

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КВИТИРОВАНИЯ ПРИ МАКЕТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЗВУКОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

О.Л. АХРЕМЧИК, д-р техн. наук, И.И. БАЗУЛЕВ, ст. преподаватель

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: axremchic@mail.ru

© Ахремчик О.Л., Базулев И.И., 2021

Рассматриваются вопросы моделирования и генерации множества звуковых сигналов технологической сигнализации на физическом макете. В ходе макетирования проводятся исследования времени реакции и выполнения последовательности действий оператором при использовании разных видов звуковых сигналов. Авторская методика исследования предусматривает предварительный выбор вида сигнала оператором и последовательную коррекцию вида и параметров сигнала в ходе эксперимента. Звуковые сигналы синтезируются с использованием метода частотной модуляции. Обработка полученных данных показывает, что следует отклонить гипотезу о нормальном законе распределения времени квитирования в пользу альтернативы о логнормальном законе. Проведенные эксперименты свидетельствуют о необходимости индивидуального подбора и настройки звуковых сигналов в системах технологической сигнализации.

*Ключевые слова:* звуковой сигнал, оператор, система, сигнализация, контроль, управление, параметр.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-77-83**

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших модулей системы управления технологическим объектом является модуль формирования сигналов сигнализации. На протяжении последних шестидесяти лет сигнализация рассматривается как результат изменения состояния объекта и используется для уведомления оператора о наличии отклонений без особых изменений в логике функционирования [1]. **На сигнализацию возлагаются две задачи:** привлечь внимание оператора к факту наступления события, требующего вмешательства в работу системы управления, и дать оператору начальную информацию о событии. Применяются три вида сигнализации: контрольная, предупредительная и аварийная [1]. Как правило, сигнал при срабатывании сигнализации является комбинацией светового и звукового сигналов, формируемых подсистемами световой и звуковой сигнализаций. Квитирование представляет собой нажатие на кнопку съема звукового сигнала с последующим его выключением и сохранением информации о причине срабатывания сигнализации.

В условиях возрастающей информационной нагрузки на оператора вопросы выбора и формирования правильной стратегии действий при срабатывании технологической сигнализации во многом определяются видом сигнала, опытом работы в контексте задач ликвидации причины и минимизации последствий появления отклонений. Задачей исследования являлось определение влияния вида сигнала на параметры закона распределения времени квитирования, включающего как простой съем (гашение) сигнала, так и последовательность простых действий оператора после

появления сигналов, связанных с последовательным нажатием кнопок на панели оператора по заданному алгоритму блокировки работы оборудования.

## ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Для исследования систем сигнализации и выбора типов акустических сигналов на кафедре автоматизации технологических процессов ТвГТУ разработан физический макет. На компьютере макета установлено авторское программное обеспечение (ПО) для измерения и хранения времени выполнения действий оператором [2]. Контроль состояния объекта управления осуществляется с помощью компонентов среды разработки SCADA/HMI DataRate, которая позволяет осуществить обмен данными по технологии OPC DA/HDA; визуализацию изменений и трендов сигналов с формированием звуковых сигналов по технологии семплинга [3]. Данная технология предусматривает предварительный синтез сигналов и их хранение в виде файлов базы данных сигналов. Разработчики системы DataRate используют в своих работах термин «аларм» вместо словосочетаний «сигнал сигнализации»/«аварийный сигнал», рассматривая его как предупреждение о важном событии, в ответ на которое нужно срочно предпринять некоторые действия, в том числе квитирование [3]. Воспроизведение сигнала звуковой сигнализации в макете является результатом отклонения параметров и координат состояния объекта контроля.

Сигналы сигнализации в макете классифицируются на подтвержденные (оператор вводит команду подтверждения) и неподтвержденные. Таким образом, при макетировании рассматривается не простое нажатие на кнопку съема сигнала, а последовательность нажатий на несколько кнопок, имитирующая ввод команды подтверждения.

Альтернативным вариантом представления информации оператору в макете является использование вместо ЭВМ малоформатной панели видеографической станции (рис. 1). В случае применения панелей оператора для определения времени реакции применяется протокол событий станции [4]. Протокол имеет два вида полей: сообщений о событиях и времени наступления событий. В случае использования видеографической станции в макете отсутствуют автоматическая рандомизация возмущений и ведение баз данных операторов и результатов эксперимента.

Настройка системы сигнализации осуществляется таким образом, чтобы срабатывание звукового сигнала происходило при выходе значения контролируемого параметра за заданную границу (на рис. 1 выделена красным). Одновременно со срабатыванием сигнализации на панели отображения состояния дискретных входов-выходов визуализируются результаты их изменения при действиях оператора. При отклонениях параметров последовательности действий в макете предусмотрена возможность изменения вида и/или параметров звукового сигнала при неизменном визуальном отображении.

С точки зрения эргономики прием аварийного сигнала рассматривается как формирование единого перцептивного образа [5], поэтому звук является неотъемлемой частью данного образа. В рамках восприятия и осознания звукового образа человек способен воспринимать и правильно идентифицировать от 16 до 25 градаций тональных сигналов, различающихся по высоте или громкости [6]. Наличие монотонного труда и отсутствие событий в течение длительного времени приводит к снижению работоспособности и повышению вероятности неправильных действий оператора. Возникают предпосылки для разработки систем сигнализации с множеством звуковых сигналов для каждого события [7].



Рис. 1. Внешний вид панелей макета при превышении значения контролируемого параметра (скорости двигателя)

Формирование непрерывного звукового сигнала для базы данных сигналов осуществляется на основе модуляции его параметров и аддитивного использования нескольких гармоник. Метод частотной модуляции применяется для создания непрерывного сигнала с постепенным увеличением или уменьшением частоты звука. Данная модель предусматривает изменение развертки несущей частоты в ограниченном частотном диапазоне в зависимости от вида сигнала (срабатывания предупредительной, уведомительной или аварийной сигнализации).

Модель звукового сигнала при частотной модуляции

$$s(t) = A_m \cos \left( 2\pi t \left( f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) + \frac{\Delta f t}{2T_c} \right),$$

где  $t$  – время;  $A_m$  – амплитуда сигнала;  $B = 2\pi\Delta f/T_c$  – скорость изменения частоты при воспроизведении сигнала;  $\Delta f$  – девиация частоты;  $f_0$  – несущая частота;  $T_c$  – длительность воспроизведения сигнала.

При моделировании сигналов в макете девиация  $\Delta f$  изменяется на основе продукционных правил, использующих в качестве аргументов величины и значимости отклонения, время квитирования, число допущенных ошибок, значимости потерь в результате ошибок.

### ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МАКЕТИРОВАНИИ

В ходе исследований рассматривались три класса звуковых сигналов, формируемых при срабатывании предупредительной, уведомительной и аварийной сигнализаций. Последовательность времени квитирования на звуковые сигналы соответствующих сигнализаций  $\{x_1, x_2, x_3\}$  составила массив для исследования. Предполагается, что вероятность совместного срабатывания разных сигнализаций мала и поэтому в каждый момент времени оператору поступает только один звуковой сигнал. В качестве

функции отклика рассматривается время выполнения последовательности действий, связанных с выполнением операции квитирования сигнализации.

Методика проведения эксперимента предусматривает шесть шагов. Первым шагом методики является формирование массива звуковых сигналов. Для этих сигналов вид сигнала определяют на основе языка сигналов, основанного на категориях сообщений, которые классифицируют в соответствии с их серьезностью (приоритетом). Разному приоритету соответствуют различные громкости и частоты сигналов. При выборе приоритета в ходе макетирования использовался подход специалистов фирмы АВВ, при котором приоритет основывается как на последствиях аварийного сигнала, так и на времени, допустимом для вмешательства оператора [8].

Выбор сигнала производился на основании индивидуальных предпочтений операторов, установленных в ходе предварительного опроса. В качестве сигналов звуковой сигнализации выбраны прерывистый сигнал в виде звука частотой 800 Гц в течение 0,5 с и паузой 1 с (сигнал 1) и постоянный сигнал в виде звука частотой 2 000 Гц (сигнал 2).

Второй шаг предусматривает знакомство оператора с системой контроля и управления (на примере системы управления электроприводом конвейера в условиях помех в виде шума работы двух электродвигателей) и проведение предварительного эксперимента, направленного на тренировку оператора с последующим определением числа параллельных испытаний в точках плана основного эксперимента. Данный шаг основан на общем принципе становления моторных навыков в процессе тренировки [9].

Третий шаг методики проведения эксперимента включает выдвижение проверяемой гипотезы (например, об отсутствии влияния вида сигнала на время выполнения действий) и модификацию плана эксперимента под конкретные условия испытаний (определение числа испытаний и уровней варьирования факторов).

Четвертый шаг заключается в проведении эксперимента, предусматривающего случайное изменение контролируемого параметра (скорости электродвигателя привода конвейера) выше допустимого предела, связанное с этим формирование звукового сигнала и контроль времени выполнения действий оператором по устранению причин отклонения. На этом шаге последовательно проходят стадии начала, проведения и завершения эксперимента (рис. 2). Стадии связаны с активизацией таймера, выдачей сигнала и измерением и записью временных интервалов.

Оператор при проведении исследования обрабатывает информацию на уровнях восприятия и декодирования сигналов [10]. В ходе эксперимента происходит переключение сознания с восприятия на осознание выбора последовательности действий, время квитирования является временем сложной моторной реакции.

Пятый шаг методики заключается в обработке результатов, принятии решения о справедливости выдвинутых гипотез. Обработка предусматривает получение статистических характеристик времени квитирования. Получение и анализ данных характеристик является первой фазой проектирования человеко-машинных систем, в том числе систем сигнализации.

Шестой шаг предусматривает формулировку выводов и рекомендаций по результатам исследования системы звуковой сигнализации. На данном шаге может потребоваться изменение мнемосхемы или элемента изображения мнемосхемы панели оператора.

Для обработки использовалось время выполнения тестовой задачи, регистрируемое как интервал между выполнением первой и последней операций, предписанных процедурой квитирования, либо как интервал от начала действий до момента восстановления процесса в первоначальное состояние. Такой подход применяется при разработке систем сигнализации в нефтехимическом производстве [12].



Рис. 2. Последовательность и стадии проведения эксперимента

В ходе макетирования систем сигнализации получены данные о времени выполнения последовательности действий разными операторами для различных видов сигналов. Объединенная выборка позволяет рассматривать закон распределения времени как композиционный. Кривая плотности распределения времени квитирувания для всех операторов (в эксперименте принимали участие шесть человек) симметричная с точками перегиба. Анализ законов распределения времени квитирувания отдельными операторами показал отклонения законов выборочных распределений от закона распределения объединенных выборок. Проверка гипотезы о законе распределения времени квитирувания для отдельных операторов с помощью критерия Колмогорова – Смирнова позволяет с вероятностью 95 % утверждать, что время выполнения действий при квитирувании подчиняется логарифмически нормальному распределению.

Отличия времени выполнения действий разными операторами незначительны, но в силу индивидуальных особенностей отдельные операторы по-разному квитируют сигнал при разных видах звука.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выборе предпочтительного вида звукового сигнала операторы выбирают разные виды сигналов, ориентируясь на индивидуальные предпочтения. Обработка значений времени действий при квитирувании сигнала в совместной выборке показывает, что совместное распределение является симметричным с пологими, имеющими точку перегиба ветвями кривой плотности распределения вероятности времени реакции. Частные выборки для отдельных операторов имеют несимметричность с удлиненной правой ветвью функции плотности распределения вероятности, что не позволяет рассматривать моду и медиану в качестве оценок центра распределения.

На основе результатов макетирования можно констатировать, что имеются различия времени выполнения действий операторами при разном виде звуковых сигналов.

Проведенные исследования показывают необходимость настройки параметров сигналов после их выбора оператором с целью уменьшения среднего времени квитирования, что требует формирования панели настройки для контроля действий оператора при работе в составе системы управления технологическим объектом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баклушин П.А. Автоматизация теплоэнергетических установок. М.: Госэнергоиздат, 1960. 354 с.
2. Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Программный комплекс для измерения времени аудиомоторных реакций операторов систем управления химико-технологическими процессами // *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30. № 2. С. 328–332.
3. Слета В., Гурьянов Л. От измерения и обработки тегов к объектам и быстрой разработке автоматизированных систем // *Control Engineering Россия*. 2015. № 6. С. 20–23.
4. Громов Д.В., Желтухин А.А. Видеографическая станция регистрации данных с распределенной архитектурой Интеграф 1000 // *Информатизация и системы управления в промышленности*. 2012. № 5. С. 16–20.
5. Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory // *Experimental Psychology*. 2017. V. 64 (1). P. 5–13.
6. Card S.K., Moran T.P., Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983. 469 p.
7. Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Расширение пространства выбора тональных сигналов для систем технологической сигнализации на основе промышленных контроллеров // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019. № 2. С. 41–46.
8. Холлендер М., Бьютель К. Интеллектуальная аварийная сигнализация // *АББ Ревю*. 2007. № 1. С. 20–23.
9. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966. 349 с.
10. Бакаев М.А., Разумникова О.М. Определение сложности задач для зрительно-пространственной памяти и пропускной способности человека-оператора // *Управление большими системами*. 2017. № 70. С. 25–57.
11. Jamieson G.A. Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Systems and Humans*. 2007. V. 37. № 6. P. 906–920.

**Для цитирования:** Ахремчик О.Л., Базулев И.И. Исследование процесса квитирования при макетировании систем звуковой сигнализации // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 77–83.

#### ACKNOWLEDGEMENT PROCESS RESEARCH UNDER THE PHYSICAL MODELLING OF SOUND SIGNALING

O.L. AKHREMCHIK, Dr. Sc., I.I. BASULEV, Sen. Lecturer

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,  
Russian Federation, e-mail: axremchic@mail.ru

Questions of modeling and generation of a set of sound signals of technological signaling on the physical model are considered. During prototyping researches of an operator response time and execution of the sequence of actions by the operator

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 2 (10), 2021*

when using different types of sound signals are conducted. The author's technique of a research includes preliminary selection of signal type and correction of signal parameters during the experiment. Sound signals are synthesized with use of method of frequency modulation. Experimental data processing showed that it is necessary to reject a hypothesis of the normal distribution of time of handshake in favor of an alternative about the logarithmically normal law. The made experiments testify to need of individual selection and setup of sound signals for the systems of technological signaling.

*Keywords:* sound signal, operator, system, signaling, checking, control, parameter.

## REFERENCES

1. Baklushin P.A. Avtomatizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok [Automation of thermal power plants]. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. 354 p.
2. Akhremchik O.L., Bazulev I.I. Software complex for measuring the time of audio-motor reactions of operators of control systems of chemical-technological processes. *Programmnye produkty i sistemy*. 2017. V. 30. No 2, pp. 328–332. (In Russian).
3. Sleta V., Guryanov L. From measurement and processing of tags to objects and rapid development of automated systems. *Control Engineering Rossiya*. 2015. No 6, pp. 20–23. (In Russian).
4. Gromov D.V., Zheltukhin A.A. Videographic data recording station with distributed architecture Integraf 1000. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti*. 2012. No 5, pp. 16–20. (In Russian).
5. Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory. *Experimental Psychology*. 2017. V. 64 (1), pp. 5–13.
6. Card S.K., Moran T.P., Newell A. The psychology of human-computer interaction. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1983. 469 p.
7. Akhremchik O.L., Bazulev I.I. Expansion of the space for selecting tones for process signaling systems based on industrial controllers. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*. 2019. No 2, pp. 41–46. (In Russian).
8. Hollender M., Butel K. Intelligent alarm system. *ABB Revyu*. 2007. No 1, pp. 20–23. (In Russian).
9. Bernstein N.A. Ocherki po fiziologii dvizheniy i fiziologii aktivnosti [Essays on the physiology of movements and the physiology of activity]. Moscow: Meditsina, 1966. 349 p. (In Russian).
10. Bakaev M.A., Razumnikova O.M. Determination of the complexity of tasks for visual-spatial memory and the throughput of a human operator. *Upravlenie bolshimi sistemami*. 2017. No 70, pp. 25–57. (In Russian).
11. Jamieson G.A. Ecological interface design for petrochemical process control: an empirical assessment. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Pt. A: Systems and Humans*. 2007. V. 37. No 6, pp. 906–920.

Поступила в редакцию/received: 11.02.2021; после рецензирования/revised: 05.04.2021;  
принята/accepted: 08.04.2021