УДК 006.015.5: 637.1
https://doi.org/10.21603/1019-8946-2023-5-15

Компенсация аддитивных помех в технологических процессах молочной промышленности

Наталья Сергеевна Пряничникова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник
E-mail: pryanichnikova@vnimi.org
Сергей Азатович Хуршудян, д-р техн. наук, старший научный сотрудник
Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности

Показана возможность апроприации в пищевой промышленности, в частности молочной, технических подходов и решений, реализуемых в высокотехнологичном секторе промышленности, с использованием корректирующих и компенсационных схем. Непосредственное применение известных решений невозможно из-за сложного состава и свойств сырья и (или) промежуточного продукта. Предложен вариант интерпретации молочного сырья в качестве входного сигнала соответствующих схем и рассмотрение отклонения значений компонентов состава и показателей свойств (сыпучесть, кислотность, плотность, влажность и т. д.) от номинальных значений в виде возмущения. Основываясь на таком подходе, можно определить необходимый для внесения объем компонента в качестве компенсационного сигнала для получения заданных характеристик готового продукта. Представлены адаптированные обобщенные решения и алгоритмы их реализации. Рассмотрена аддитивная категория помех как наиболее часто встречаемая в производстве молочной продукции, воздействие которой описывается двумя типами.

Ключевые слова: *молочный продукт, помеха, система коррекции, инвариантность, технологический процесс.*

Pryanichnikova N. S., Khurshudyan S. A. Compensation of additive interference in the technological processes of the dairy industry
All-Russian Dairy Research Institute

The possibility of appropriation in the food industry, in particular dairy, of technical approaches and solutions used in the high-tech industry sector using corrective and compensation schemes is shown. The direct application of known solutions is impossible due to the complex matrix of the composition and properties of the raw material and/or intermediate product. A variant of interpreting dairy raw materials as an input signal of the corresponding circuits is proposed, and deviations of the values of the components of the composition and property indicators (flowability, acidity, density, humidity, etc.) from the nominal values are considered as perturbations, on the basis of which the introduction of the required volume of the component is determined as a compensation signal to obtain the specified characteristics of the finished product. Adapted generalized solutions and algorithms for their implementation are presented. The additive category of interference is considered as the most common in the production of dairy products, the impact of which is described by two types.
Key words: *dairy product, interference, correction system, invariance, technological process.*

В условиях строгого контроля качества молочных продуктов, обусловленного реализацией требований Стратегии 2030 [1], резко возрастает необходимость применения в молочной промышленности технических подходов и решений, успешно применяемых в высокотехнологических отраслях промышленности, к которым относятся принципы инвариантности, помехоустойчивости и др. Следует отметить, что в большинстве случаев механический перенос известных технических решений в производство молочных продуктов не представляется возможным из-за одного существенного факта — в измерительной технике, системах связи и т. д. инвариантность и помехоустойчивость достигается путем применения корректирующих систем, где входные сигналы, помехи и корректирующие воздействия однородны (например, электрические сигналы), в молочной промышленности входным сигналом может быть сырье, возмущением — измеримые свойства внешней среды или отклонения технологических параметров, промежуточным сигналом — динамические импульсы исполнительных механизмов, а компенсационным сигналом — некий объем ингредиента и/или технологическое воздействие. Поэтому процесс применения высокотехнологических решений включает три этапа: на первом этапе происходит адаптация терминов, основных положений и направлений реализации; на втором — разрабатываются обобщенные модели, схемы и алгоритмы реализации; на третьем — разработка конкретных корректирующих устройств. В настоящее время первый этап преодолен [2], возникла необходимость с определением обобщенных решений и алгоритмов их реализации.

В процессе производства молочного продукта может возникнуть помеха, влияющая на качество конечного готово продукта. Помеха, которая представляет собой отклонение параметра от нормируемого значения в соответствии с технической документацией, может присутствовать во входной параметрической матрице сырья (далее по тексту — матрица, включающая состав и свойства сырья), в технологическом устройстве (несоответствие параметра заданному значению) и внешних условиях (влажность, температура и тд.). Помехи следует разделить на три основные категории — аддитивную, мультипликативную и параметрическую. В отдельных случаях параметрическую помеху возможно представить одновременной комбинацией аддитивной и мультипликативной [3, 4].

Учитывая многообразие помех (источники, точки приложения, типы и т. д.) ограничимся помехой, связанной с отклонением одного из параметров матрицы сырья, что является наиболее актуальным в производстве молочных продуктов. Необходимо отметить, что в случае молочного производства наиболее часто имеет место воздействие аддитивной помехи. Следует отметить, что аддитивная помеха в общем виде может быть представлена двумя типами:

- тип А — помеха содержится во входной матрице (сырье);
- тип Б — помеха одновременно воздействует на входную матрицу (помеха типа А) и технологическое оборудование.

Компенсация помехи типа Б осуществляется применением двух независимых систем — компенсацией помехи типа А и известными методами, используемыми в различ-

ных высокотехнологических отраслях, для исключения влияния помехи на технологическое оборудование. Поэтому ограничимся рассмотрением аддитивной помехи типа А:

$$\Delta y = y - y_0, \quad (1)$$

где Δy — помеха; y — текущее значение параметра сырья; y_0 — нормированное значение параметра матрицы сырья.

Не нарушая общности изложения, обобщенное уравнение преобразования сырья в молочный продукт (y_n) (рис. 1) представим на примере одного параметра *y*:

$$y_n = W(p)\, y = \Pi_{i=1}^{n} W_i(p)\, y, \quad (2)$$

где $W_i(p)$ — оператор преобразования i-го этапа технологического процесса; i –количество этапов.

Замена *y* на помеху (1) позволяет оценить изменение качества готовой продукции при наличии помехи, что определяет необходимость применения корректирующей системы, которая может располагаться до или после W_1 (*p*). Учитывая, что аддитивная помеха типа А связана с матрицей сырья, корректирующую систему целесообразно располагать перед W_1 — оператор первого процесса в переработке сырья.

Непосредственное техническое решение по коррекции аддитивной помехи (1) существенно зависит от принципа используемой технологии производства — дискретной или непрерывной, что имеет место, например, в процессе нормализации молока. Дискретная технология реализуется при смешивании или сепарировании, а непрерывная — в потоке при использовании сепараторов-нормализаторов [5].

Независимо от технологии и типа помехи методология достижения инвариантности качества продукта включает: определение значения помехи в виде информационного (аналогового или дискретного) сигнала, формирование соответствующего компенсационного материального сигнала (дополнительное вещество, ингредиент и т. д.) и смешение его с входным материальным сигналом (сырье). В варианте дискретной технологии в корректирующих схемах используют релейные компоненты, а в непрерывной — добавляются регулируемые компоненты (дозаторы, расходомеры и др.).

На рисунке 1 показана наиболее простая схема коррекции с использованием релейных элементов, позволяющая наглядно продемонстрировать принцип организации корректирующей системы. В таблице 1 представлены обозначения, сигналы и условия компенсации аддитивной помехи типа А.

Таблица 1

Алгоритм компенсации помехи молочного сырья корректирующим устройством

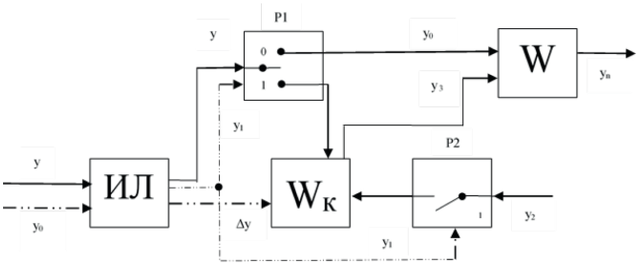
Этап	Сигнал (обозначение, формула)	Условия или алгоритм
Формирование значения помехи и управляющего сигнала	y_1=f(Δ*y*)	y_1=0, если Δ*y*=0 y_1=1, если Δ*y*≠0
Формирование вспомогательного сигнала	$y_2=ky_0$	*k*>1
Достижение компенсации помехи	$y_3=y_0$	$y_3=(y_2+y-\Delta y)/(k+1)$

Коррекция помехи в матрице сырья осуществляется следующим образом. В испытательной лаборатории сравниваются текущее (*y*) и нормированное (y_0) значения параметра сырья, что позволяет сформировать информационные сигналы значения помехи (Δy) и управляющего сигнала (y_1). При y_1=0 реле *P*1 направляет сырье в технологическое производство (*W*). В случае y_1=1 реле *P*1 перенаправляет сырье в систему коррекции (*W*к), куда одновременно через реле *P*2 подается дополнительное сырье (y_2). При реализации алгоритма (табл. 1, п. 3) осуществляется преобразование информационного сигнала Δy в соответствующий управляющий электрический сигнал исполнительного механизма (дозатор, расходомер и т. д.).

Рассмотренная корректирующая система представляет собой одноконтурную систему, характерную для условия *k*>1. В случае *k*<1 применяются предварительные методы увеличения значения k (сепарация и др.), позволяющие достигать условия $y_2=ky_0$, где *k*>1.

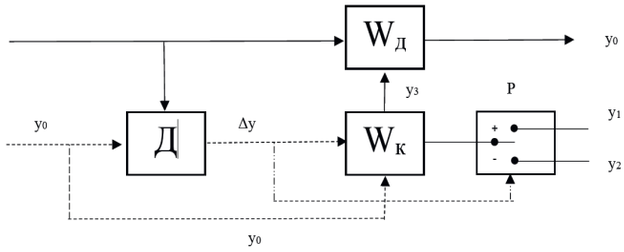
Для непрерывного технологического процесса, который допускает большое разнообразие возможных систем коррекции, укажем обобщенное решение коррекции аддитивной погрешности типа А (рис. 2).

Датчик (Д) непрерывного действия дифференциального типа формирует информационный сигнал значения помехи (Δ*y*), который подается в корректирующее устройство. Возможность изменения знака помехи учитывается путем введения в структуру корректирующего устройства реле (*P*) двух компенсационных ингредиентов (y_1 и y_2). Коррекция осуществляется следующим образом. Информационный сигнал Δ*y* на выходе Д посту-



⟶ – информационный сигнал; - - —·- ▶ – входной (сырье), промежуточный (дополнительное сырье или ингредиент) и корректирующий сигнал; ИЛ – испытательная лаборатория; Р1 и Р2 – релейные элементы; Wк – оператор корректирующего устройства

Рис. 1. Компенсация аддитивной помехи типа А в матрице сырья посредством корректирующей системы в дискретной технологии



- - - - - ▶ – информационный сигнал; ⟶ – входной (сырье), промежуточный (дополнительное сырье или ингредиент) и корректирующий сигнал; Wд – оператор дополнительного технологического процесса; Wк – оператор корректирующего устройства; Д – датчик аналитический непрерывного действия

Рис. 2. Коррекция аддитивной помехи типа А в непрерывном производстве молочного продукта

Таблица 2

Алгоритм реализации инвариантности качества молочного продукта при наличии аддитивной помехи в непрерывном технологическом процессе

Этап	Сигнал (обозначение, формула)	Условия или алгоритм
Формирование значения помехи	$\Delta y=y-y_0$	$\Delta y\leqslant 0$ или $0\leqslant\Delta y$
Формирование корректирующего сигнала	$y_1=ky_0$ $y_2=ky_0$	$k>1$ при $0<\Delta y$ $0<k<1$ при $\Delta y<0$
Достижение компенсации помехи	$y_3=0$ при $y=y0$ $y_3\neq 0$ при $y\neq y0$	$y_3=(\Delta y-(\Delta y+y_0)+y_1)/(k-1)$ $y_3=((\Delta y+y_0)-\Delta y-y_2)/(1-k)$

пает на *W*к и реле. При положительном сигнале на *W*к подается ингредиент y_1, а при отрицательном — y_2, что позволяет осуществлять автоматическую коррекцию путем суммирования входного сигнала *y* и выходного сигнала корректирующего устройства y_3 в дополнительном технологическом звене *W*д, расположенном до первого этапа технологического процесса W_1. При $\Delta y=0$ компенсационная система отключается, так как на входе *W*к отсутствуют сигналы (y_1 или y_2). Алгоритмы коррекции и достижения инвариантности качества матрицы сырья представлены в таблице 2.

Предложенные схемы коррекции можно использовать как непосредственно в аппаратурном решении для достижения инвариантности качества конечного продукта в случае аддитивной помехи, так и в методическом плане при решении вопросов коррекции в случае мультипликативной помехи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ***Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.06.2016 № 1364-р «Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции до 2030 года»*** *// Официальный интернет — портал правовой информации. — URL: http://www.government.ru (дата обращения: 20.04.2023)*
2. ***Пряничникова, Н. С.*** *Помехоустойчивость технологий как элемент инвариантности качества молочного продукта/Н. С. Пряничникова, С. А. Хуршудян, А. Г. Галстян// Молочная промышленность. 2022. № 7. С. 42–43. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-07-42-43*
3. ***Хуршудян С. А.*** *Оптические анализаторы жидких сред с помехоустойчивыми измерительными структурами: дис... д-р техн. наук: 05.11.13/Хуршудян Сергей Азатович. — М., 2002. — 373 с.*
4. ***Нестеров, В. Н.*** *Теория и практика построения инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе принципа двухканальности/В. Н. Нестеров, А. Р. Ли// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4 (7). С. 1414–1422.*
5. ***Тихомирова Н. А.*** *Технология и организация производства молока и молочных продуктов/ А. Н. Тихомирова. — М.: ДеЛи принт, 2007. — 560 с.*