

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-4

ФИЛЬТР КАЛМАНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВЕЩЕСТВ В РЕЗЕРВУАРАХ**Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов, В. И. Маковкин***Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9624-7697>, zamnv@gmail.com.1947
smirnov@main.tusur.ru, assorti2030@yandex.ru*

Аннотация: рассматривается лазерный метод, с помощью которого определяется объем вещества в резервуаре. Лазерный метод не может дать точных измерений в условиях помех, создаваемых запыленностью, задымлением, парами в резервуарах. Одним из способов снижения ошибок измерения данным методом является применение фильтра Калмана.

Ключевые слова: резервуар, резервуарный парк, уровень веществ, измерение уровня, лазер, фильтр Калмана.

Для цитирования: Замятин Н. В., Смирнов Г. В., Маковкин В. И. Фильтр Калмана для измерения уровня веществ в резервуарах. *Успехи кибернетики*. 2022;3(2):31–35. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-4.

THE KALMAN FILTER FOR TANK LEVEL MEASUREMENTS**N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov, V. I. Makovkin***Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation**ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9624-7697>, zamnv@gmail.com.1947
smirnov@main.tusur.ru, assorti2030@yandex.ru*

Abstract: the study considers a laser-based method to measure the volume of the substance in a tank. The laser method cannot give accurate measurements when dust, smoke, vapors present in tanks. The Kalman filter can be used to reduce the measurement errors.

Keywords: tank, tank farm, substance level, level measurement, laser, Kalman filter.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V., Makovkin V. I. The Kalman Filter for Tank Level Measurements. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(2):31–35. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-2-4.

На промышленных предприятиях, которые занимаются добычей и производством, требуются комплексы устройств, предназначенные для хранения сырья и продуктов переработки. Такие комплексы, включающие взаимосвязанные группы резервуаров, оснащенные системами сокращения потерь продуктов, безопасности, пожаротушения и средствами автоматизации, называют резервуарными парками [1].

Развитие предприятий приводит к увеличению масштабов производства, и в связи с этим встает вопрос о быстром получении точной информации об имеющихся на предприятиях объемах веществ и динамике их применения. Это порождает задачу точного измерения данных показателей.

В данной работе будет рассматриваться лазерный метод, с помощью которого можно определить уровень и объем вещества в резервуаре. Однако лазерный метод (как и другие методы измерения) не может дать точных измерений в условиях помех, создаваемых внешними факторами, такими как запыленность, задымленность, пары в резервуарах. Одним из способов повышения точности при измерении уровня веществ является применение фильтра Калмана [7, 8, 9].

Целью работы является изучение фильтра Калмана применительно к лазерному методу измерения уровня в резервуарных парках. Для достижения цели нужно выполнить следующие задачи:

- представление принципов функционирования резервуарных парков;
- обзор лазерных уровнемеров, а также исследование альтернативных измерителей уровня;
- выполнение экспериментов с использованием лазерного уровнемера;
- сбор, обработка и анализ полученных данных;
- возможности применения фильтра Калмана;

- программная реализация фильтра Калмана на выборке данных, полученных в экспериментах.

Конечным результатов данной работы будет являться описание применения фильтра Калмана для обработки данных, полученных в экспериментах с использованием лазерного уровнемера, а также программная реализация данного метода.

Методы контроля и управления параметрами веществ в резервуарном парке

Система управления резервуарным парком содержит измерительное оборудование, средства сопряжения и связи, рабочие станции и программное обеспечение [10]. Для обеспечения оперативного управления резервуарным парком требуется знать ряд параметров, к которым относятся уровень и объем вещества в резервуарах, температура этого вещества, давление в резервуаре, расход вещества и ряд других величин. Для измерения уровня вещества в резервуарах и его объема наиболее перспективным из всех известных способов контроля этих параметров является лазерный метод [11].

Схематически процесс измерения уровня вещества лазерным методом представлен на рис. 1.

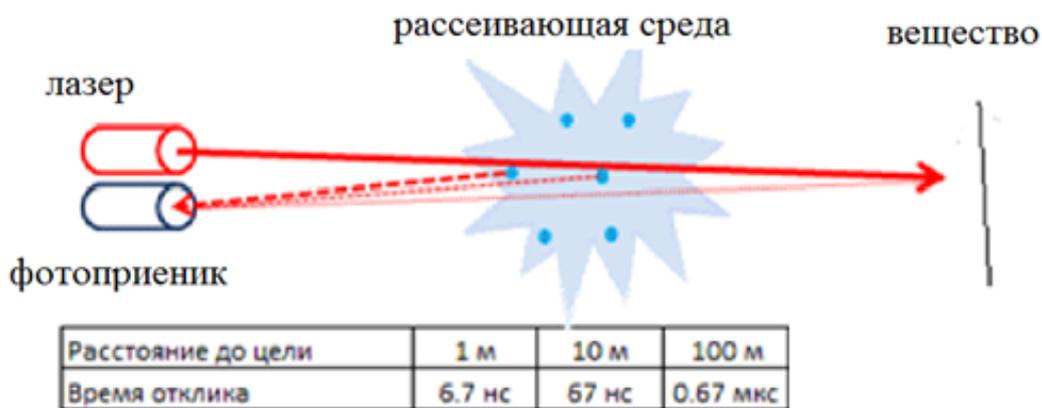


Рис. 1. Схема измерения уровня вещества в резервуаре лазерным методом

Для повышения точности и достоверности тех или иных измерений во многих процессах используется фильтр Калмана [3–6].

Схема функционирования фильтра Калмана приведена на рис. 2.

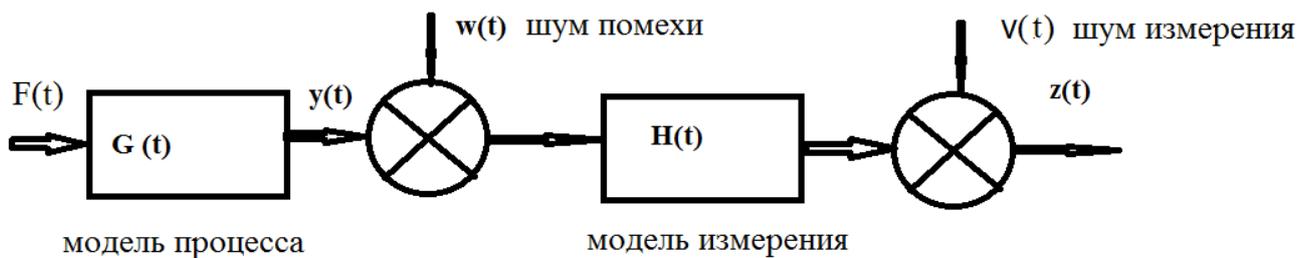


Рис. 2. Схема функционирования фильтра Калмана

Применение фильтра Калмана представляет собой итерационный процесс, который включает в себя прогноз (экстраполяцию) и корректировку.

Прогноз:

$$\hat{x}_{t-1|t-1} = F_t \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t u_t,$$

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t.$$

Корректировка:

$$y_t = \hat{x}_{t|t} - H_t \hat{x}_{t|t-1},$$

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t \tilde{y}_t,$$

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1},$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1}, \quad \text{где}$$

\hat{x}_1 — априорная оценка состояния на текущий шаг по оценке с предыдущего шага;

P — апостериорная ковариационная матрица ошибок состояния системы;

F — матрица перехода между состояниями;

B_t — матрица управляющих воздействий;

u_t — управляющее воздействие;

P — предсказание ошибки;

y — отклонение полученного на шаге k наблюдения;

H_t — матрица измерений;

R_t — матрица ковариаций шума измерений;

K_t — коэффициент усиления Калмана;

I — единичная матрица.

Индексы следующие: текущий период времени — $t|t$, предыдущий период времени — $t-1|t-1$ и $t|t-1$ являются промежуточными шагами.

Применение и практическое использование фильтра Калмана

Реализация фильтра Калмана апробирована в эксперименте по измерению уровня при прохождении лазерного луча уровнемера через запыленную среду, создаваемую песком, цементом и влагой.

Прогноз:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{t-1|t-1} &= \hat{x}_{t-1|t-1}, \\ P_{t|t-1} &= P_{t-1|t-1} + Q_t.\end{aligned}\quad (1)$$

Корректировка:

$$\begin{aligned}y_t &= \hat{x}_{t|t} - \hat{x}_{t|t-1}, \\ \hat{x}_{t|t} &= \hat{x}_{t|t-1} + K_t y_t, \\ K_t &= P_{t|t-1} (P_{t|t-1} + R_t)^{-1}, \\ P_{t|t} &= (I - K_t) P_{t|t-1}.\end{aligned}\quad (2)$$

Матрицы F_t и H_t для решаемой задачи принимаются единичными, так как измерение уровня представляет линейное объединение вектора состояния и случайных погрешностей, зависящих от помехи. Поскольку управление при измерении уровня отсутствует, управляющее воздействие $B_t u_t$ равно нулю. Для ковариационной матрицы погрешности измерений R используются данные о точности измерения, взятые из паспорта дальномера. Для получения ковариационной матрицы Q_t выполнялось моделирование методом Монте-Карло [2]. Процедура измерений уровня была реализована экспериментально в лабораторных условиях. Эксперимент проводился в лабораторных условиях, максимально приближенных к ситуациям на производстве, и для измерения уровня подходит любой цилиндрический объект.

Для эксперимента используются следующие материалы и оборудование:

- лазерный дальномер (далее устройство) на основе компонентов системы Овен МСД-200;
- персональный компьютер с операционной системой Microsoft (далее — ПК);
- пластиковый цилиндр объемом 12 л;
- подставка;
- цемент;
- песок;
- распылитель с водой.

Всего было проведено три эксперимента с песком, цементом и парами воды:

1. Устройство было помещено на подставку высотой 45 сантиметров.
2. Рядом с подставкой было установлен пластиковый цилиндр, в основание которого был направлен луч лазера.
3. Связь устройства и ПК осуществлялась при помощи специального программного обеспечения — конфигуратора МСД-200.
4. Запускался процесс сбора данных на устройстве, в это время в цилиндр на небольшом расстоянии от луча лазера вдувался песок, или цемент, или распылялась вода, создавая помехи на пути распространения лазерного луча.

5. Длительность описанных выше процессов составляла 50–70 секунд, по окончании которых устройство отключалось и эксперимент заканчивался.

Результатом всех экспериментов являются таблицы в формате .csv со значениями изменения уровня, ниже на рисунке 4 приведены результаты экспериментов в графическом виде. Далее к ним применялся алгоритм фильтрации Калмана. Наибольшие помехи создает пыль от цемента, а наименьшее воздействие имеют капли воды из распылителя.

При использовании фильтра Калмана по формулам (1) и (2) находилось приближенное значение уровня.

Рассматриваемая реализация фильтра Калмана апробирована в эксперименте по измерению прохождения лазерного луча уровнемера через запыленную среду, создаваемую песком, цементом и влагой [2].

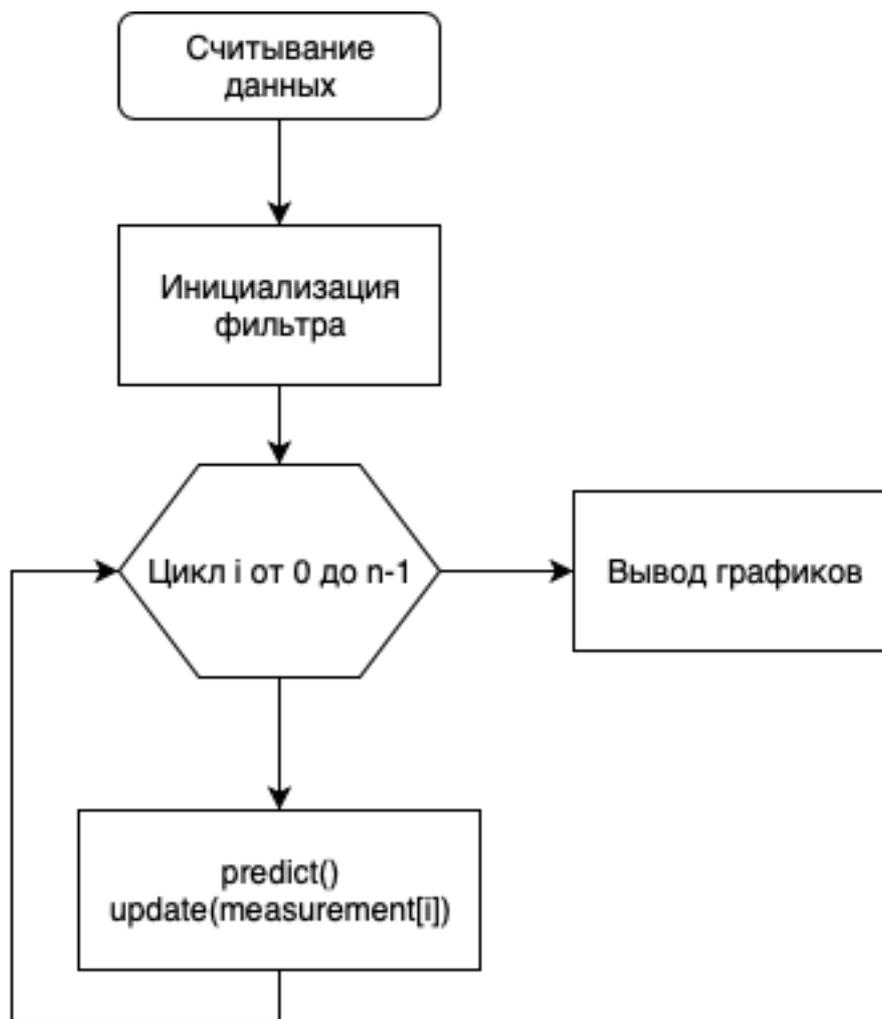


Рис. 3. Структурная схема алгоритма

Программная реализация фильтра Калмана

Для программной реализации выбран язык программирования Python, который имеет множество библиотек для анализа и обработки данных.

В представленной реализации были использованы следующие библиотеки: Numpy, Pandas и Matplotlib.

Структурная схема алгоритма программной реализации фильтра Калмана приведена на рисунке 3.

После выполнения программы были получены результаты фильтрации данных, которые представлены в графическом виде на рисунке 4. На этом рисунке по оси абсцисс показано время в секундах, по оси ординат указаны значения уровня в миллиметрах.

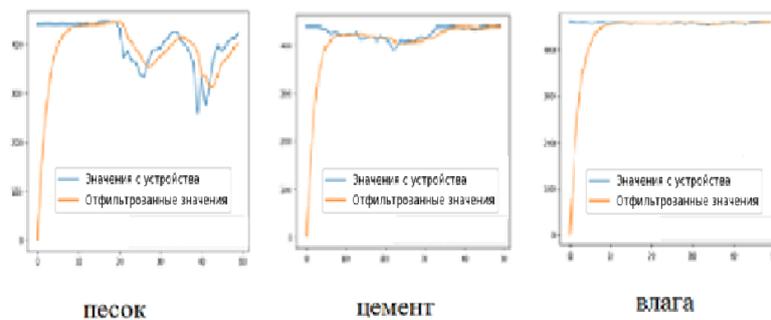


Рис. 4. Результат работы фильтра Калмана на выборке эксперимента с песком, цементом, влагой

В результате работы фильтра были получены уточненные значения исходных данных.

Заключение

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

- описано функционирование резервуарного парка;
- проведены эксперименты с использованием лазерного уровнемера, собраны и проанализированы полученные данные;
- кратко охарактеризован фильтр Калмана применительно к задаче измерения уровня в условиях помех;
- выполнена программная реализация фильтра Калмана и проведено применение реализации к выборке данных, полученных в экспериментах.

Фильтр Калмана является эффективным алгоритмом для отсеечения шумов и лишних данных, повышения точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Graaff R., Toelint M. H., de Mul F. F. M., Zijlstra W. G., Dassel A. C. M., Aarnoudse J. G. Condensed Monte Carlo Simulations for the Description of Light Transport. *Applied Optics*. 1993;32:426–434.
2. Маковкин В. И., Замятин Н. В. Модель прохождения лазерного излучения через запыленные и мутные среды в резервуарах. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2019;22(3):18–22. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-18-22.
3. Замятин Н. В., Маковкин В. И. Автоматизированная система мониторинга резервуарного парка. *Электронные средства и системы управления: материалы докладов Международной научно-практической конференции*. 2015;1–2:93–97.
4. Smirnov G. V., Zamyatin N. V. *Method of Control of Bulk Substances in Tanks [The Method of Controlling the Parameters of Bulging Substances in Reservoirs]*. Patent RF, no. 2017117123, 2017.
5. Makovkin V. I., Zamyatin N. V., Smirnov G. V. Disinfection and Usage of Anthropogenic Waste in Resource-Saving Construction Technologies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo assets Engineering*. 2018;329:164–174.
6. Mashutov I. Th., Shapovalov V. A., Adzhieva A. A. Algorithms of Electric Field Strength Data Processing Using Kalman Filter. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2018;23(3):131–139. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-23-3-131-139.
7. Степанов О. А. Фильтр Калмана: история и современность. *Гироскопия и навигация*. 2010;69(2):107–121.
8. Greg Welch, Gary Bishop. *An Introduction to the Kalman Filter*. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. April 5, 2004. UNC-Chapel Hill, TR 95–041. 2004. 16 p.
9. Резервуарные парки. Режим доступа: <https://www.neftegaz-expo.ru/ru/articles/2016/rezervuarnye-parki/>.
10. Измерение уровня. Методы, способы измерения уровня. Выбор уровнемера. Режим доступа: https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_1520.html.