛІЗАТОРА МБЛЗ**

*Розглянуті переваги і недоліки різних способів врівноваження важільного механізму хитання кристалізатора МБЛЗ, а також запропоновані напрями вдосконалення системи врівноваження механізму хитання.*

***Ключові слова:** кристалізатор, система врівноваження, механізм хитання, маховик, контрвантаж, амортизатор.*

*Рассмотрены достоинства и недостатки различных способов уравновешивания рычажного механизма качания кристаллизатора МНЛЗ, а также предложены направления совершенствования системы уравновешивания механизма качания.*

***Ключевые слова:** кристаллизатор, система уравновешивания, механизм качания, маховик, контргруз, амортизатор.*

**Постановка проблеми.** Значне розповсюдження на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) отримав важільний механізм хитання кристалізатора в комплексі з електромеханічним приводом як найпростіший і надійніший щодо конструкції. Такий привод характеризується нерівномірністю обертання вала електродвигуна через коливання рушійного моменту на ньому, які обумовлені механічною характеристикою електродвигуна, коливальним рухом кристалізатора МБЛЗ, що забезпечується механізмом хитання, і динамічним змінним навантаженням, котре виникає в процесі безперервного розливання сталі на МБЛЗ.

Разом з тим, змінне навантаження викликає підвищений знос шарнірних вузлів механізму хитання, що в свою чергу призводить до відхилення параметрів коливального руху кристалізатора і дестабілізації процесу розливання сталі на МБЛЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для усунення даної проблеми розробляються різні методики стабілізації параметрів коливального руху кристалізатора МБЛЗ. Зокрема, існує детальний опис основних параметрів, що забезпечують необхідний закон руху кристалізатора [1],

але немає будь-якої методики їх стабілізації в процесі безперервного розливання. Зменшення коливань швидкості обертання вала електродвигуна приводу механізму хитання може бути досягнуто за рахунок використання спеціальної електронної системи управління [2], але більшого поширення отримали, в силу простоти реалізації, різні типи механічних систем врівноваження механізму хитання [3].

Актуальними є роботи з дослідження впливу таких систем врівноваження механізму хитання на параметри коливального руху кристалізатора МБЛЗ. Так, аналіз результатів обстежень при відновлювальному ремонті важільного механізму хитання кристалізатора сортової МБЛЗ [4, 5], якій обладнано врівноважуючими пневмоамортизаторами, показав, що на "биття" кристалізатора в поперечному і поздовжньому напрямках по відношенню до технологічної осі машини істотно впливає зміна тиску повітря в пневмоамортизаторах. Однак методики завдання тиску повітря в пневмоамортизаторах, особливо з урахуванням технічного стану механізму хитання, в даний час не існує.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є аналіз різних методів врівноваження важільного механізму хитання кристалізатора МБЛЗ для визначення найбільш ефективного з них, а також формування передумов для удосконалення системи врівноваження.

**Виклад основного матеріалу.** З практичного досвіду [3] система врівноваження важільного механізму хитання кристалізатора МБЛЗ (рисунок 1) може бути виконана з використанням:

а) маховика (рисунок 2), що встановлюється на валу електродвигуна;

в) контрвантажа, що встановлюється на вихідній ланці механізму хитання з боку приводу (рисунок 3);

д) пневматичних амортизаторів, що встановлюються під вихідною ланкою механізму хитання з протилежного боку приводу (рисунок 4).

Установка маховика (рисунок 2) дозволяє згладити змінне навантаження на валу двигуна і стабілізувати синусоїдальні коливання механізму хитання при незначних змінах технологічного навантаження.

Момент інерції маховика визначається з розрахунку найбільш повного використання двигуна при відносно помірних розмірах маховика і зазвичай приймається як розрахунковий номінальний момент двигуна

$$M_{ном} = (1,2...1,3)M_{cp},$$

де  $M_{cp}$  – середній момент на валу двигуна за цикл роботи механізму хитання [2].

Зі збільшенням моменту інерції маховика ступінь вирівнювання навантаження на двигуні зростає, максимальне значення рушійного моменту  $M_T$  на валу двигуна за цикл роботи механізму хитання

зменшується, мінімальне значення  $M_T$  збільшується і обидва вони наближаються до середнього значення  $M_{cp}$  [2]. Істотним недоліком використання маховика є розрахунок його моменту інерції без урахування механічної характеристики двигуна [6].

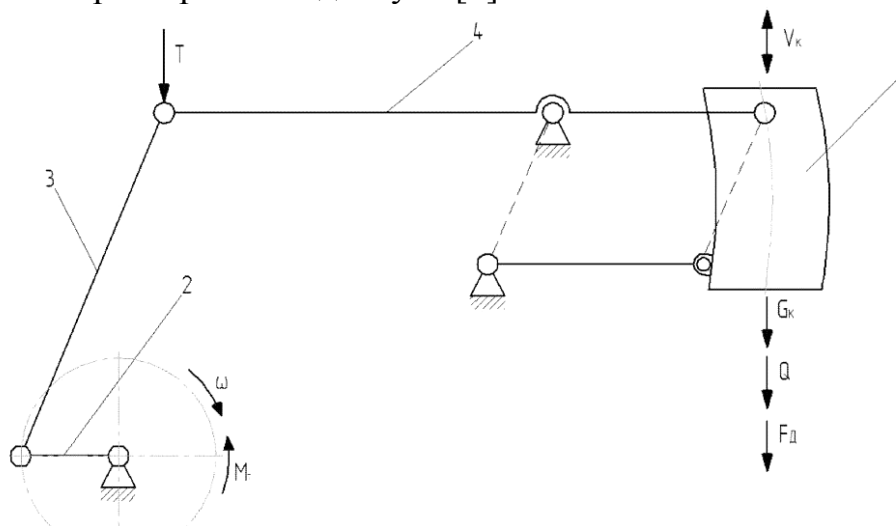


Рисунок 1 – Кінематична схема важільного механізму хитання кристалізатора:

1 – гільза кристалізатора; 2 – кривошип; 3 – шатун; 4 – коромисло;  
 $\omega$  – кутова швидкість кривошипа;  $M_T$  – рушійний момент на кривошипі;  
 $V_k$  – швидкість руху кристалізатора;  $G_k$  – сила ваги кристалізатора;  
 $Q$  – технологічне навантаження;  $F_d$  – динамічне зусилля;  
 $T$  – сумарне зусилля, що діє на шатун

При цьому відсутня можливість зміни врівноважувального впливу у процесі безперервного розливання сталі на МБЛЗ при зміні технологічного навантаження. Регулювання врівноважувального впливу можливе шляхом заміни маховиків, а для цього необхідно мати в розпорядженні комплект маховиків з різними інерційно-масовими параметрами. Крім того, така заміна можлива тільки при зупинках МБЛЗ, що немає сенсу, тому що неможливо передбачити характер зміни технологічного навантаження при подальшому розливанні сталі на МБЛЗ.

Врівноважування механізму хитання кристалізатора за допомогою контрвантажа (рисунок 3) дозволяє зменшити граничне навантаження приводу, дає можливість здійснювати регулювання роботи механізму хитання шляхом зміни маси контрвантажа.

Але можливості регулювання обмежені зміною маси контрвантажа тільки при зупинках МБЛЗ, що також немає сенсу, як і у випадку застосування маховика.

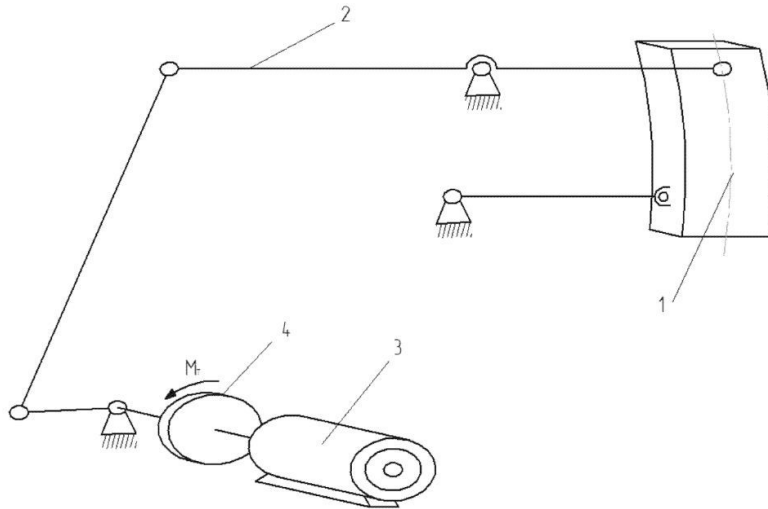


Рисунок 2 – Кінематична схема важільного механізму хитання кристалізатора з врівноваженням за допомогою маховика:  
 1 – гільза кристалізатора; 2 – механізм хитання; 3 – електродвигун;  
 4 – маховик

При правильному виборі маси контрвантажів 3 (рисунок 3) кристалізатор переврівноважується і перед початком розливання завжди займає верхнє положення, що дозволяє здійснити перший рух кристалізатора зверху вниз, що дуже важливо для запобігання проривів металу під кристалізатором і виключає необхідність використання гальма [2].

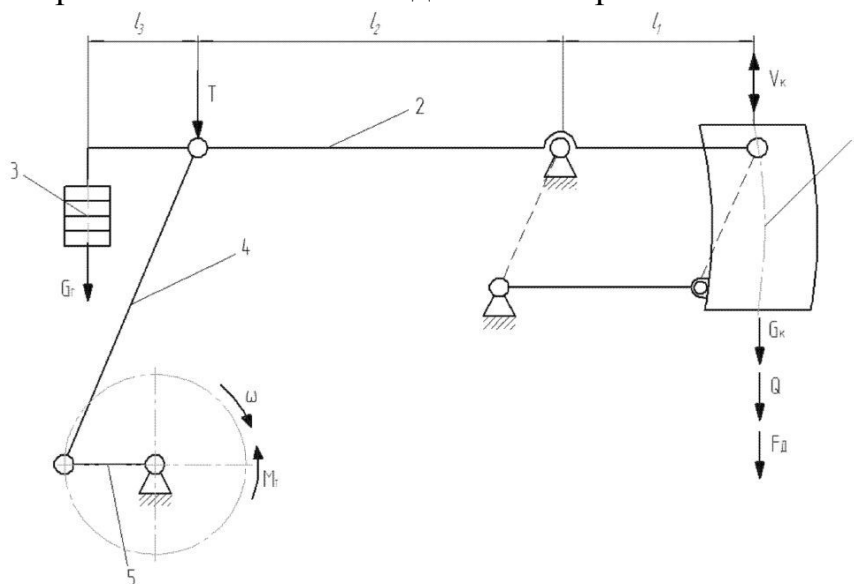


Рисунок 3 – Кінематична схема важільного механізму хитання кристалізатора з врівноваженням за допомогою контрвантажів:  
 1 – гільза кристалізатора; 2 – коромисло; 3 – контрвантаж;  
 4 – шатун; 5 – кривошип

При визначенні сили ваги контрвантажа  $G_2$  враховується характер змін зусиль і моментів, що діють на окремі ланки важільного механізму. Сумарне зусилля  $T$ , що діє на шатун 4, визначається за формулою:

$$T = (G_k + Q + F_d) \frac{l_1}{l_1 + l_2},$$

де  $G_k$  – сила ваги кристалізатора;

$F_d$  – динамічне зусилля;

$l_1$  – плече навантаження, що діє на кристалізатор відносно точки повороту коромисла;

$l_2$  – плече сумарного зусилля  $T$  відносно точки повороту коромисла;

$Q$  – зусилля витягування злитка із кристалізатора.

Момент на приводному валу від зусилля  $T$  і врівноважувального навантаження визначаються з рівності потужностей [7]

$$M_T \omega = \frac{V_k T l_1}{\eta l_2}, \quad M_T = \frac{V_k T l_1}{\eta \omega l_2},$$

де  $M_T$  – момент від сумарного зусилля  $T$ ;

$V_k$  – швидкість кристалізатора;

$\omega$  – кутова швидкість вала двигуна;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії механічної системи.

Момент від врівноважувального навантаження визначається теж з рівності потужностей

$$M_P \omega = G_2 V_k \frac{l_1}{l_2 + l_3}, \quad M_P = \frac{(G_2 V_k) \cdot l_1}{(l_2 + l_3) \omega},$$

де  $l_3$  – плече зусилля  $G_2$ , що створюється контрвантажем.

Найкращим врівноважуванням буде таке, при якому максимальні значення даних моментів, під час підйому і опусканні кристалізатора будуть однаковими.

Умову мінімізації розмаху коливань можна представити у вигляді залежності

$$M_{T.B} - M_{P.B} = M_{P.H} - M_{T.H}, \quad (1)$$

тут і далі індексами "В" і "Н" позначено відповідність моментів  $M_T$  і  $M_P$  напрямку руху кристалізатора – вгору і вниз відповідно:

$$M_{T.B} = \frac{T_B V_{K.B} l_1}{\omega \eta l_2}, \quad M_{P.B} = \frac{G_2 V_{K.B} l_1}{\omega l_2 + l_3},$$

$$M_{T.H} = \frac{T_H V_{K.H} \eta l_1}{\omega l_2}, \quad M_{P.H} = \frac{G_2 V_{K.H} l_1}{\omega l_2 + l_3}.$$

Підставивши значення моментів у формулу (1) і виразив її відносно величини  $G_2$ , отримаємо:

$$G_2 = \frac{\left( \frac{T_B V_{K.B}}{\eta} + T_H V_{K.H} \eta \right) (l_2 + l_3)}{l_2 (V_{K.H} + V_{K.B})}.$$

Незважаючи на зазначені вище труднощі, що пов'язані з врівноважуванням механізму хитання кристалізатора при зміні технологічного навантаження з використанням контрвантажа, дана система врівноваження теоретично дозволяє розробити ряд конструкторських рішень, які спрямовані на зміну врівноважувального впливу у процесі безперервного розливання сталі на МБЛЗ за рахунок зміни не маси контрвантажа, а його положення щодо точки докладання його зусилля.

Найбільш ефективним і найбільш поширеним є врівноважування механізму хитання кристалізатора МБЛЗ за допомогою пневматичних амортизаторів (рисунок 4), що створюють змінне зусилля  $P_y$ , яке збільшується при русі кристалізатора вниз і зменшується при його переміщенні вгору (рисунок 5) [8]. Пневматичні амортизатори дозволяють частково врівноважити сумарну силу ваги ланок механізму хитання і кристалізатора.

Для визначення необхідного врівноважувального зусилля  $P_y$  необхідно враховувати зусилля і моменти, що діють на окремі ланки механізму хитання. Сумарне зусилля  $T$ , що виникає в важільному механізмі, визначається за формулою:

$$T = (G_k + Q + F_\delta) \frac{l_2}{l_3 + l_2},$$

де  $l_2$  – плече навантаження, яке діє на кристалізатор щодо точки повороту коромисла (рисунок 4);

$l_3$  – плече сумарного зусилля  $T$  відносно точки повороту коромисла (рисунок 4).

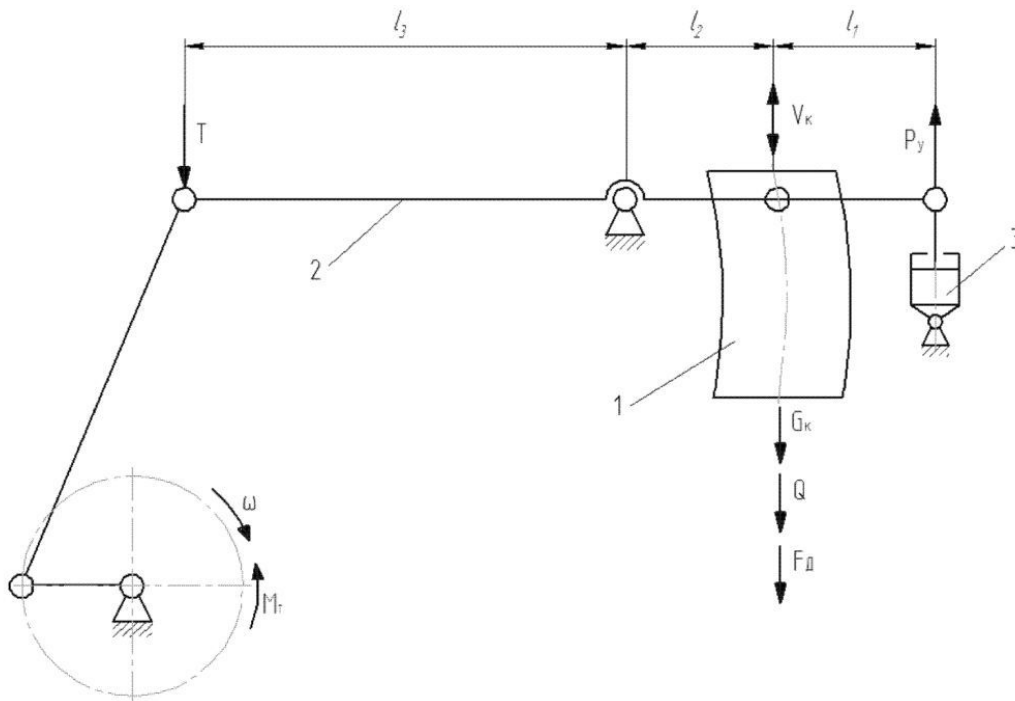


Рисунок 4 – Кінематична схема важільного механізму хитання кристалізатора з врівноваженням за допомогою пневматичного амортизатора:

- 1 – гільза кристалізатора; 2 – механізм хитання;  
3 – пневматичний амортизатор

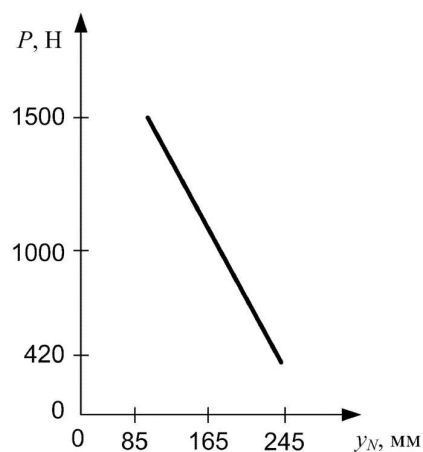


Рисунок 5 – Залежність зусилля, яке створюється пневматичними амортизаторами "Pirelli" H26 механізму хитання, від переміщення кристалізатора МБЛЗ "DANIELY"

Для визначення моментів, що виникають на приводному валу механізму хитання від зусилля  $T$  і врівноважуючого навантаження  $P_y$ , складемо відповідні їм рівності потужностей

$$M_T \omega = \frac{V_K T}{\eta} \frac{l_2}{l_3 + l_2}, \quad M_P \omega = P_y V_K \frac{l_2}{l_1 + l_2}.$$

Моменти на приводному валу від зусилля  $T$  і врівноважувальне навантаження  $P$  відповідно будуть рівні:

$$M_T = \frac{V_K T l_2}{\eta \omega (l_3 + l_2)}, \quad M_P = \frac{P_y V_K l_2}{\omega (l_1 + l_2)}.$$

Умову мінімізації розмаху коливань можна представити аналогічно залежності (1), де моменти будуть рівні:

$$M_{T.B} = \frac{T_B V_{K.B}}{\omega \eta} \frac{l_2}{l_3 + l_2}, \quad M_{P.B} = \frac{P_y V_{K.B}}{\omega} \frac{l_2}{l_1 + l_2},$$

$$M_{T.H} = \frac{T_H V_{K.H} \eta}{\omega} \frac{l_2}{l_3 + l_2}, \quad M_{P.H} = \frac{P_y V_{K.H}}{\omega} \frac{l_2}{l_1 + l_2}.$$

Тоді із залежності (1) отримаємо:

$$P_y = \frac{l_1 + l_2}{l_3 + l_2} \frac{T_B V_{K.B} + T_H V_{K.H} \eta^2}{\eta (V_{K.B} + V_{K.H})}.$$

Основна перевага даної системи врівноваження механізму хитання полягає в можливості регулювання тиску пневмоамортизаторів в залежності від зміни параметрів технологічного навантаження при безперервному розливанні сталі на МБЛЗ. Але на практиці – цим не користуються, вважаючи за краще регулювати тиск амортизаторів тільки при зупинках МБЛЗ стосовно амплітуди коливання і форми одержуваного закону коливального руху кристалізатора, що не враховує всіх фізичних процесів, які виникають у процесі безперервного розливання сталі на МБЛЗ.

**Висновки.** Основний недолік врівноважування механізму хитання кристалізатора МБЛЗ за допомогою маховика і контрвантажа полягає в неможливості регулювання врівноважувального зусилля при зміні технологічного навантаження в процесі безперервного розливання сталі. Так, швидкість витягування злитка із кристалізатора може змінюватися



в процесі розливання – через зміну умов взаємодії злитка з робочими гранями гільзи кристалізатора (обумовлених зміною коефіцієнта тертя), а також маніпуляцій оператора. Маховик не може забезпечити початкової установки кристалізатора у верхньому положенні і робить неможливим регулювання врівноважувального зусилля при зміні технологічного навантаження; врівноважування за допомогою контрвантажа позбавлене цих недоліків, але також передбачає деякі труднощі при регулюванні врівноважувального зусилля, яке безпосередньо залежить від маси встановлюваного контрвантажа. Найбільш ефективною є методика врівноваження механізму хитання за допомогою пневматичних амортизаторів, що дозволяє регулювати врівноважувальне зусилля за рахунок зміни тиску стиснутого повітря в амортизаторах. Головним недоліком даного методу є відсутність однозначної методики визначення залежності врівноважувального зусилля від параметрів механічної системи механізму хитання кристалізатора, включаючи її технічний стан, і технологічне навантаження в процесі лиття заготовок. Розвиток даного методу передбачає розробку складної математичної моделі роботи механізму хитання кристалізатора МБЛЗ з подальшим отриманням ряду необхідних математичних залежностей.

### **Бібліографічний список**

1. Пиксаев А.В. Механизм качания кристаллизатора слябовых МНЛЗ. Конструирование и расчет: монография / А.В. Пиксаев, В.Е. Хребто, Ю.А. Бодяев, К.Н. Вдовин. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 87 с.
2. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. / Ш.М. Марголин. – М.: Металлургия, 1987. – 279 с.
3. Левин М.З. Уравновешивание привода качания кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок / М.З. Левин, Н.Г. Пироженко, Д.А. Дюдкин и др. // Черная металлургия. – 1980. – №4. – С. 152-157.
4. Сидоров В.А. Исследование влияния давления воздуха в пневмоамортизаторах механизма качания на параметры движения кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №4. – С. 15-19.
5. Сидоров В.А. Техническое обслуживание и ремонт механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / В.А. Сидоров, А.Л. Сотников, С.В. Птуха // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – №4. – С. 39-43.
6. Лучинский В.Н. Расчет маховика для установившегося движения машины с электроприводом по заданным  $M_c(\varphi)$ ,  $J(\varphi)$  и  $M_d(\varphi)$  / В.Н. Лучинский, О.И. Кульбачный // Сб. науч. тр. "Исследование по динамике механизмов и машинных агрегатов". Под. общ. ред. А.В. Жели-

говского. – М.: Всесоюзный заочный машиностроительный ин-т, 1969. – С. 4-26.

7. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов; 4-е изд., перераб. и доп. / И.И. Артоболевский. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. – 640 с.

8. Attuatori e sospensioni pneumatiche / Catalog "PIRELLI", 2007. – P. 206-207.

**Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Ульяницким В.Н.**