

значительно снижается с 5×10^2 КОЕ до 1,47 КОЕ в расчете на одну капсулу.

Таким образом, разработана технология получения методом экструзии микрокапсул различных размеров с лактобактериями *L. acidophilus* на основе альгината натрия. Изменение скорости привода диспергатора оказывает влияние на такие параметры, как количество, средний размер гидратированных и сублимированных частиц, морфологические особенности микрокапсул и количество жизнеспособных клеток в них. Эти характеристики являются определяющими для дальнейшего применения технологии при производстве пробиотиков с продленными сроками хранения, а также при производстве пищевых продуктов функционального назначения.

Список использованных источников

1. Ali, U., Saeed, M., Ahmad, Z., Shah, F.-u.-H., Rehman, M. A., Mehmood, T., Rahman, A. (2023). Stability and survivability of alginate gum-coated lactobacillus rhamnosus GG in simulated gastrointestinal conditions and probiotic juice development. *Journal of Food Quality*, 2023.
2. Barajas-Alvarez, P., Gonzalez-Avila, M., & Espinosa-Andrews, H. (2023). Recent advances in probiotic encapsulation to improve viability under storage and gastrointestinal conditions and their impact on functional food formulation. *Food Reviews International*, 39(2), 992-1013.
3. Fu S, Thacker A, Sperger DM, Boni RL, Buckner IS, Velankar S, Munson EJ, Block LH (2011). Relevance of Rheological Properties of Sodium Alginate in Solution to Calcium Alginate Gel Properties. *AAPS Pharm. Sci. Tech*, 12(2), 453-460.

УДК 621.3.011.712

Д.А. Гринюк, П.Д. Петручук, Н.М. Олиферович, И.Г. Сухорукова
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

НАСТРОЙКА АДАПТИВНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРЕНДОВ

Аннотация. Проведено имитационное моделирование, которое показало, что локальная аппроксимация вносит небольшие искажения в процесс

фильтрации. На основании этого также получены формулы для расчета ширины окна по частоте или скорости сигнала с учетом коэффициента передачи и искажения.

D. Hryniuk, P. Petruchuk, N. Aliferovich, I. Sukhorukova

Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

ADAPTIVE SMOOTHING OF MEASUREMENT TRENDS SETUP

***Abstract.** Simulation modeling was performed, which showed that local approximation introduces small distortions into the filtering process. Based on the change in amplitude for the harmonic signal and the total harmonic distortion coefficient, formulas were obtained for calculating the window width by frequency or signal speed.*

Измерительный сигнал от датчиков требует различных процедур для извлечения желаемой информации. Первичный полезный сигнал сенсоров всегда содержит высокий уровень шумов, которые могут иметь различную природу происхождения. По этой причине, результаты работы сенсоров после преобразования в цифровой вид подвергаются обработке или непосредственно измерительной схемой преобразователя или последующими устройствами. Процедуры сглаживания измерительных трендов приводят к различным динамическим и статическим ошибкам и искажениям [1].

В целом алгоритмы снижения шума можно разделить на следующие группы в зависимости от выполняемой задачи:

- фильтрация для оценки значения в момент времени t_j с использованием данных $x_j, x_{j-1}, \dots$ и x_{i+1}, x_{i+2} ;
- сглаживание для оценки значения в точке t_i на основании данных $x_j, x_{j-1}, \dots$ и x_{j+1}, x_{j+2} ;
- прогнозирование выходного значения для времени t_i с использованием данные $x_i, x_{i-1}, \dots$ и x_{i+1}, x_{i+2} .

В работах [2, 3] было показано, что весьма эффективно производить процесс сглаживания, если ограничивать полином аппроксимации по методу СГ не выше второго порядка. Это значительно снижает потребность в вычислениях. Кроме этого, изменение оператора времени t_s может позволить регулировать динамические характеристики процесса сглаживания. Применение на практике показало эффективность данного подхода для обработки данных [2, 3].

В литературе можно найти разные варианты получения весовых функций для локальной аппроксимации [4]. Данный подход к сглаживанию занимает промежуточное положение между бегущим

средним и методом Савицкого-Голея. Одним из самых простых решений по поиску весовых коэффициентов могут быть линейная и квадратичная аппроксимации:

$$y(t) = c_1 + c_2 t; \quad (1)$$

$$y(t) = d_1 + d_2 t + d_3 t^2, \quad (2)$$

где

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_2 & w_1 \\ w_3 & w_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$w_j = \sum_{k=1}^N (t_k)^{j-1}; \quad b_j = \sum_{k=1}^N x_{i-k+1} (t_k)^{j-1}; \quad t_k = (k-1) \Delta t \text{ где } k = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

N – окно аппроксимации; x_i – последнее измеренное значение; Δt – время квантования.

Уравнения (3) и (4) вытекают из метода наименьших квадратов и не требуют больших вычислений. Но могут быть использованы другие весовые функции [5].

Расчета выходного значения y_i может быть использовано любое значение оператора времени в диапазоне от t_1 до t_N . Для значения оператора времени $t_{N/2}$ обычно наблюдается минимальная дисперсия. При сдвиге значения для оператора времени в сторону t_1 можно уменьшить динамическую ошибку и даже прогнозировать значение выходной переменной.

Коэффициенты уравнения (1) и (2) позволяют построить алгоритм адаптации процесса сглаживания так как фактически коэффициенты c_2 и d_2 являются значениями мгновенной скорости, а d_3 – ускорения.

С целью определения связи между динамикой информационного сигнала и параметрами настройки метода локальной аппроксимации как ширина окна N и оператор времени t_s было проведено имитационное моделирование и проведен анализ результатов для гармонического сигнала $x_1(t)$ и периодического сигнала с дополнительными гармониками (рис. 1). Второй сигнал создавался с помощью функции

$$x_2(t) = \sin(2\pi f t) (1 + 0,4 \sin(4\pi f (t + 0,12))), \quad (6)$$

где f – частота.

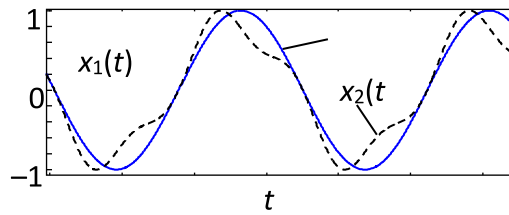


Рис. 1 - Сигналы имитационного моделирования

Оценку производили по коэффициенту искажения гармоник (THD):

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} c_n^2}}{c_1}, \quad (6)$$

где c_n – амплитуда n гармоники после разложения в ряд Фурье.

Для оценки влияния ЛА использовано среднее значение суммы квадратов ошибок отклонения исходной информации от обработанной ЛА за период D (СКОО).

Результаты и обсуждение. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтрации в сравнении с фильтром Баттерворта 3, 8 и 16 порядков представлены на рис. 2.

Как видно из графиков, до достижения ширины окна полупериода сигнала ЛА проявляет линейные свойства. По сравнению с фильтром Баттерворта, он имеет более плавное изменение коэффициента передачи до коэффициента среза (рис.2). Однако уже после коэффициента передачи 0,1, крутизна характеристики становится больше чем у БИХ фильтра

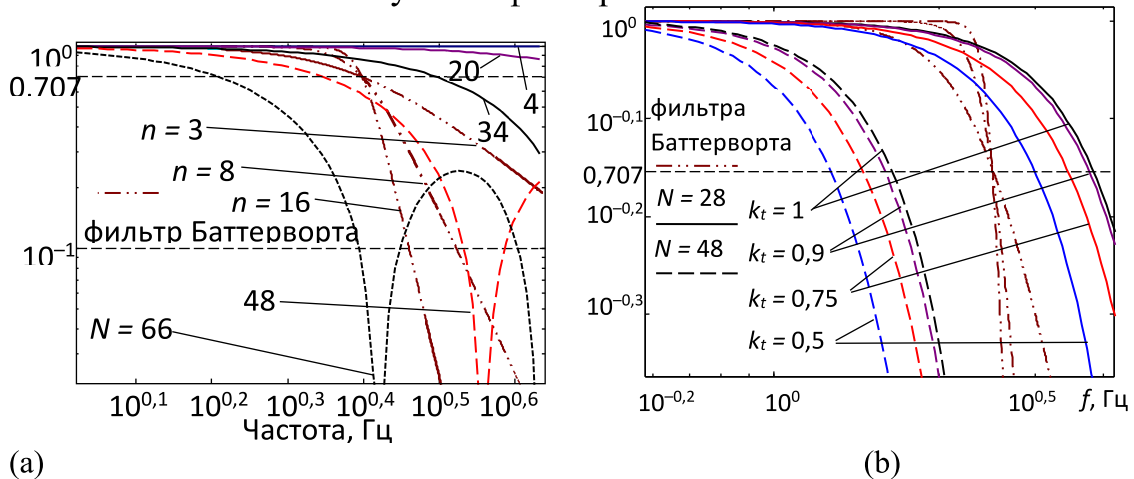


Рис. 2 - Коэффициент передачи при аппроксимации по (13) при разных значениях N (а) и оператора времени (б)

Оператор времени также влияет на полосу пропускания процесса фильтрации. Отклонение данного параметра от значения $N/2$ в ту или иную сторону приводит к смещению характеристики в

сторону низкой частоты. На рис. 2 (а) приведены характеристики в сторону начала отсчета выборки, но такая же картина наблюдается, если брать коэффициенты k_i больше 1.

На основании анализа значений для АЧХ были получены зависимости ширины окна аппроксимации от частоты f_c для двух пороговых значений 0,95 и 0,707 (рис. 5-6). Они имеют гиперболическую зависимость и хорошо аппроксимируются формулой вида

$$N = \exp(a - b \ln(f_c)) = \frac{\exp(a)}{f_c^b}. \quad (7)$$

Оператор времени следует осторожно использовать для регулирования процесса сглаживания с помощью предложенной аппроксимации. После некоторого значения t_s полоса пропускания перестает сужаться и начинается процесс расширения. Данный эффект является следствием того, что в точках максима и минимума гармонической функции сигнала начинаются существенные деформации формы, что приводит к увеличению амплитуды сигнала.

Оценка искажений сигнала в процессе ЛА с помощью коэффициента искажений THD для гармонического сигнала показала малое влияние окна аппроксимации, формулы аппроксимации и оператора времени на данный показатель. Как и следовало ожидать, по мере увеличения частоты искажения, нарастают фактически по экспоненте. При приближении к частоте среза начинает проявляться нелинейное влияние окна аппроксимации, однако значение коэффициента THD не превысило 1%. И, как следствие, настройка процесса сглаживания по амплитуде сигнала является более эффективной.

При использовании ЛА для негармонического сигнала могут наблюдаться различные нелинейные эффекты, особенно при широком значении окна аппроксимации или высокой частоте сигнала.

Для полинома аппроксимации второго порядка коэффициент b , в первом приближении, можно принимать равным 1, так как отклонения более чем на 5% наблюдаются за границами рациональной вариации параметра k_i .

Модуль средней скорости V и ускорения A может быть рассчитан для гармонического сигнала по следующим формулам

$$V = 4f; A = 8\pi f^2 \quad (8)$$

Исходя из этого можно заключить, что формула (7) может быть использована для построения адаптивного процесса сглаживания с помощью ЛА, поскольку для данного метода фильтрации происходит постоянное определение скорости (в (1) это c_2 ; в (2) – d_2 ; в (2) – g_2) на

каждом такте. На основании данных параметров можно менять окно аппроксимации, а вместе с ним, по необходимости, и k_t .

Исходя из этого, можно учитывать значения d_3 и g_3 для формирования окна аппроксимации на следующем такте.

Проведенное моделирование открывает перспективы для эффективного использования исследованного метода сглаживания. Разработаны правила выбора оптимального значения окна аппроксимации, оператора времени и порядка полинома. Нелинейные искажения метода приемлемы для многих прикладных задач.

Список использованных источников

1. Kowalski P. Smyk R. Review and comparison of smoothing algorithms for one-dimensional data noise reduction // International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPHDW). Świnouście, Poland, 2018. P. 277-281. DOI: 10.1109/IIPHDW.2018.8388373.

2. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N. Adaptive smoothing and filtering in transducers // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, Lithuania, 2016. P.1–4. DOI: 10.1109/eStream39242.2016.7485917.

3. Гринюк Д. А., Олифирович Н. М., Сухорукова И. Г. Использование алгоритмов аппроксимации для сглаживания трендов измерительных преобразователей // Труды БГТУ. 2017. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика, № 2 (200). С. 82–87.

4. Катковник В. Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. М.: Наука, 1985. 336 с.

5. Гринюк Д. А., Олифирович Н. М., Сухорукова И. Г. Оптимизация процесса сглаживания сигналов // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 72–79.