

**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

УДК[658.5.012.1]

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОМОЛА МУКИ:
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
СЫРЬЯ КАК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**Хобин В. А.¹, Егоров В. Б.¹¹Одесская национальная академия пищевых технологий, ОдессаEmail: yegorov-victor@mail.ru

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>ONAF
Open Access**Аннотация**

Проанализированы процессы изменения показателей качества сырья до обработки и очистки на действующем мукомольном предприятии как случайные процессы. Проведена структурно-параметрическая идентификация и в результате получены математические модели спектральных плотностей и автокорреляционных функций рассмотренных процессов.

Abstract

Processes of quality indicators change of raw materials before processing and cleaning at the operating flour-grinding enterprise as casual processes are analyzed. Structural and parametrical identification is carried out and mathematical models of spectral density and autocorrelated functions of the considered processes are as a result received.

Ключевые слова

Случайный процесс, структурная и параметрическая идентификация случайного процесса, автокорреляционная функция, спектральная плотность.

1. Введение

Формирование партий сырья на мукомольных предприятиях, как и на предприятиях пищевой промышленности, со строго одинаковыми характеристиками невозможно, т.к. характеристики сырья значительно варьируют из-за изменчивости химического состава, основой которого выступают биополимеры. Свойства сырья могут также существенно изменяться непосредственно в ходе процесса технологической переработки, а это означает воздействие на объект управления (ОУ) интенсивных возмущений по сырью. В таких условиях эффективное управление технологическими процессами требует применения систем автоматического управления (САУ) с более развитой функциональной организацией, с более совершенными алгоритмами, чем для процессов, в которых сырьем выступают химические полимеры и с подсистемами управления стабильностью [1,2], как одним из ключевых характеристик любого технологического процесса. Одним из способов достижения заданного уровня стабильности технологического процесса является применение систем гарантирующего управления для предотвращения события выхода показателей стабильности за определенные оператором границы полей допусков [3]. Однако для развернутого исследования



2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

стабильности и возможностей ее применения в соответствующих системах гарантирующего управления требуется обстоятельный анализ самих процессов.

Случайную функцию $X(t)$ можно определить как случайную величину, зависящую от параметра. Так как этот параметр t является временем, функцию $X(t)$ называют также случайным (вероятностным, стохастическим) процессом [4]. Проследить все причинно – следственные связи обуславливающие качество зерна на входе мукомольного предприятия невозможно. Это делает актуальным рассмотрение показателей качества зерна как случайных величин, изменяющихся во времени, т.е. как случайных процессов. Анализ реального изменения показателей качества показывает, что применение такой гипотезы корректно. Таким образом, процесс изменения показателя качества сырья или готовой продукции является случайным процессом, т.е. процессом, являющимся функцией времени, значение которой в каждый момент времени является случайной величиной [5]. Важно помнить также, что если хотя бы одно из входных воздействий является случайным, то выходная переменная системы также будут представлять собой случайный процесс.

Для обстоятельного анализа случайных процессов изменения показателей качества сырья и готовой продукции будет выполнена структурная и параметрическая идентификация соответствующих случайных процессов, а также идентификация каналов взаимосвязей рассмотренных процессов в частотной области. Для отображения результатов соответствующего исследования предполагается серия статей. Данная статья является первой из указанной серии, в рамках которой будут проанализированы случайные процессы изменения показателей качества сырья на действующем мукомольном предприятии.

2. Подготовка объема данных для анализа

При производстве муки ее качество зависит от качества перерабатываемого зерна и технологии производства. Процесс ее производства состоит из двух основных этапов — подготовительного и самого помола зерна. Зерно для очистки и переработки принимается с ограничениями на показатели его качества, так, согласно правилам организации и ведения технологического процесса на мукомольных заводах [7]:

- Рекомендуемая выходная влажность при многосортных или односортных помолах пшеницы и ржи с производством муки высшего сорта или сеяного - до 13%, при остальных типах помола – до 14% (W);
- Содержание сорной примеси - не более 2% (при наличии специального оборудования для обработки зерна на элеваторе – не более 1%) (A_C);
- Содержание зерновой примеси – не более 5% в пшенице и не более 4% в ржи, в том числе проросших зерен (A_3);
- Натура (аналог удельной плотности) пшеницы при сортовых помолах – 775 г/л, натура ржи при сортовых помолах – 700 г/л.

После очистки зерна, перед составлением помольной партии, его дополнительно увлажняют до 17...18%. Сорная примесь после очистки не должна превышать 0,4%. Согласно приведенным выше правилам организации и ведения технологического процесса на мукомольных заводах [7] обозначены показатели качества муки:

- Влажность любой хлебопекарской муки не более 15%, влажность муки для макаронных изделий не более 15,5% (W);
- Количество клейковины в муке высшего сорта 28% (K_{qBC});
- Количество клейковины в муке первого сорта 30% (K_{qI});
- Количество клейковины в муке второго сорта 25% (K_{qII});

Упрощенную технологическую схему подготовки сырья и производства муки можно представить в следующем виде (рис. 1):

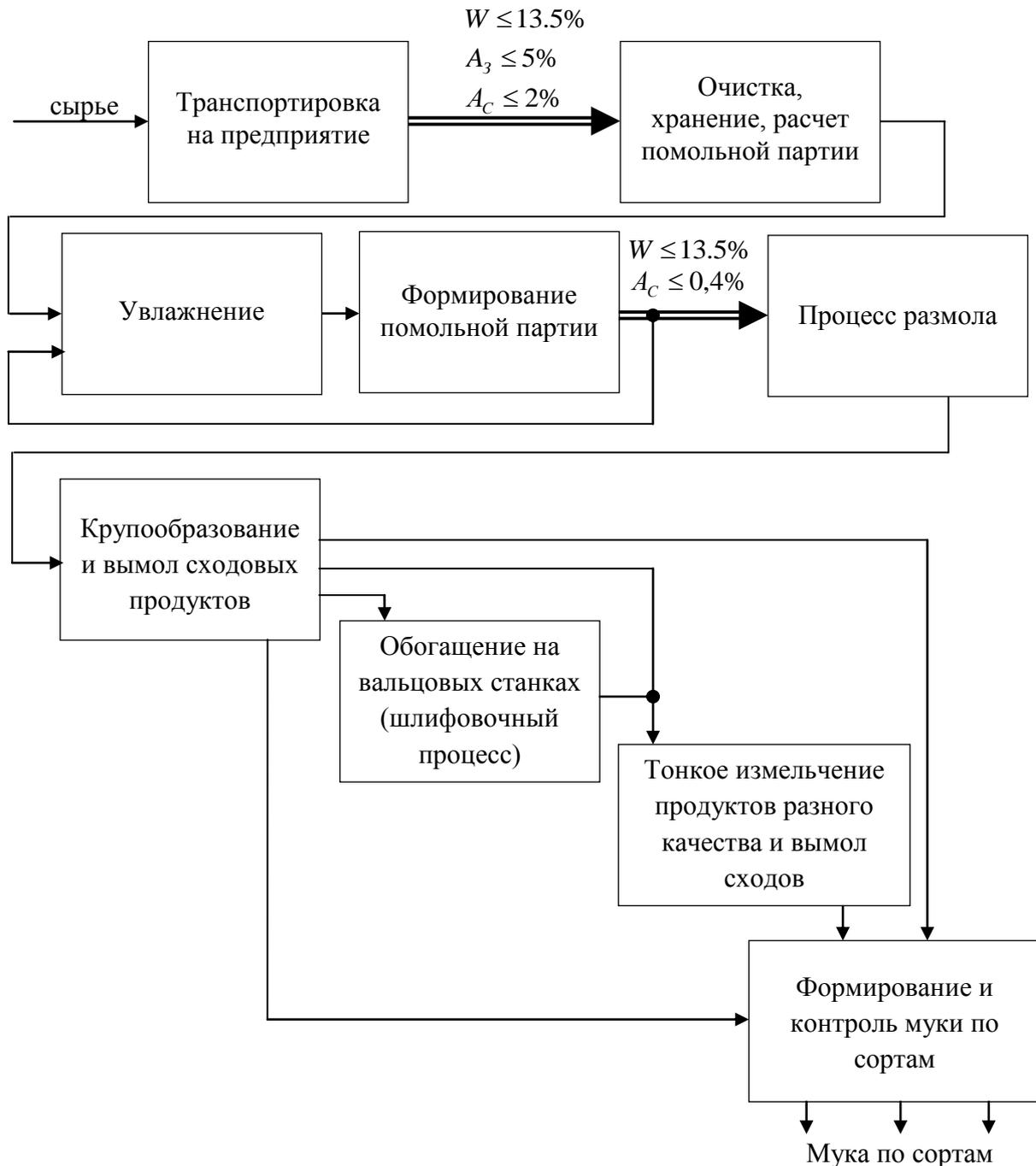
**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Рис. 1. Структурно – параметрическая схема технологического процесса производства муки в упрощенном виде

Упомянутые ранее возмущающие воздействия обусловлены свойствами продукта, особенностями технологического и транспортного оборудования, изменением микроклимата в производственном помещении, колебаниями напряжения в электросети [8].

Возмущающие воздействия со стороны оборудования вызываются изменением характеристик рабочих органов машины: затуплением рифлей валков вальцовых станков, забиванием сит рассевов, ослаблением натяжения приводных ремней машин и др. Допустимые по действующим нормам колебания частоты тока



2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Длина каждого из 10-ти указанных записанных случайных процессов составила 147 точек. Далее в работе анализировались только процессы изменения показателей качества сырья до очистки и обработки.

При анализе случайных процессов и их структурно-параметрической идентификации использовалось специальное программное обеспечение, разработанное на кафедре Автоматизации производственных процессов Одесской национальной академии пищевых технологий. Для организации анализа данные были переведены в соответствующий SignPlot файл:

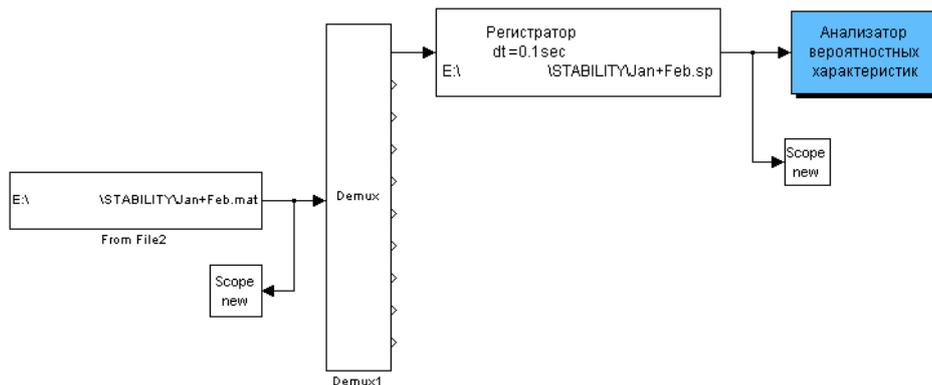


Рис. 3. Модель перевода данных в SignPlot-файл и первичного анализа случайного процесса изменения соответствующих характеристик

Идентификация случайных процессов изменения характеристики продукта до обработки будет проводиться путем определения их соответствующих корреляционных функций и спектральных плотностей – как в достаточной степени универсальных характеристик для случайного процесса [5].

3. Предварительный анализ

Первичный анализ показывает наличие существующих случайных составляющих в рассматриваемых процессах. Для выявления скрытых закономерностей целесообразно получить оценки их корреляционных функций и спектральных плотностей, а по их результатам провести структурно – параметрическую идентификацию альтернативных вариантов их моделей. Автокорреляционная функция случайного процесса характеризует степень взаимного влияния (взаимосвязи, корреляции) предыдущих значений случайного процесса на его последующие значения при различной величине «сдвига» этих значений во времени. Величина этого сдвига называется интервалом корреляции τ_k [9]. При получении корреляционных функций усреднением по времени корреляционная функция рассчитывается, как среднее значение произведения для одного момента времени значений двух одинаковых центрированных случайных процессов $\tilde{x}^0(t)$, когда один из них сдвинут относительно другого на интервал τ_k , т.е. процессов $\tilde{x}^0(t)$ и $\tilde{x}^0(t - \tau_k)$:

$$K_x(\tau_k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{x}^0(t) \tilde{x}^0(t - \tau_k) dt, \quad (1,1)$$

где $\tilde{x}^0(t)$ – центрированная составляющая исходного случайного процесса;

$\tilde{x}^0(t - \tau_k)$ – центрированная составляющая случайного процесса, полученного из исходного смещением его по оси времени на величину τ_k .

Спектральная плотность мощности случайного процесса – это детерминированная функция частоты, характеризующая спектральный (частотный) состав процесса, а именно – распределение по частоте квадрата амплитуд гармоник, составляющих данный процесса. Формально спектральная плотность случайного процесса и его корреляционная функция связаны преобразованием Фурье [6, 9].

$$K_x(\tau_k) = F^{-1}\{S_x(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau_k} d\tau_k. \quad (1,2)$$

**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

Спектральная плотность представляет собой функцию частоты для средних значений квадратов амплитуд гармоник, на которые может быть разложен случайный процесс. Поскольку мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату амплитуды, то спектральную плотность случайного процесса фактически можно трактовать как частотную функцию распределения мощности случайного процесса по частотам. Поэтому спектральную плотность $S_x(\omega)$ называют также спектральной плотностью мощности случайного процесса. [9].

Далее приведены результаты первичного анализа соответствующих случайных процессов: реализация самого случайного процесса, оценка плотности вероятности, нормированная оценка корреляционной функции и оценка спектральной плотности рис.4 ... рис.7: (где, а – реализация случайного процесса, б – оценка плотности вероятности, в – нормированная оценка корреляционной функции, г – оценка спектральной плотности)

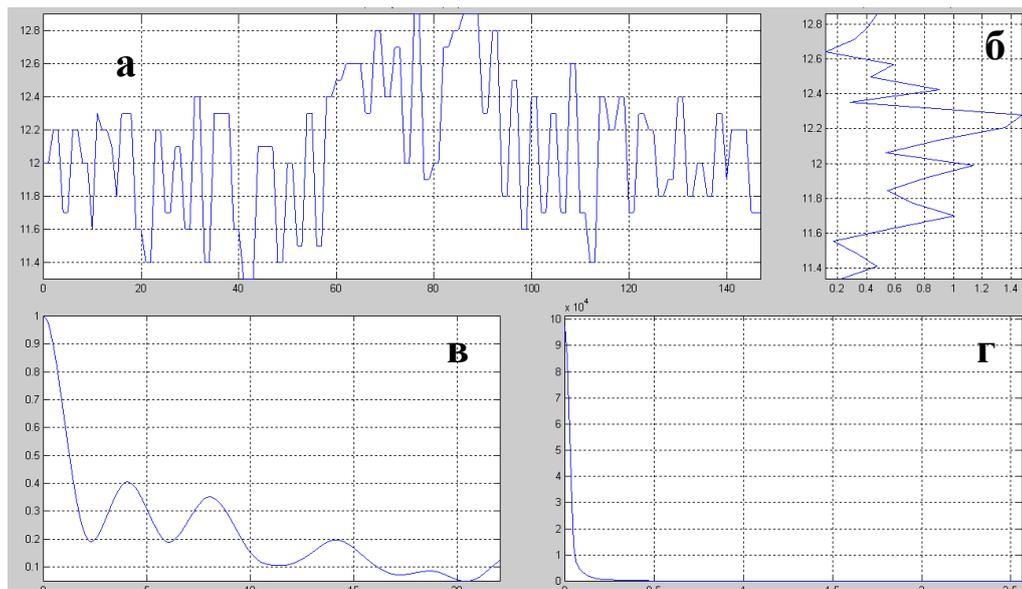


Рис. 4. Изменение влажности зерна сырья (пшеницы W , %) во времени и оценка его характеристик как случайного процесса

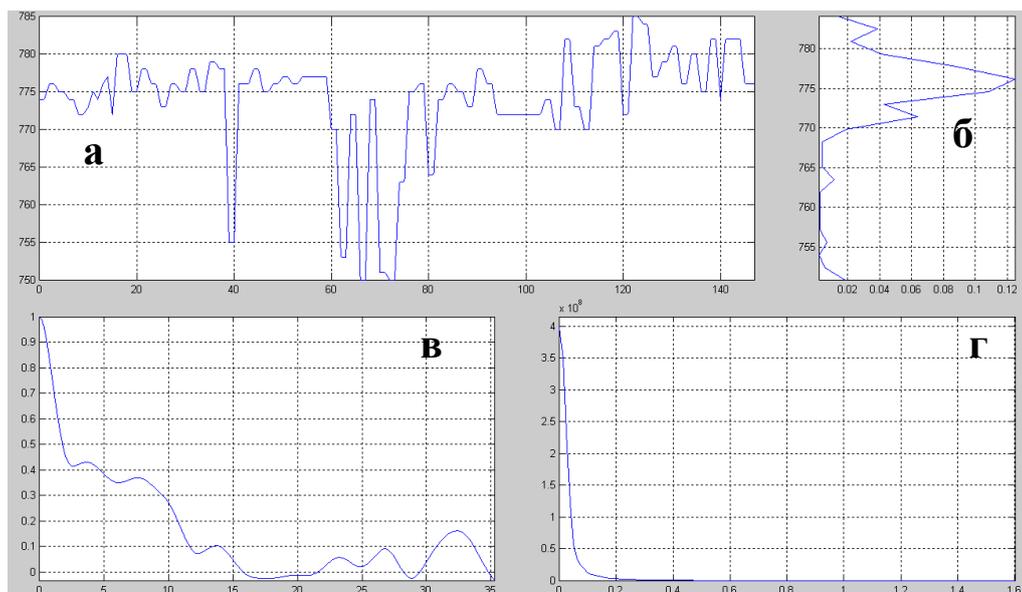


Рис. 5. Изменение натуре сырья (пшеницы U , г/л) во времени и оценка его характеристик как случайного процесса



**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

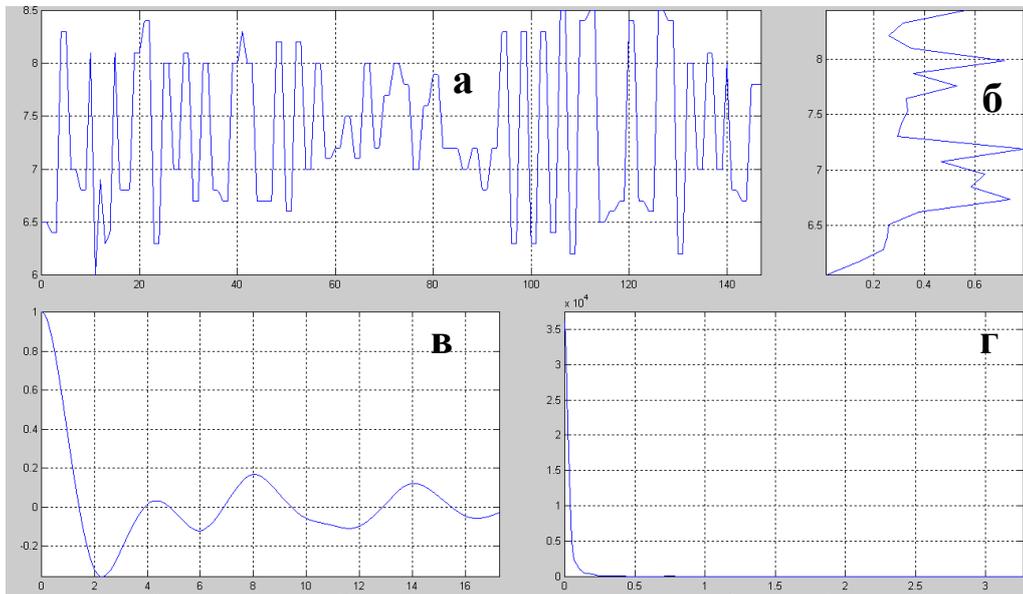


Рис. 6. Изменение процента содержания примеси сырья (пшеницы A_3 , %) во времени и оценка его характеристик как случайного процесса

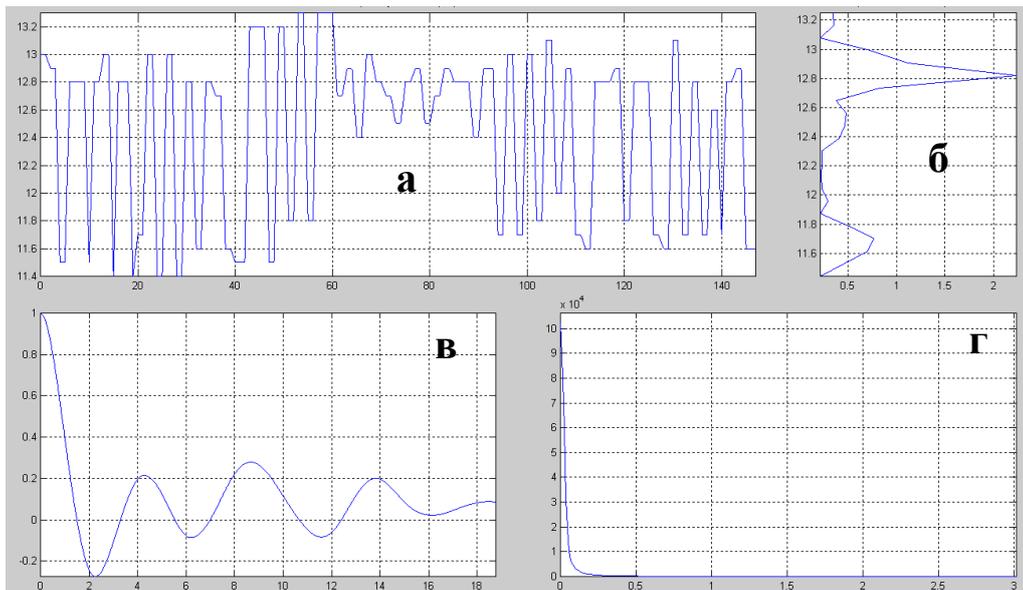


Рис. 7. Изменение содержания белка в зерновой примеси сырья (пшеницы C , %) во времени и оценка его характеристик как случайного процесса



2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

4. Процедура и результаты идентификации моделей случайного процесса изменения влажности сырья

Прежде всего необходимо выбрать вид модели плотности вероятности: модель плотности вероятности нормального (Гауссовского) случайного процесса, модель плотности вероятности гармонического процесса или модель композиционной плотности вероятности гауссовского и гармонического случайных процессов.

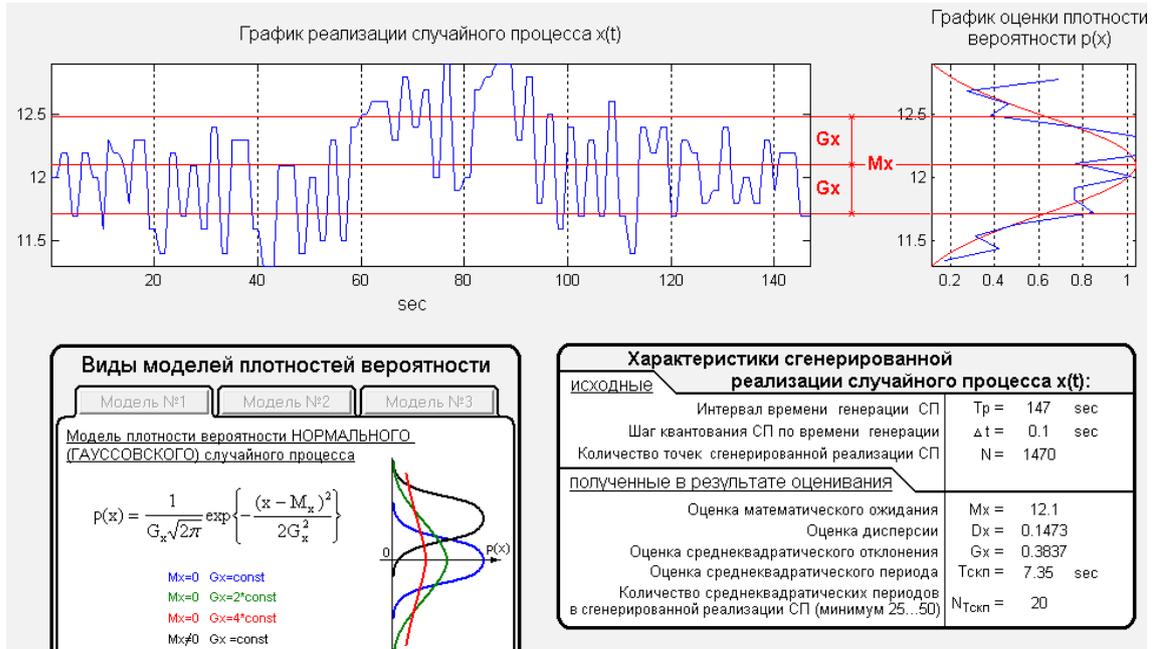


Рис. 8. Визуализация исследуемого случайного процесса (СП), результаты оценивания его простейших характеристик, идентификация плотности вероятности изменения влажности зерна до очистки и обработки

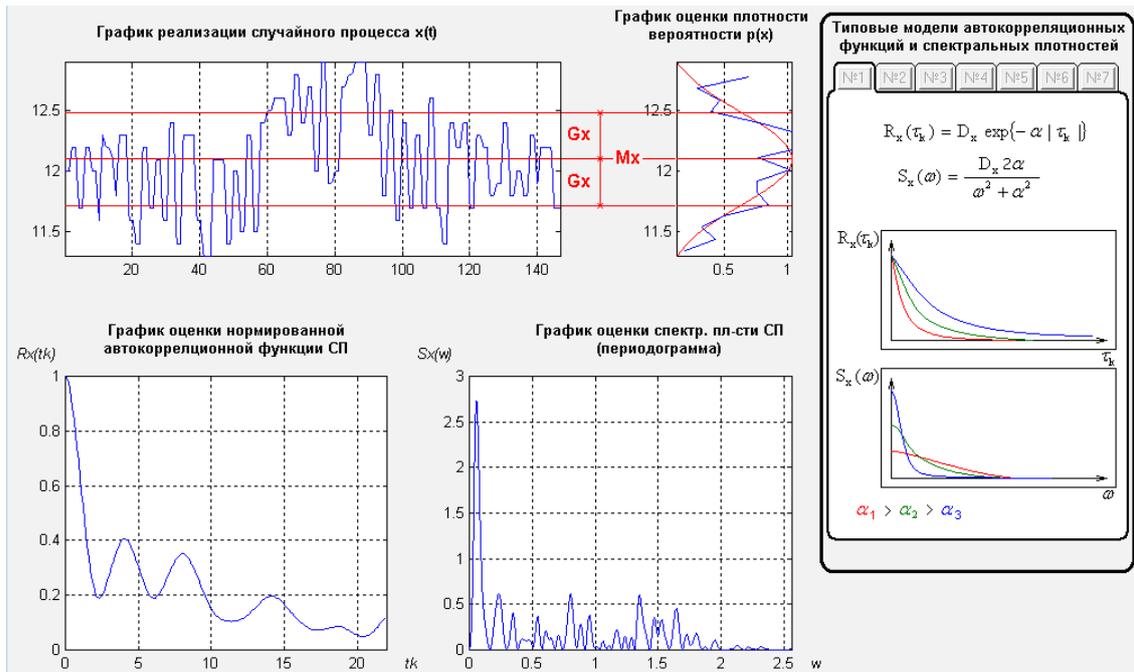


Рис. 9. Структурная идентификация моделей автокорреляционной функции и спектральной плотности процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки



**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

После проведенной структурной идентификации для проведения параметрической идентификации необходимо провести оптимизацию по автокорреляционной функции и спектральной плотности. Расчет значений начальных приближений производится графически:

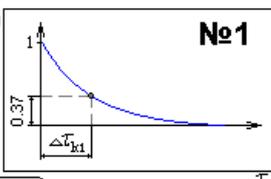
Выбранные Вами модели Rx и Sx:

$$R_x(\tau_k) = D_x \exp\{-\alpha |\tau_k|\}$$

$$S_x(\omega) = \frac{D_x 2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}$$

Расчёт начальных приближений оптимизируемых параметров можно осуществить используя нижеприведен. рекомендации

$$\hat{\alpha}^0 = \frac{1}{\Delta\tau_{k1}}$$



№1

τ_k

ОПТИМИЗАЦИЯ

Выбор метода оптимизации

по автокорреляционной функции

по спектральной плотности

Настройка параметров оптимизации

max количество шагов оптимизации	100.00
минимальное приращение критерия	0.01
минимальное приращение аргумента	0.01
ниж.опр. нач.прибл. верх.опр. оптим.знач.	
α	0.00 0.00 0.00

Рис. 10. Выбор моделей автокорреляционной функции и спектральной плотности процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки

График реализации случайного процесса x(t)

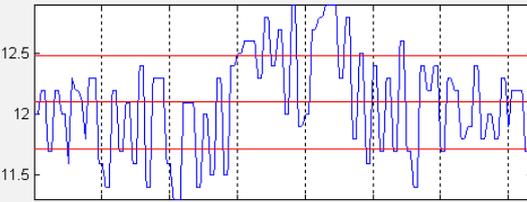


График оценки плотности вероятности p(x)

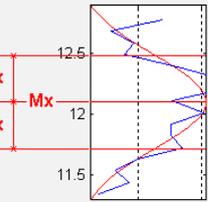
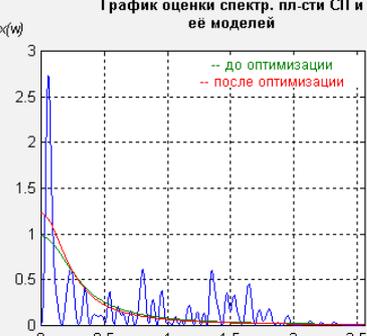


График оценки нормированной автокорреляционной функции СП и её моделей



График оценки спектр. пл-ти СП и её моделей



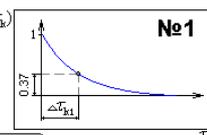
Выбранные Вами модели Rx и Sx:

$$R_x(\tau_k) = D_x \exp\{-\alpha |\tau_k|\}$$

$$S_x(\omega) = \frac{D_x 2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}$$

Расчёт начальных приближений оптимизируемых параметров можно осуществить используя нижеприведен. рекомендации

$$\hat{\alpha}^0 = \frac{1}{\Delta\tau_{k1}}$$



№1

τ_k

ОПТИМИЗАЦИЯ

Выбор метода оптимизации

по автокорреляционной функции

по спектральной плотности

Настройка параметров оптимизации

max количество шагов оптимизации	100.00
минимальное приращение критерия	0.01
минимальное приращение аргумента	0.01
ниж.опр. нач.прибл. верх.опр. оптим.знач.	
α	0.00 0.3 20 0.24

факт. количество шагов оптимизации: 10

Значение критерия оптимальности	до оптим-ции	2.915
	после опт-ции	2.84

Рис. 11. Параметрическая идентификация моделей автокорреляционной функции и спектральной плотности процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки – оптимизация по автокорреляционной функции



**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**

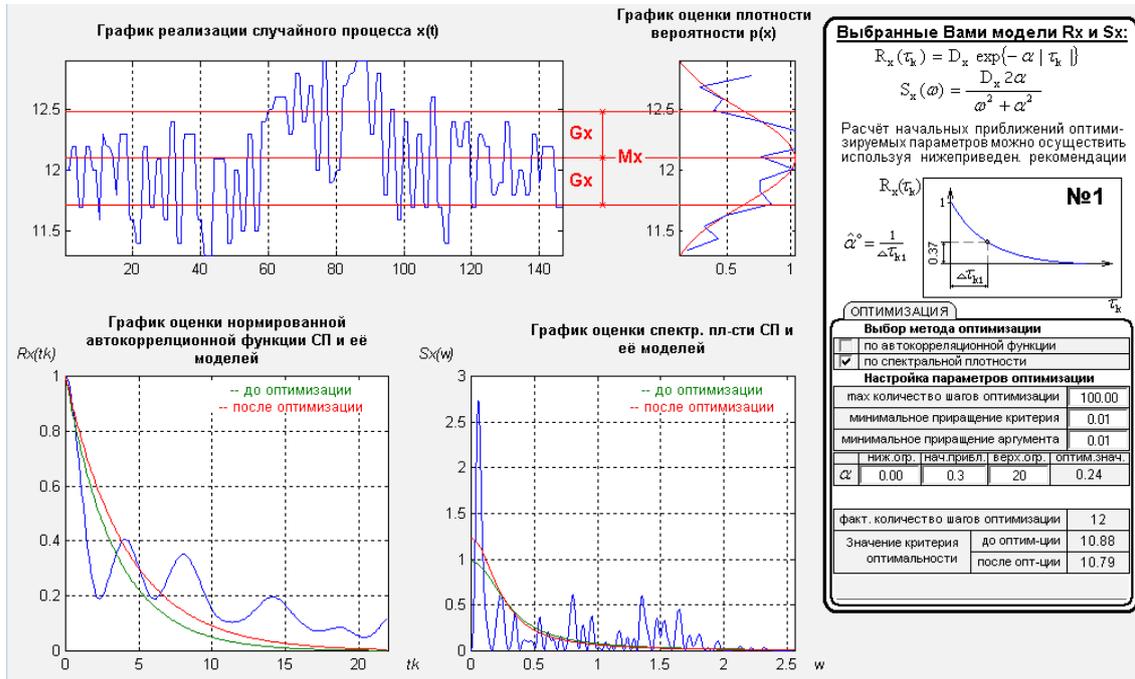


Рис. 12. Параметрическая идентификация моделей автокорреляционной функции и спектральной плотности процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки – оптимизация по спектральной плотности

Далее приведены итоги идентификации случайного процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки

Номер модели	α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.24	-	-	-	-	8.0634
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.24	-	-	-	-	116.5173

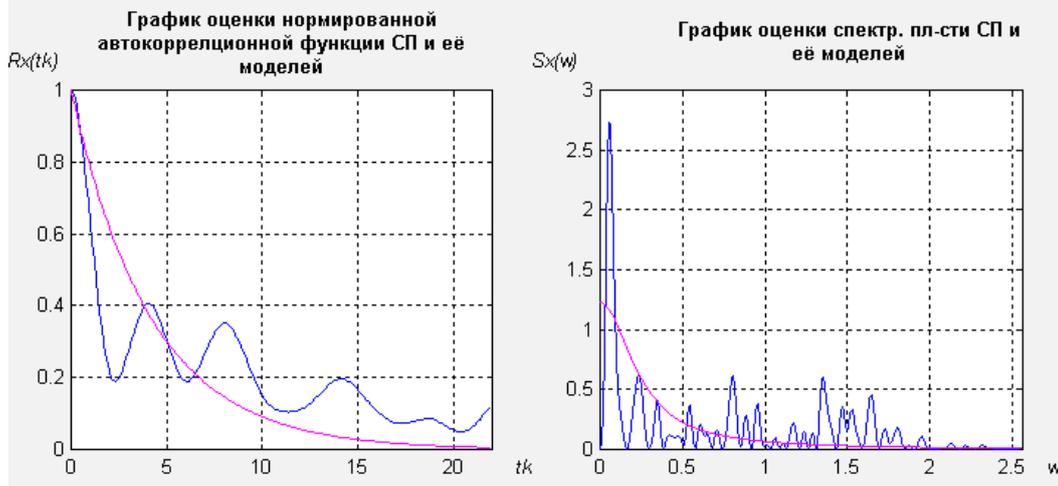


Рис. 13. Итоги идентификации модели процесса изменения влажности зерна до очистки и обработки



2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

5. Результаты идентификации случайных составляющих процессов изменения природы, содержания зерновой примеси и белка.

Структурная и параметрическая идентификация случайных процессов изменения других показателей качества зерна до очистки и обработки, таких как: натура (удельная плотность, г/л), содержания зерновой примеси (%) и содержания белка (%) проводилась аналогично приведенному выше. Далее приведены лишь результаты идентификаций соответствующих процессов рис. 14 – рис. 16:

Номер модели	α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
✓ 1	0.185	-	-	-	-	4.8469
✓ 1	0.18457	-	-	-	-	19001517.1212
✓ 2	0.0625	-	-	-	-	15.1351
✓ 2	0.052454	-	-	-	-	15585624.1967

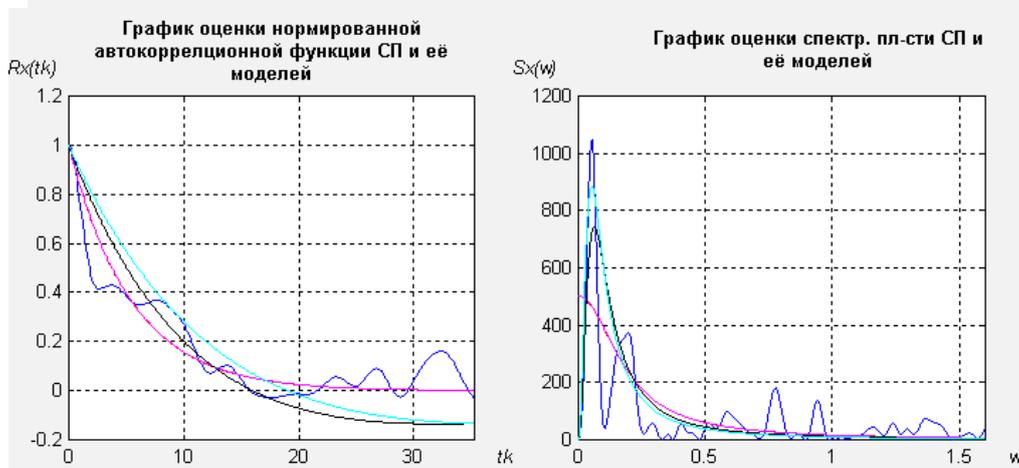


Рис. 14. Итоги идентификации модели процесса изменения природы зерна до очистки и обработки

Номер модели	α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
✓ 2	0.645	-	-	-	-	4.6518
✓ 2	0.65	-	-	-	-	269.2151

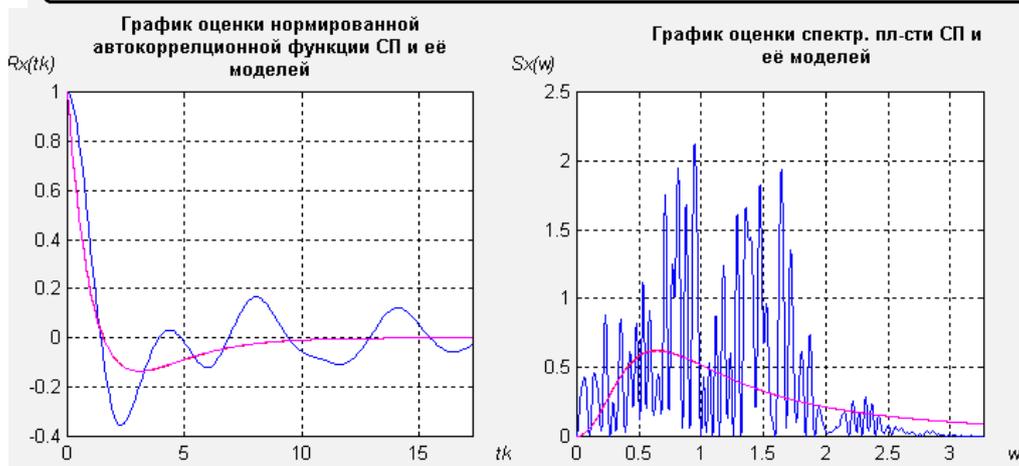


Рис. 15. Итоги идентификации модели процесса изменения зерновой примеси до очистки и обработки



2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Номер модели	α	β	A	C	γ	Значение критерия оптимизации
✓ 6	0.48222	1.4317	-	-	-	4.7315
✓ 6	0.4842	1.4295	-	-	-	210.5619

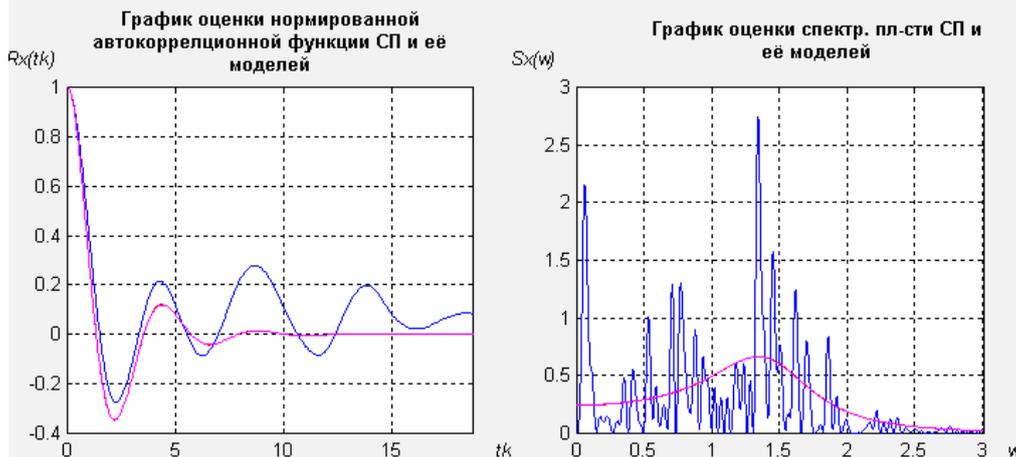


Рис. 16. Итоги идентификации модели процесса изменения
влажности муки высшего сорта

Таким образом, математические модели спектральных плотностей и автокорреляционных функций, как универсальных характеристик, описывающих случайный процесс [5] можно свести в единую таблицу. Модели приведены в таблице 1:

Таблица 1 Математические модели спектральных плотностей и автокорреляционных функций процессов изменения показателей качества сырья

Наименование процесса	Спектральная плотность	Автокорреляционная функция
Изменение влажности сырья до очистки и обработки (%)	$S_x(w) \approx \frac{0.1}{w^2 + 0.1}; (1.3)$	$R(\tau_K) \approx 0.2 \exp\{-0.2 \tau_K \}; (1.4)$
Изменение природы сырья до очистки и обработки (г/л)	$S_x(w) \approx \frac{17}{w^2 + 0.03}; (1.5)$	$R(\tau_K) \approx 46 \exp\{-0.2 \tau_K \}; (1.6)$
Изменение зерновой примеси в сырье до очистки и обработки (%)	$S_x(w) \approx \frac{w^2}{(w^2 + 0.4)^2}; (1.7)$	$R(\tau_K) \approx 0.4 \exp\{-0.7 \tau_K \} (1 - 0.7 \tau_K) (1.8)$
Процесса изменения содержания белка в сырье до очистки и обработки (%)	$S_x(w) \approx \frac{1}{(w^2 - 2)^2 + w^2}; (1.9)$	$R(\tau_K) \approx 0.3 \exp\{-0.5 \tau_K \} (\cos(1.4 \tau_K) + 0.3 \sin(1.4 \tau_K)); (1.10)$

В таблице 2 приведены частотные характеристики исследованных процессов изменения свойств сырья до обработки:

**2 АВТОМАТИЧНІ І АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ**Таблица 2 частотные характеристики исследованных
процессов изменения свойств сырья

Наименование процесса	Mx	σ	Тскп, сутки
Изменение влажности сырья до очистки и обработки (%)	12.1	0.38	3
Изменение натурности сырья до очистки и обработки (г/л)	774.2	6.82	4,8
Изменение зерновой примеси в сырье до очистки и обработки (%)	7.35	0.64	2,3
Процесса изменения содержания белка в сырье до очистки и обработки (%)	12.46	0.54	2,5

где Mx – оценка математического ожидания; Dx – оценка дисперсии; Тскп – оценка среднеквадратического периода;

Выводы

В результате проведенной структурной и параметрической идентификации, получены частотные характеристики случайных процессов изменения показателей качества сырья до очистки и переработки. Получены математические модели автокорреляционных функций и спектральных плотностей всех рассмотренных случайных процессов.

Полученные математические модели спектральных плотностей и автокорреляционных функций позволяют организовать имитационное моделирование соответствующих процессов в среде Simulink (Matlab). Детальный анализ случайных процессов изменения показателей качества сырья до очистки и обработки, а также случайных процессов изменения показателей качества готовой продукции (муки) необходим для комплексного анализа стабильности указанных процессов и возможности организации ее гарантирующего управления.

Известно, что при прохождении через линейные инерционные системы, плотность распределения вероятности сигнала нормализуется, т.е. если она была не гауссовской, то после прохождения инерционности плотность более приближается к гауссовской, в тоже время если плотность распределения была гауссовской, то такой и остается. Одним из результатов проведенного исследования изучаемых случайных процессов можно также отметить, что каждый из исследованных случайных процессов имеет нормальную – гауссовскую плотность распределения.

Следует также отметить, что автокорреляционная функция каждого из рассмотренных случайных процессов является колебательной, т.е. имеют место быть такие значения интервала корреляции, при которых степень взаимного влияния (взаимосвязи, корреляции) предыдущих значений случайного процесса на его последующие значения при различной величине «сдвига» этих значений во времени увеличивается.

Литература

1. Егоров В.Б., Стабильность технологического процесса. Проблемы и методы оценки. Комбикорма.// Журнал «Комбикорма». – Москва, 2013. - №11. – с. 105 – 107;
2. Егоров В.Б., Оценка стабильности технологических процессов в зерноперерабатывающей промышленности.// Журнал «Хранение и переработка зерна». – Днепропетровск, 2013. – №10 (175) октябрь. – С.39 – 43.;
3. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения.// монография – Одесса. – 2008. – С. 304;
4. Ким Д.П. Теория Автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 312 с.;
5. Бесекерский В.А., Попов В.П. Теория систем автоматического управления. – изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.,–Профессия, 2007. – 752 с.;
6. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960;
7. Правила організації і ведення технологічного процесу на борошномельних заводах. Додаток до Наказу Міністерства Агропромислового Комплексу України № 83 від 20.03. 1998. – Київ, 1998. – 145 с.;
8. Карпин Е.Б. Автоматизация технологических процессов пищевых производств. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985, 536 с.;
9. Хобин В.А., Конспект лекций по курсу «Теория автоматического управления». – ОНАПТ, 2012. – 185 с.;