

## Краткие сообщения

УДК 681.518.3

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОВМЕСТНОЙ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА ДИСКРЕТНОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА

**И.И. Волков, С.В. Фёдоров**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: shade30@gmail.com

*Рассматривается подход к определению совместной плотности распределения дискретного стационарного случайного процесса, позволяющий расширить круг моделей корреляционных функций, параметры которых могут быть правдоподобно оценены, и делающий их оценивание достаточно простым. Это достигается путем специального линейного преобразования случайного процесса в процесс с простым видом корреляционной функции. Предлагается конкретный вид преобразования для трехмерной корреляционной функции. Даются практические рекомендации по реализации предлагаемого подхода для ряда важных случаев: корреляционный анализ, построение моделей взаимосвязи. Приводится ряд алгоритмов и результаты их экспериментального исследования.*

**Ключевые слова:** совместная плотность распределения, правдоподобное оценивание, корреляционная функция.

Известно, что одними из лучших по свойствам оценок являются правдоподобные оценки. Они являются состоятельными, асимптотически нормальными и асимптотически эффективными [1]. Но часто решение задачи их оценивания бывает затруднено в силу того, что для их получения необходима дополнительная информация о законах распределения анализируемых данных и, самое главное, независимости отсчетов. Здесь рассматривается один из подходов, который позволяет упростить решение задачи получения оценок. Это достигается путем специального преобразования выборки, что позволяет построить функцию правдоподобия [2].

Пусть имеем дискретный стационарный центрированный случайный процесс с дисперсией  $D$  и корреляционной функцией:

$$M[\varepsilon_k \varepsilon_v] = \begin{cases} 0; & k \geq v + 2, k \leq v - 2; \\ D\rho; & k = v + 1, k = v - 1. \end{cases} \quad (1)$$

---

*Игорь Иванович Волков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».*

*Сергей Витальевич Федоров, преподаватель кафедры «Информационные технологии».*

Известно [3], что совместная плотность распределения любого центрированного процесса с нормальным законом распределения имеет вид

$$f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma\sqrt{\Delta_N}})^N} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_{ji} \varepsilon_j \varepsilon_i}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;

$\Delta_N$  – определитель нормированной корреляционной матрицы;

$\alpha_{ji}$  – элементы матрицы, обратной нормированной корреляционной.

Наша задача состоит в определении для рассматриваемого случая величин  $\alpha_{ji}$ . Эти величины будем находить из системы уравнений

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{ji} \rho_{ki} = \delta_{ij}, \quad k = \overrightarrow{1, N}, \quad j = \overrightarrow{1, N}. \quad (3)$$

Здесь  $\rho_{ki}$  – элемент нормированной корреляционной матрицы,

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

С учетом выражения (1) для вычисления определителя нормированной корреляционной матрицы получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 1, \\ \Delta_2 &= 1 - \rho^2, \\ \Delta_k &= \Delta_{k-1} - \rho^2 \Delta_{k-2}, \quad k = 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\Delta_k$  – определитель нормированной корреляционной матрицы размерности  $k \times k$ .

На основании этого из системы уравнений (3) находим, что

$$\alpha_{ji} = \sum_{k=i}^N \frac{(-1)^{i+j} \rho^{2k-i-j} \Delta_{i-1} \Delta_{j-1}}{\Delta_k \Delta_{k-1}}, \quad j \leq k. \quad (5)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ji}.$$

Подставив  $\alpha_{ji}$  из соотношения (5) в выражение (2), получим:

$$f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\sigma\sqrt{\Delta_N}})^N} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\Delta_k \Delta_{k-1}} \left( \sum_{i=1}^k (-1)^i \rho^{k-i} \Delta_{i-1} \varepsilon_i \right)^2}. \quad (6)$$

Для примера приводим ряд практически важных случаев:

1) известный случай, когда процессы некоррелированы,  $\rho = 0$ :

$$\Delta_k = 1, \quad k = \overrightarrow{1, N}, \quad \alpha_{ij} = \delta_{ij},$$

$$f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^N} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N \varepsilon_k^2};$$

2) нормированная корреляционная функция  $\rho = \frac{1}{2}$ :

$$\Delta_k = \frac{k+1}{2k}; \quad \alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{2(-1)^{i+j}(N+1-i)j}{N+1}; & i = \overline{1, N}, j \leq i; \\ \frac{2(-1)^{i+j}(N+1-j)i}{N+1}; & i = \overline{1, N}, j > i, \end{cases}$$

$$f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma\sqrt{\frac{N+1}{2N}}\right)^N} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N \frac{2}{k(k+1)} \left(\sum_{i=1}^k (-1)^i i \varepsilon_i\right)^2};$$

3) нормированная корреляционная функция  $\rho = -\frac{1}{2}$ :

$$\Delta_k = \frac{k+1}{2k},$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{2(N+1-i)j}{N+1}; & i = \overline{1, N}, j \leq i; \\ \frac{2(N+1-j)i}{N+1}; & i = \overline{1, N}, j > i, \end{cases}$$

$$f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi}\sigma\sqrt{\frac{N+1}{2N}}\right)^N} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^N \frac{2}{k(k+1)} \left(\sum_{i=1}^k i \varepsilon_i\right)^2}.$$

Рассмотрим применение полученных результатов для параметрического оценивания корреляционной функции стационарного случайного процесса.

Пусть имеется центрированный стационарный случайный процесс  $x_m$  с корреляционной функцией

$$R_k = M[x_m x_{m+k}] = D_x \lambda^k \left( \cos k\varphi + \frac{c(1-\lambda^2)}{2\lambda \sin \varphi} \sin k\varphi \right). \quad (7)$$

Здесь  $D_x$  – дисперсия процесса;

$\lambda, \varphi, c$  – параметры корреляционной функции,  $-1 \leq c \leq 1$ .

Ставится задача правдоподобного оценивания этих параметров. Для этого возьмем выборку значений этого процесса:

$$x_m, \quad m = \overrightarrow{1, N+2}.$$

Из этой выборки сформируем другую [2]:

$$\varepsilon_m = x_{m+2} - 2\lambda \cos \varphi x_{m+1} + \lambda^2 x_m, \quad m = \overrightarrow{1, N}. \quad (8)$$

Процесс  $\varepsilon_m$  удовлетворяет условию (1), где

$$D = D_x(1 - \lambda^2)(1 - 2c\lambda \cos \varphi + \lambda^2), \quad (9)$$

$$\rho = \frac{c(1 + \lambda^2) - 2\lambda \cos \varphi}{2(1 - 2c\lambda \cos \varphi + \lambda^2)}, \quad (10)$$

$$-\frac{1}{2} \leq \rho \leq \frac{1}{2}.$$

Подставив  $\varepsilon_m$  из соотношения (8) в выражение (2), получим функцию правдоподобия, рассматриваемую как функцию четырех параметров:  $D, \rho, \lambda, \varphi$ . Значения этих параметров находятся из условия максимума функции правдоподобия.

По найденному значению  $\rho$  находится

$$c = \frac{2\rho(1 + \lambda^2) + 2\lambda \cos \varphi}{1 + \lambda^2 + 4\lambda \rho \cos \varphi}. \quad (11)$$

При практическом применении удобно для простоты ввести обозначения:

$$\begin{cases} \lambda_1 = 2\lambda \cos \varphi, \\ \lambda_2 = \lambda^2. \end{cases} \quad (12)$$

В этом случае

$$\begin{cases} \varepsilon_m = x_{m+2} - \lambda_1 x_{m+1} + \lambda_2 x_m; \\ D = (1 - \lambda_2)(1 - c\lambda_1 + \lambda_2); \\ \rho = \frac{c(1 + \lambda_2) - \lambda_1}{2(1 - c\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ c = \frac{2\rho(1 + \lambda_2) + \lambda_1}{1 + \lambda_2 + 2\rho\lambda_1}. \end{cases} \quad (13)$$

Предложенный метод, во-первых, расширяет круг моделей корреляционных функций, параметры которых могут быть правдоподобно оценены, и, во-вторых, делает их оценивание достаточно простым. Такой подход может быть применен не только для корреляционного анализа, но и для построения различных моделей взаимосвязи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крамер Г. Математические методы статистики. – М., 1975. – 648 с.
2. Батищев В.И., Волков И.И., Федоров С.В. О правдоподобном оценивании параметров корреляционных функций // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-

- 2012): Материалы III Международной научно-технической конференции. Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2012. – С. 303-307.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1966. – 680 с.

*Статья поступила в редакцию 10 февраля 2014 г.*

## **ON THE DETERMINATION OF A JOINT DENSITY FUNCTION FOR ONE CLASS OF DISCRETE STOCHASTIC PROCESSES**

***I.I. Volkov, S.V. Fedorov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*We consider an approach to the determination of the joint density. It allows to extend range of the correlation function models, the parameters of which can be estimated with maximum likelihood estimation, and make their estimation simple enough. This is achieved by a special linear transformation of the stochastic process into the process with a simple form of the correlation function. Concrete conversion type for correlation function with three dimensions is considered. Practical recommendations for the implementation of proposed approach are given for a number of important cases: correlational analysis, modeling of relationship. Finally, a number of algorithms and the results of experimental research are considered.*

***Keywords:*** joint density, maximum likelihood estimation, correlation function.

---

*Igor I. Volkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Sergey V. Fedorov, Teacher.*

УДК 681.514

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНО-ОПУСКНЫМИ ВОРОТАМИ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

*И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков, Е.В. Мельников*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: idanilushkin@mail.ru

*Исследуется система автоматического управления подъемно-опускными воротами судоходного шлюза. В качестве объекта управления выступает положение ворот при подъеме и опускании. Система должна обеспечивать перемещение ворот с минимальным перекосом. Приведено краткое описание технологической установки, структура системы управления, экспериментальные данные. Выполнен спектральный анализ сигналов, присутствующих в системе. Разработан полосно-заграждающий фильтр, обеспечивающий снижение влияния помех на формирование управляющего воздействия. Выполнено численное исследование фильтра, сделан вывод о его применимости.*

**Ключевые слова:** *подъемно-опускные ворота, судоходный шлюз, система автоматического управления, спектральный анализ, полосно-заграждающий фильтр, фильтр Баттерворта.*

На верхних головах судоходных шлюзов в ряде случаев используются плоские ворота, с независимым электрогидравлическим приводом каждой из сторон. Подъем ворот осуществляется путём нагнетания масла в нижнюю полость цилиндра, опускание – за счёт стравливания масла из нижней полости. Нагнетание масла осуществляется гидронасосами с электроприводом. При этом должна быть решена задача синхронизации положения сторон подъемно-опускных ворот. К системе синхронизации применяются жёсткие требования по предельно допустимому перекоосу.

В рамках реконструкции шлюзов №25 и №26, находящихся в Балаковском районе гидротехнических сооружений и судоходства, было проведено оснащение верхних рабочих ворот современной системой автоматического управления. Для реализации системы управления электроприводы гидронасосов были оснащены преобразователями частоты, проведена замена датчиков положения ворот инкрементальными энкодерами, с разрешением 0,1 мм/имп. Система автоматического управления реализована на базе программируемых логических контроллеров серии М340 компании Шнейдер Электрик. Каждая сторона работает под управлением отдельного контроллера. Между контроллерами и преобразователями частоты реализован обмен данными по сети Ethernet. Номинальная скорость перемещения ворот при подъеме – 40 мм/с. При этом предельно допусти-

---

*Данилушкин Иван Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».*

*Колпащиков Сергей Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».*

*Мельников Евгений Вячеславович (к.т.н.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».*

мый рабочий перекося ворот составляет 60 мм. Такие характеристики объекта предъявляют жёсткие требования к построению системы автоматического управления синхронизацией.

Система автоматического управления перемещением каждой из сторон строилась по следующему принципу. При подаче команды на подъём ворот, электропривод включался на номинальную скорость вращения – 980 об/мин. В случае опережения управляемой стороной противоположной стороны, скорость вращения снижается пропорционально рассогласованию. Структурная схема регулятора представлена на рис. 1. Здесь  $L_1(p)$ ,  $L_2(p)$  – изображение по Лапласу сигнала положения управляемой и противоположной сторон ворот соответственно,  $W_{OY}(p)$  – передаточная функция объекта управления, учитывающая динамику преобразователя частоты, электропривода и гидравлической системы.

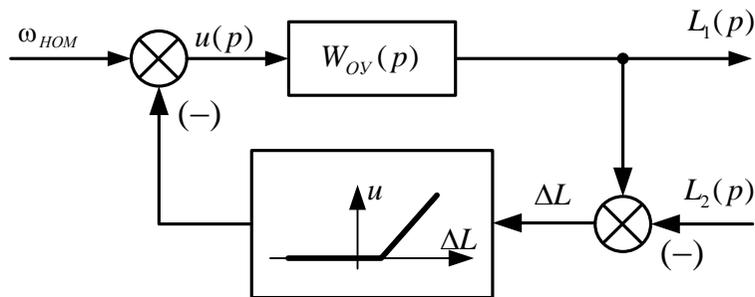


Рис. 1. Структурная схема регулятора

В идеальном случае электроприводы обеих сторон ворот вращаются с номинальной частотой, обе стороны ворот перемещаются с одинаковой скоростью. Зона нечувствительности в нелинейном элементе введена для уменьшения случаев изменения скорости вращения двигателя, поскольку это неблагоприятно сказывается на состоянии оборудования и приводит к преждевременному износу. Регулирование динамической величины перекося осуществляется за счёт задания крутизны наклона нелинейной характеристики, при этом увеличение крутизны также неблагоприятно сказывается на оборудовании гидросистемы.

После запуска системы автоматического управления в эксплуатацию были получены экспериментальные характеристики системы. Регистрация данных проводилась с максимально возможной скоростью – в каждом рабочем цикле контроллера. Средняя длительность цикла контроллера составила 50 мс.

Обнаружено, что перемещение каждой из сторон ворот происходит рывками. Фрагмент графика перемещения стороны ворот приведён на рис. 2.

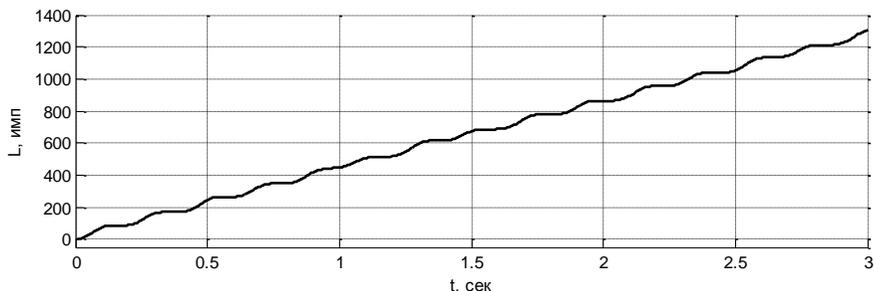


Рис. 2. Фрагмент графика перемещения стороны ворот

Такое поведение объекта управления связано с тем, что гидравлическая система выступает в качестве колебательного контура [1]. Для решения задачи снижения влияния этих колебаний на работу системы автоматического управления, было проведено исследование сигналов, циркулирующих в системе во время работы. Спектр сигнала перемещения, снимаемого с выхода системы,  $L_1(p)$ , после вычета из него постоянно возрастающей компоненты представлен на рис. 3.

Сигналу присущи гармонические составляющие на частотах 2,5 Гц и 5 Гц. Эти составляющие обусловлены конструкцией маслонасоса и скоростью вращения электродвигателя. Для анализа влияния периодического сигнала на формирование управляющего воздействия, построена спектральная характеристика управляющего сигнала  $u(p)$ , сформированного регулятором на опережающей стороне. На рис. 4. приведён график соответствующий диапазону частот от нуля до трёх Герц. Далее график стремится к нулю.

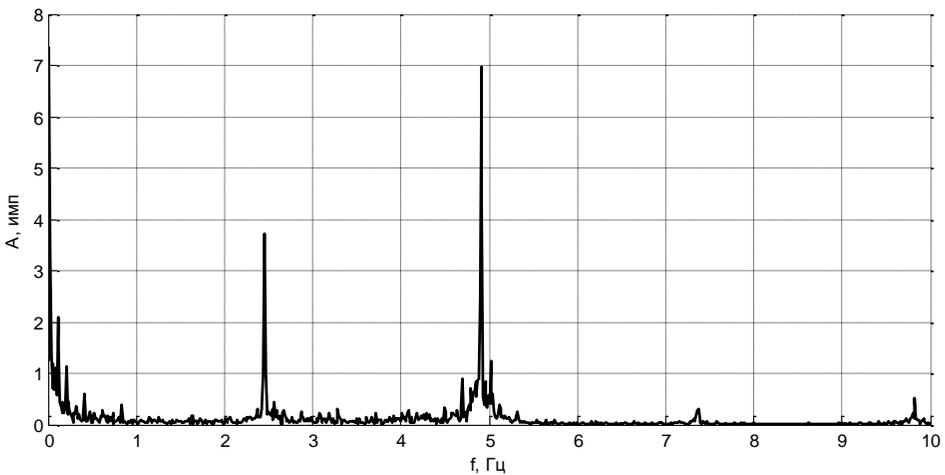


Рис. 3. Спектр сигнала помехи перемещения стороны ворот

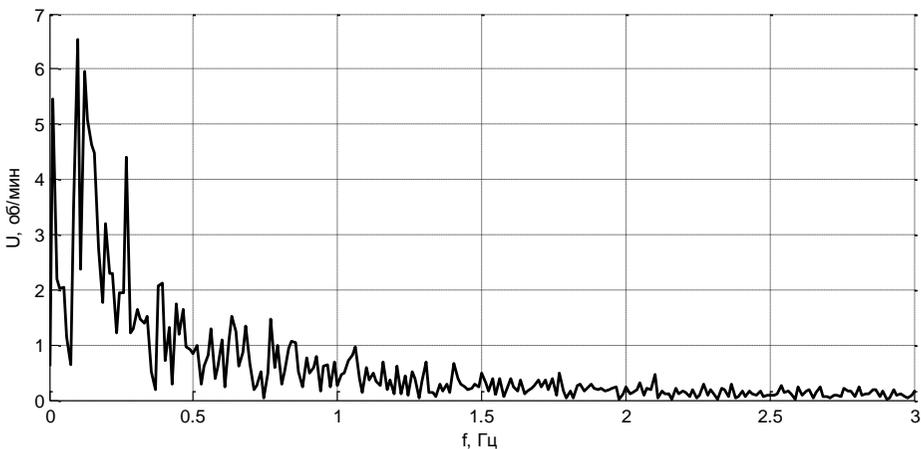


Рис. 4. Спектр управляющего сигнала

График, представленный на рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что высокочастотные помехи с частотой более двух Герц на формирование управляющего сигнала не влияют. В то же время, желательно уменьшить влияние помех с частотами от 0,1 до 0,5 Гц.

Для снижения влияния помех в среде Matlab [2] проведён синтез полосно-заграждающего фильтра Баттерворта шестого порядка с частотами 0,02 и 0,4 Гц. Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на рис. 5.

При пропускании сигнала положения ворот через полосно-заграждающий фильтр, колебательность сигнала снижается, однако появляется ожидаемое «отставание» сигнала от реального (рис. 6, 7). Максимальное отставание при вычислительных экспериментах с реальными данными составило 97 имп., что соответствует примерно 10 мм. При эксплуатации экспериментальной системы с зоной нечувствительности установленной в 5 мм, максимальное зарегистрированное рассогласование составляет 18 мм, что намного меньше предельно допустимого 60 мм.

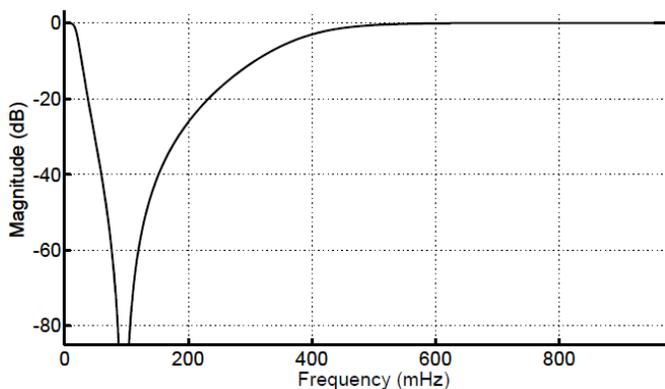


Рис. 5. АЧХ полосно-заграждающего фильтра

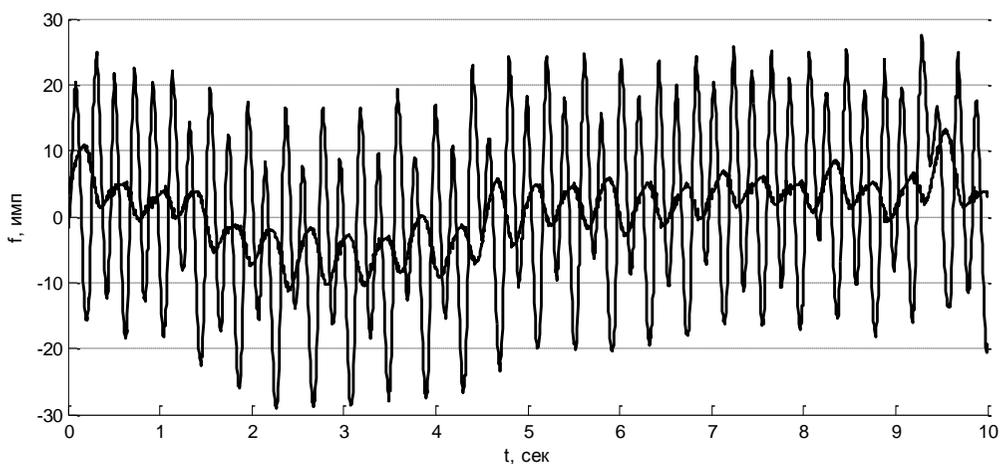


Рис. 6. Помеха в исходном сигнале и после фильтрации

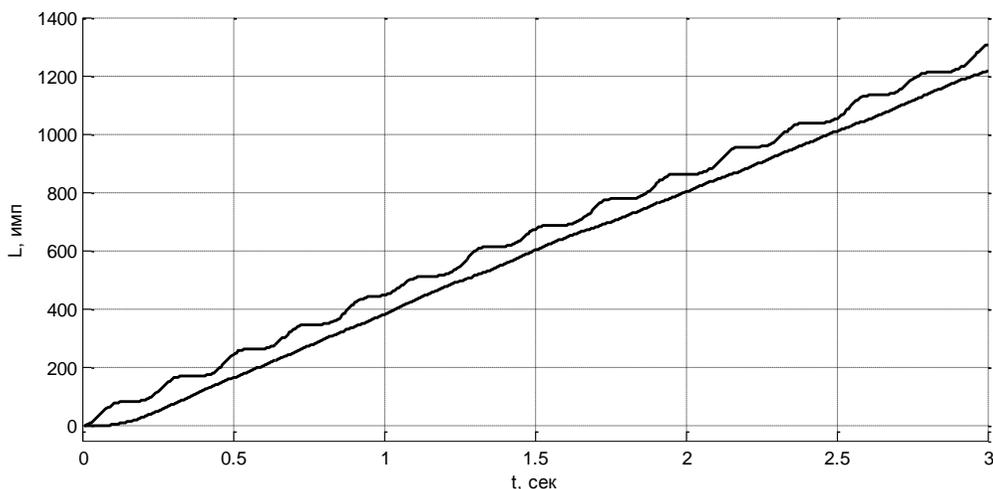


Рис. 7. Исходный сигнал по положению и после фильтрации

Разработанный полосно-заграждающий фильтр позволит снизить амплитуду колебаний управляющего сигнала, что приведёт к повышению ресурса оборудования, сохранив значение перекоса ворот в допустимых пределах. Дополнительный запас по значению перекоса может быть получен за счёт установки в нуль величины зоны нечувствительности нелинейного элемента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрогидравлические следящие системы/ Под ред. В.А. Хохлова.– М.: Машиностроение, 1971.– 432 с.
2. Черных И.В. SIMULINK: Среда создания инженерных приложений/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Потемкина.– М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.– 496 с.

Статья поступила в редакцию 15 января 2014 г.

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF LOCK GATE MOVEMENT

**I.A. Danilushkin, S.A. Kolpaschikov, E.V. Melnikov**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*The automatic control system of lock gate movement is studied. The gate position during lifting and lowering is a plant. The system should provide the movement with a minimum alignment error. The paper contains a brief description of the equipment, the structure of the control system, the experimental data. The spectral analysis of signals present in the system is performed. Designed band-stop filter reduces the impact of noise on the formation of the control signal. A numerical study of the filter concludes its applicability.*

**Keywords:** lock gates, shipping lock, automatic control system, spectral analysis, band-stop filter, Butterworth filter.

---

*Ivan A. Danilushkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Sergey A. Kolpaschikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Evgeny V. Melnikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 62-83

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

*В.П. Курган, А.А. Панкин*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: pankinaa@yandex.ru

*Современный электропривод представляет собой замкнутую систему управления, в которую, как правило, обязательным элементом входит контур регулирования тока. Он необходим в структуре типового электропривода для ограничения тока и момента двигателя на уровне допустимых значений в переходных режимах пуска, торможения и действия момента нагрузки. В статье предложена система регулирования момента электропривода постоянного тока, которая обеспечивает стабилизацию заданного момента двигателя в переходном и установившемся режимах скорости электропривода, в результате того, что момент нагрузки создается электрической машиной, которая соединена с валом электропривода и работает в режиме динамического торможения. Поэтому предлагаемая электрическая схема обеспечивает стабилизацию заданного тока двигателя, имитируя процесс натяжения перематываемого материала и в этом случае нет необходимости в использовании сложной технологической установки с устройствами перемотки.*

**Ключевые слова:** регулятор тока, устройство натяжения, динамическое торможение, стабилизация момента, датчик тока, устройство перемотки.

Регулирование момента двигателей является одной из наиболее общих функций автоматизированного электропривода [1].

Необходимость использования момента в качестве главной регулируемой координаты системы управления диктуется предъявляемыми к электроприводам техническими и технологическими требованиями, когда они используются, например, в системах перемотки и натяжения нити, ленты или полосы; вращают барабаны или шпули, с устройством натяжения, принимающие проволоку или ленту после обработки [2].

В настоящее время электромеханические системы управления моментом реализуются с помощью замкнутой системы с регулятором тока.

Электрическая схема системы стабилизации тока и момента электропривода постоянного тока представлена на рис. 1.

Она состоит из задатчика тока ЗТ (момента), датчика тока якоря ДТ, регулятора тока РТ, управляемого силового преобразователя УСП, двигателя постоянного тока независимого возбуждения М, который соединен с валом нагрузочной электрической машины постоянного тока G, якорь которой замкнут на регулируемое тормозное сопротивление  $R_T$ . Ток якоря  $I_{Я1}$  двигателя М контролируется

---

*Владимир Павлович Курган (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».*

*Алексей Александрович Панкин, ассистент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».*

по амперметру PA, а скорость двигателя  $\omega$  - по прибору PV, подключенному к тахогенератору BR.

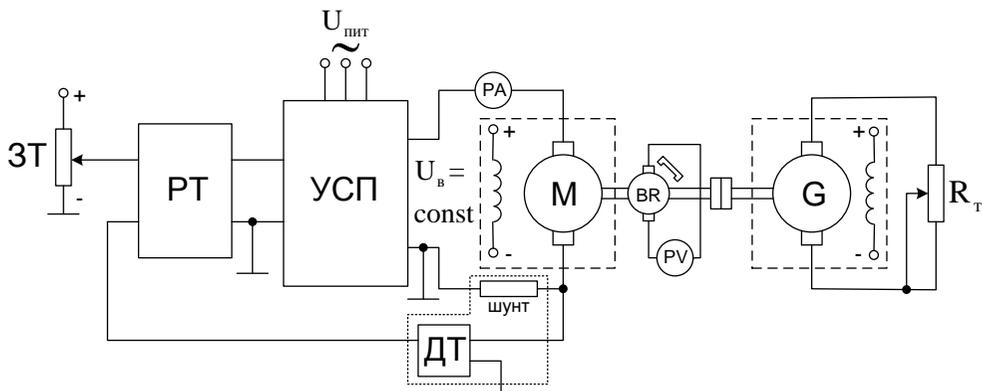


Рис.1. Электрическая схема системы стабилизации тока и момента электропривода постоянного тока

Система стабилизации момента функционирует следующим образом:

При подаче с задатчика тока ЗТ управляющего напряжения на вход регулятора РТ, начинается возрастание тока и скорости и с датчика тока ДТ поступает на другой вход регулятора тока РТ сигнал отрицательной обратной связи по току. При этом нагрузочная машина G находится в режиме динамического торможения, поэтому пропорционально скорости будет увеличиваться её ток якоря и момент нагрузки - торможения, так как её якорь замкнут на регулируемое тормозное сопротивление  $R_T$ . Изменение скорости происходит до тех пор пока момент двигателя  $M_1$  и момент нагрузки  $M_2$  электрической машины G не уравновесят друг друга. В результате чего наступит установившийся режим скорости, при этом контур тока продолжает стабилизировать ток якоря на заданном уровне.

Структурная схема системы стабилизации момента электропривода постоянного тока представлена на рис.2. Контур тока настроен по традиционной методике на технический оптимум с ПИ – регулятором тока.

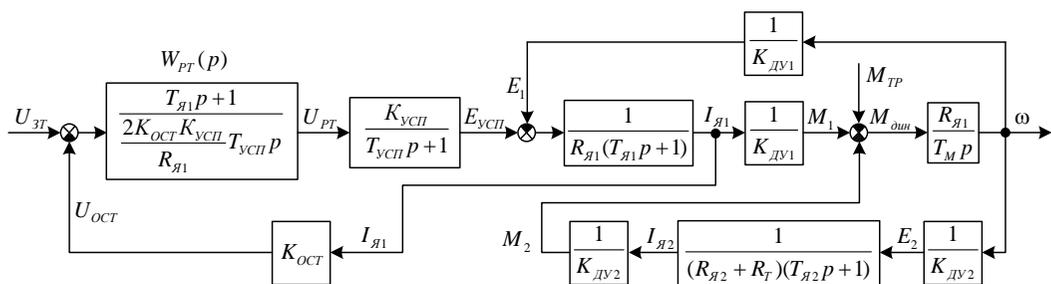


Рис.2. Структурная схема системы стабилизации момента электропривода постоянного тока

На структурной схеме введены следующие обозначения:  
 $T_{Я1}$  – электромагнитная постоянная времени двигателя М;  
 $R_{Я1}$  – активное сопротивление якорной цепи двигателя М;  
 $K_{ОСТ}$  – коэффициент передачи обратной связи по току;  
 $K_{УСП}$  – коэффициент передачи управляемого силового преобразователя;  
 $T_{УСП}$  – постоянная времени управляемого силового преобразователя;  
 $K_{ДУ2}$  – коэффициент передачи нагрузочной электрической машины G по управляющему воздействию;  
 $K_{ДУ1}$  – коэффициент передачи двигателя М по управляющему воздействию;  
 $T_M$  – электромеханическая постоянная времени двигателя;  
 $T_{Я2}$  – электромагнитная постоянная времени нагрузочной электрической машины G;  
 $R_T$  – активное тормозное сопротивление;  
 $R_{Я2}$  – активное сопротивление якорной обмотки нагрузочной электрической машины G.

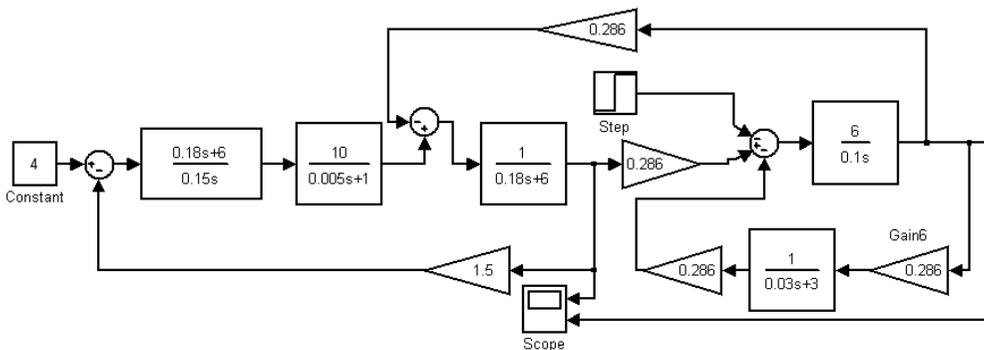


Рис.3 Динамическая модель системы стабилизации момента электропривода постоянного тока

Использование электрической машины G в режиме динамического торможения в качестве источника нагрузочного момента, обладает тем достоинством, что в этом случае между скоростью вращения  $\omega$  и моментом торможения  $M_2$  существует прямо – пропорциональная зависимость.

Для анализа переходных процессов тока и скорости системы стабилизации момента электропривода постоянного тока была собрана динамическая модель в программном обеспечении Matlab, которая представлена на рис. 3.

В результате ее исследования были получены переходные процессы тока  $I_{Я1}$  и скорости  $\omega$  по управляющему воздействию рис. 4,а и по возмущающему воздействию на рис. 4,б.

Из переходных процессов на рис. 4 следует, что рассматриваемая система регулирования обеспечивает стабилизацию заданного момента двигателя в переходном и установившемся режимах скорости электропривода постоянного тока, имитируя процесс натяжения перематываемого материала и в этом случае нет необходимости в использовании сложной технологической установки с устройствами перематки нити, ленты или полосы.

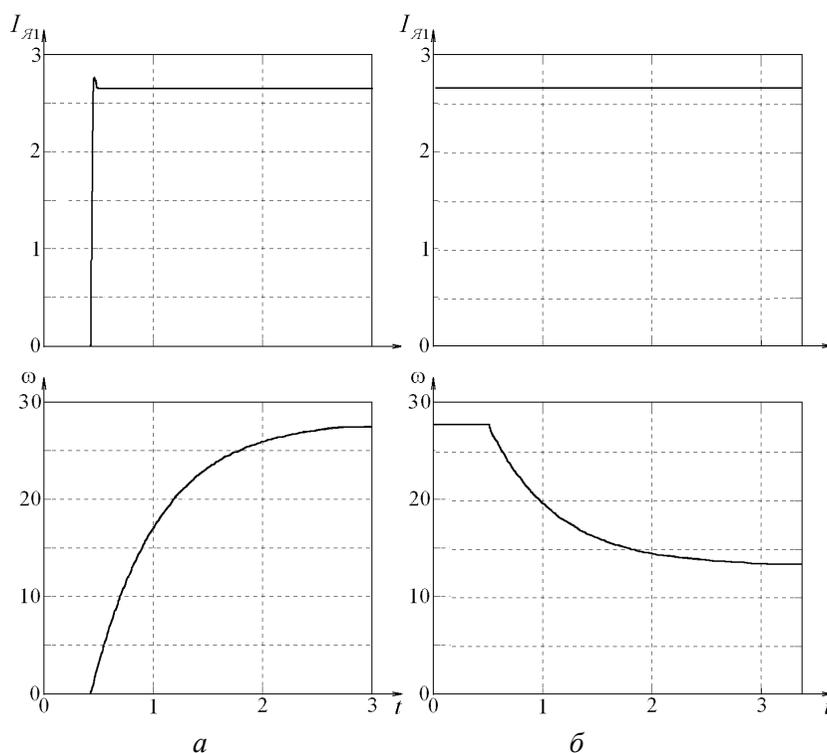


Рис.4. Переходные процессы:  
 а- по управляющему воздействию; б – по возмущающему воздействию

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В.И. Теория электропривода. Учеб.для вузов. –2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 2001. 704с.: ил.
2. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: Учеб.пособие для вузов. –2-е изд. перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 224с.: ил.

Статья поступила в редакцию 25 января 2014 г.

#### DYNAMIC CHARACTERISTIC OF DIRECT-CURRENT DRIVE MOMENT STABILIZING

**V.P. Kurgan, A.A. Pankin**

Samara State Technical University  
 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

*In this paper a DC drive stabilizing system is presented. This system provides required transient and steady state owing to assigned load moment of electrical machine. Electrical machine operates on dynamic braking mode.*

**Keywords:** *current controller, dynamic braking, moment stabilization, current sensor, re-wind system.*

---

Vladimir P. Kurgan (Ph.D.(Techn.)), Associate Professor.  
 Aleksey A. Pankin, Assistant.

УДК 519.95:621.746.6

**СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ*****Е.А. Якубович***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: ensave@samgtu.ru

*На основе результатов численного исследования температурного поля непрерывного слитка толщиной 400 мм получены приближенные регрессионные модели для оценки глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной области в центре слитка в зависимости от характеристик системы охлаждения и скорости литья. Показаны возможности приближенных моделей регрессионного типа для обоснования режимных параметров системы охлаждения плоских слитков алюминиевых сплавов при непрерывном литье в электромагнитный кристаллизатор с целью стабилизации температурных условий формирования и свойств слитка. Выполнена интервальная оценка значений и определены допустимые пределы колебаний интенсивности охлаждения, уровня жидкого металла в кристаллизаторе, температуры жидкого металла, скорости вытягивания слитка, обеспечивающие поддержание глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной зоны в центре слитка в пределах 5 % отклонения от технологически обоснованных значений.*

**Ключевые слова:** *приближенные модели, непрерывный слиток, алюминиевые сплавы.*

В работах [1, 2] указаны основные области применения приближенных регрессионных моделей, соответствующих процессу формирования непрерывного плоского слитка при литье в электромагнитный кристаллизатор. Их использование позволяет анализировать эффективность действующей промышленной технологии и содействует обоснованию параметров технологических режимов для литья крупногабаритных слитков. Не менее важной является задача количественной оценки влияния различных факторов на косвенные критерии качества слитка с целью разработки системы управления процессом непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор, предназначенной для стабилизации заданного режима формирования слитка.

Для замкнутой системы управления процессом целесообразно использовать итерационно-табличный способ, который предусматривает осуществление принципа управления по отклонению выходных переменных от заданного значения [3]. Коррекция технологического режима осуществляется циклически в дискретные моменты времени по итерационной схеме

$$U_i = U_{i+1} + \Delta U_i, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots$  – номер итерационного цикла;  $\Delta U_i$  – вектор изменения управляющих воздействий, приводящий к стабилизации (в смысле удовлетворения заданной точности) технологического режима. Итерационный алгоритм реализуется

---

*Ефим Абрамович Якубович (к.т.н., доц.), профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

при управлении объектом с использованием стандартной обратной табличной модели, которая строится в виде таблицы взаимно однозначных соответствий вида

$$U \leftrightarrow Y, \quad (2)$$

где  $U$  и  $Y$  – векторы управляющих воздействий и выходных переменных (в рассматриваемом случае косвенных критериев качества). Итерационный алгоритм вступает в действие, если норма  $\|Y_0 - Y_{i-1}\|$  превысит заданную величину. При этом циклически осуществляется поиск требуемой величины  $\Delta U_i$ . Таким образом, реализация итерационного алгоритма управления сводится к поисковым процедурам и простейшим вычислительным операциям. Интервальная оценка значений управляющих параметров, позволяющих стабилизировать уровень контролируемых выходных переменных с заданной точностью, необходима для правильного составления таблиц  $U \leftrightarrow Y$ , являющихся важной частью информационного обеспечения системы управления технологическим процессом формирования непрерывного слитка.

Полученные в [1, 2] регрессионные модели синтезированы по результатам численного исследования температурного поля непрерывного слитка толщиной  $d = 400$  мм из сплава АМг6 [4]. С учетом некоторых конструктивных и технологических особенностей реальной установки для непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор эти зависимости могут быть представлены в виде

$$h_n = 325,9v + 0,2240z_1 - 0,2097 \cdot 10^{-3}v \tilde{\alpha}_3 - 0,1226 \cdot 10^3 v^2/z_1 - 0,01019av^2/z_1, \quad (3)$$

$$\delta = 97,6v + 0,5133 \cdot 10^{-2}v \tilde{\alpha}_2 - 0,5136 \cdot 10^{-8} a^2 v - 0,3774 \cdot 10^{-2} v \alpha_2 - 0,02370 v \sqrt{a} - 0,03073 v \sqrt{\alpha_3} + 0,1161 \cdot 10^{-7} v \alpha_2^2, \quad (4)$$

$$h_c = 399,5v + 0,3264z_1 - 0,3447 \cdot 10^{-3} v \tilde{\alpha}_3 - 0,01486av^2/z_1, \quad (5)$$

причем  $\tilde{\alpha}_2 = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$  ;

$$\tilde{\alpha}_3 = \frac{(\alpha_2 + \alpha_3)}{2} ;$$

$$z_1 = 0,04 - h_{yp} - \Delta z ;$$

$$\Delta z = \frac{0,5 c_p v (t_{зал} - 700) d}{\alpha_{cp} (t_{пов}^{cp} - t_{охл})} ;$$

$$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1}{2} .$$

Здесь  $h_n$ ,  $h_c$  и  $\delta$  обозначают соответственно глубину жидкометаллической лунки по температурам ликвидуса и солидуса и высоту двухфазной зоны в центральном сечении слитка;  $h_{yp}$  – уровень жидкого металла в кристаллизаторе;  $c$  и  $\rho$  – удельную теплоемкость и плотность;  $v$  – скорость вытягивания слитка;  $t_{пов}^{cp}$  – среднюю температуру поверхности слитка на участке от мениска до поперечного сечения с температурой поверхности 700 °С. Остальные обозначения соответствуют принятым в [4].

С использованием моделей (3)–(5) был осуществлен поиск пределов колебания управляющих параметров  $\{v, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, a, h_{yp}, t_{зал}\}$  таким образом, чтобы

значения  $h_c$  и  $\delta$ , выбранных в качестве косвенных критериев качества слитка, поддерживались с точностью 5 %. За оптимальный режим, который нужно стабилизировать с указанной точностью, выбран режим, определенный по результатам исследования оптимальных условий затвердевания слитка [5], характеризующийся следующими значениями параметров:  $v^0 = 10^{-3}$  м/с,  $\alpha_1^0 = 6,28 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $\alpha_2^0 = 58 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $\alpha_3^0 = 40 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $a^0 = 17 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>К,  $h_{yp}^0 = 0,02$  м,  $t_{зал}^0 = 700$  °С. Для данного режима косвенные показатели качества слитка имеют следующие числовые значения:  $h_c^0 = 0,378$  м и  $\delta^0 = 72 \cdot 10^{-3}$  м.

Выполненный на основе выражений (3) – (5) анализ с учетом технологических ограничений на управляющие параметры показал, что с уменьшением  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $a$ ,  $h_{yp}$ ,  $t_{зал}$  выходные переменные  $h_c$  и  $\delta$  закономерно увеличиваются, а уменьшение скорости вытягивания  $v$  действует в противоположном направлении. Как следует из результатов расчетов, стабилизация косвенных критериев качества слитка  $h_c$  и  $\delta$  на уровне 5 % отклонения от заданных значений  $h_c^0$  и  $\delta^0$  требует поддержания управляющих параметров на уровне 3 % от принятых в качестве технологически обоснованных. Отмеченное обуславливает высокие требования к потенциальной точности локальных регуляторов, предназначенных для управления расходом и уровнем жидкого металла, температурой и количеством охлаждающей воды, скоростью вытягивания слитка. Отсутствие стабилизации режимных параметров формирования непрерывного слитка в электромагнитном кристаллизаторе может привести к неконтролируемым изменениям глубины жидкометаллической лунки и размеров двухфазной области, что на практике является причиной недопустимой нестабильности структурных показателей и свойств слитка.

Полученная по результатам расчетов информация используется для обоснования технических требований к локальным регуляторам, которыми оснащаются установки для непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор, а также для синтеза основных алгоритмов контроля и управления процессом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

3. Клявинь Я.Я., Клявина И.Я., Брока М.Э., Якубович Е.А. Синтез регрессионных моделей по результатам численного исследования температурного поля слитка // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1982. – № 6. – С. 76-84.
4. Якубович Е.А. Приближенные модели регрессионного типа для анализа затвердевания непрерывных слитков алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 222-224.
5. Скурихин В.И., Житецкий Л.С., Проценко Н.М. Итеративно-табличные автоматы. – Киев: Наукова думка, 1977. – 168 с.
6. Брока М.Э., Клявинь Я.Я., Шадрин Г.Г., Якубович Е.А. Численное исследование затвердевания плоских слитков из высоколегированных алюминиевых сплавов при непрерывном литье // Цветные металлы. – 1986. – № 4. – С. 75-77.
7. Брока М.Э., Клявинь Я.Я., Якубович Е.А. Численное исследование оптимальных режимов затвердевания слитков алюминиевых сплавов при непрерывном литье в электромагнитный кристаллизатор // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1981. – № 4. – С. 61-67.

*Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.*

# STABILIZATION MODE OF THE CONTINUOUS CASTING REGIME FOR ALUMINUM ALLOYS FLAT BARS BASED ON APPROXIMATE REGRESSION MODELS

***E.A. Yakubovich***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The approximate regression models to estimate the depth of the liquid metal hole and the size of the two-phase zone in the center of the ingot, depending on the characteristics of the cooling system and the casting speed based on the results of numerical studies of the temperature field of a continuous 400mm thickness ingot, are presented. The paper deals with the possibilities of the approximate regression type models to justify the parameters of continuous casting of aluminum alloys in electromagnetic mold with a view to stabilize the temperature conditions of formation and properties of the ingot. The limits of the cooling intensity oscillations, the level and temperature of the liquid metal and the rate of the ingot pulling speed ensure maintaining the depth of the liquid metal hole and the size of the two-phase zone in the center of the ingot within 5% deviation from reasonable values was defined.*

***Keywords:*** *approximate models, continuous ingot, aluminium alloys.*

**XXII ЕНИКОЛОПОВСКИЕ ЧТЕНИЯ, ПОСВЯЩЕННЫЕ 90-ЛЕТИЮ  
СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Н.С. ЕНИКОЛОПОВА**

**ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ**

*Г.Е. Заиков, Л.А. Зимина*

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН  
Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 4

Chembio@sky.chph.ras.ru



Николай Сергеевич Ениколопов (1975)

Юбилейные Ениколоповские чтения проводились два дня: 13 марта в Институте химической физики (ИХФ) им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (РАН) и 14 марта 2014 года в Институте синтетических полимерных материалов (ИСПМ) им. Н.С. Ениколопова РАН. Это связано с тем, что Николай Сергеевич Ениколопов прошел свой научный путь от аспиранта до академика АН СССР в ИХФ. Затем он организовал ИСПМ и перешел туда работать на должность директора, оставаясь научным руководителем отдела «Полимеры и композиционные материалы» ИХФ. С уходом в ИСПМ он поручил Александру Александровичу Берлину (впоследствии избранному академиком РАН) всю повседневную работу в отделе «Полимеры и композиционные материалы» ИХФ.



Институт синтетических полимерных материалов имени Н.С. Ениколопова РАН



Институт химической физики имени Н.Н. Семёнова РАН

Эти чтения были организованы Отделением химии и наук о материалах РАН, научным советом РАН по высокомолекулярным соединениям, ИХФ РАН и ИСПМ РАН. Более 200 ученых из 30 исследовательских центров приняли участие в работе этой конференции в двух институтах.

В ИХФ (13 марта 2014 года) было заслушано шесть пленарных докладов. Со вступительным словом на открытии конференции выступил директор ИХФ академик А.А. Берлин, который рассказал о большом вкладе Н.С. Ениколопова в развитие химической кинетики, химической физики, химии и физики полимеров, композиционных и наполненных полимеров.

С первым докладом на конференции выступил директор ИСПМ РАН чл.-корр. РАН, д.х.н. А.Н. Озерин, который остановился на последних достижениях возглавляемого им института, касающихся развития и практического применения идей Николая Сергеевича.

Доклад д.т.н., проф. А.А. Кулькова (Центральный научно-исследовательский институт синтетических материалов, Хотьково, Московская область) был посвящен созданию новых конструкционных композитов на основе высокопрочных арамидных волокон, а сообщение д.х.н., проф. В.В. Иванова (ИХФ РАН) касалось вопросов гомогенной полимеризации ацеталей (передача цепи с разрывом и обратимое иницирование).

Следующие три доклада были посвящены методам полимеризационного наполнения полиолефинов – от традиционных наполнительных материалов до нанокompозитов (д.х.н., проф. Новокшенова, ИХФ РАН), современным проблемам наполненного и армированного полиэтилена (д.х.н., проф. В.В. Коврига, «Полипластик») и высокодисперсным порошкам – от наковален Бриджмена к промышленному оборудованию (к.ф.-м.н. В.Г. Никольский, ИХФ РАН).

На следующий день работа конференции была продолжена в ИСПМ, где было заслушано пять пленарных докладов. С первым докладом выступил сын Николая Сергеевича Ениколопова - Григорий Николаевич Ениколопов, профессор Лаборатории «Колд Спринг Харбор» (США) и Московского физико-технического института. Его выступление было посвящено стволовым клеткам мозга. Как известно, одним из крупнейших открытий нейробиологии последних лет, которое открывает новые горизонты в понимании основных законов работы мозга и возможностей использования стволовых клеток для лечения заболеваний, является обнаружение стволовых клеток в отделах взрослого мозга, ответственных за память и эмоции. Сообщение было посвящено основным закономерностям поддержания, деления и дифференцировки стволовых клеток и перспективам применения этих открытий в медицине.

Затем с докладом на тему «Керамические и композиционные материалы на основе фосфатов кальция для замещения и регенерации костных тканей» выступил д.т.н. В.С. Комлев (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН). В докладе были представлены результаты исследований, направленных на разработку материалов на основе фосфатов кальция, предназначенных для новых медицинских технологий восстановления костных тканей. Были рассмотрены фундаментальные проблемы формирования структуры и свойств керамики на основе фосфатов кальция при физиологических температурах с использованием принципа реакционного твердения в вяжущих системах (костные цементы), создания пористых кальцийфосфатных керамических матриц для тканевой инженерии, характеризующихся контролируемой скоростью биодеградации в организме человека и высокой биосовместимостью.

Сообщение д.х.н., проф. А.А. Ярославова (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет) было посвящено синтезу и изучению свойств мембраноактивных полимеров. Обсуждались состав и строение комплексов, полученных при взаимодействии синтетических полиэлек-

тролитов и коллоидных частиц с липидными бислойнными везикулами (липосомами). С практической точки зрения полученные результаты представляют интерес для интерпретации биологической активности полиэлектролитов и формирования мультлипосомальных носителей для транспорта лекарственных веществ.

Доклад д.х.н. Е.А. Марквичевой (Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН) касался вопросов создания и применения полимерных биоматериалов и матриц на их основе в биомедицине. В докладе были представлены различные полимерные биоматериалы, полученные твердофазным синтезом, и матрицы на их основе (в виде пленок, микрочастиц, микрокапсул, микроволокон). Такие матрицы могут быть использованы в тканевой инженерии, а также для создания новых 3D *in vitro* моделей на основе микрокапсулированных опухолевых клеток, что необходимо для изучения механизмов действия противораковой терапии и тестирования противораковых препаратов.

Д.х.н., проф. С.Н. Чвалун (ИСПМ) посвятил свое выступление применению полимеров в регенеративной медицине. Регенеративная медицина - быстро развивающаяся отрасль науки, направленная на создание живой ткани для восстановления с использованием клеточных механизмов функций органа, потерявшего дееспособность из-за травмы, заболевания или старения. В докладе были рассмотрены возможности применения различных полимерных материалов в сочетании с различными типами клеточных культур, развивающихся на объемном трехмерно структурированном биосовместимом матриксе искусственного происхождения, для восстановления целостности кожи, хрящей, сосудов, нервной ткани, печени и других органов.

Работа конференции показала, что идеи академика Николая Сергеевича Ениколопова находят свое дальнейшее развитие в трудах его учеников и сотрудников его института, а также в трудах других ученых близкого и дальнего зарубежья.

Следующие XXIII Ениколоповские чтения состоятся в марте 2015 года.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 7 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

### **Требования к оформлению статей находятся на сайте университета**

www.samgtu.ru → Наука → Вестник СамГТУ →  
→ Серия «Технические науки».

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

***Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.***

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

(e-mail: vest\_teh@samgtu.ru)

Редколлегия журнала