
МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

КОСВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ В ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

С. М. Абдуейф^{a, b}, А. П. Ильин^{a, b}

^a ООО «АФС-Технологии», Химки, Россия

^b Кафедра инновационной фармацевтики, медицинской техники и биотехнологии
Московского физико-технического института

(национального исследовательского университета), Долгопрудный, Россия

^b Chemical Diversity Group, Химки, Россия

Автоматизация и мониторинг в режиме реального времени затруднены тем фактом, что традиционные методы управления процессами в непрозрачных реакторах обычно полагаются на дорогостоящие и инвазивные датчики. В данной работе рассматривается недорогой, неинвазивный метод, обеспечивающий получение полезной информации о динамике процесса на основе анализа электрической энергии. Мы демонстрируем применение колебаний электрических параметров, таких как мощность и ток, в качестве индикаторов значительных изменений процесса в непрозрачных реакторах. Этот метод может быть особенно полезен в высокотехнологичной промышленности, где для производства стабильной и высококачественной продукции требуется точное управление процессами. При оценке преимуществ и ограничений метода мы подчеркиваем, как этот подход может повысить эффективность производства, сокращая необходимость вмешательства человека в управление процессом [1].

Automation and real-time monitoring are hampered by the fact that traditional methods of controlling operations in opaque reactors typically rely on expensive and invasive sensors. This work discusses a low-cost, non-invasive technique that provides useful insights into process dynamics using electrical energy analysis. We demonstrate the application of electrical parameter fluctuations such as power and current as indicators of significant process changes in opaque reactors. This method could be of great benefit to the High-Tech industry, where precise process control is required to produce consistent, high-quality products. In our evaluation of the advantages and limitations of the method, we emphasize how the approach can increase production efficiency while reducing the need for human intervention in process control [1].

PACS: 82.80.–d; 07.07.Tn

ВВЕДЕНИЕ

Стремление к надежной и отказоустойчивой автоматизации в химической технологии основано на желании минимизировать вмешательство человека, повысить стабильность процесса и увеличить общую эффективность. Однако достижение этой

цели часто связано с трудностями, поскольку прямое наблюдение и управление внутренними переменными процесса затруднено. Многие химические процессы протекают в герметичных, непрозрачных аппаратах, что затрудняет непосредственный мониторинг и требует использования дорогостоящих и сложных датчиков.

Это особенно актуально в фармацевтическом производстве, где строгие правила GMP (Good Manufacturing Practice — надлежащая производственная практика) требуют жесткого контроля параметров процесса для обеспечения стабильного качества продукции [2]. Необходимость точного контроля и возможность человеческих ошибок подчеркивают важность надежных систем автоматизации. В то время как традиционные подходы основаны на прямом измерении переменных процесса, в данной статье предлагается новый метод косвенного управления процессом, использующий легкодоступные параметры электрической сети. Анализируя колебания тока, активной мощности и полной мощности, мы можем судить об изменениях, происходящих в «черном ящике» химического оборудования. Этот подход предоставляет экономически эффективный и потенциально более надежный метод мониторинга и управления процессами и потенциально приводит к:

- упрощению мониторинга: уменьшению зависимости от сложных и дорогостоящих датчиков;
- сокращению затрат: избежанию установки и обслуживания дорогостоящих систем прямого измерения;
- повышению надежности: использованию избыточных потоков данных от параметров электрической сети для улучшения управления процессом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Непосредственный мониторинг и контроль всех критических параметров процесса в химической инженерии могут быть затруднены и дорогостоящими по следующим причинам:

- непрозрачное оборудование: большинство химических процессов происходит в герметичных и непрозрачных реакторах, что делает невозможным непосредственное наблюдение за внутренними условиями;
- дорогостоящие датчики: для измерения определенных переменных процесса часто требуются специализированные датчики, что приводит к значительным финансовым затратам;
- ограниченный доступ: из-за особенностей оборудования некоторые переменные процесса могут быть недоступны или трудно измеримы;
- сложная динамика процесса: многие химические реакции демонстрируют сложную динамику, требующую передовых сенсорных систем для точного захвата всех соответствующих параметров.

Указанные проблемы демонстрируют необходимость разработки альтернативных методов мониторинга и управления процессами, которые не ограничиваются прямым измерением параметров [3].

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ: КОСВЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В данной работе предлагается использование легкодоступных параметров электрической сети в качестве косвенных маркеров изменений процесса. Обоснование этого метода основано на фундаментальной идеи, что изменения электрических параметров часто связаны с изменениями в базовом процессе.

Например:

- мощность: увеличение потребляемой мощности может быть признаком увеличения теплопередачи, интенсивности перемешивания или скорости реакции в реакторе;
- активная мощность: изменения в потреблении активной мощности могут предоставить информацию об эффективности теплопередачи или ходе реакции, отражая изменения в энергетических потребностях процесса;
- полная мощность: колебания полной мощности могут выявлять изменения в общей электрической нагрузке процесса, отражая энергию, потребляемую устройством и реакцией.

Анализируя тенденции и закономерности в этих параметрах электрической сети, мы можем определять изменения процесса и инициировать необходимые корректировки для поддержания стабильности процесса и достижения желаемого качества продукции. Данная стратегия предлагает ряд потенциальных преимуществ:

- экономическая эффективность: использование существующих систем мониторинга электроэнергии означает меньшую потребность в специализированных датчиках;
- повышенная надежность: общая надежность системы управления повышается за счет резервирования, обеспечиваемого множественными точками данных электрических параметров;
- адаптируемость: метод предоставляет гибкое решение для мониторинга и управления процессами и может быть легко адаптирован к различным требованиям.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР: КОСВЕННЫЙ МОНИТОРИНГ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В наших фармацевтических производственных процессах мы изучаем задачу управления процессом кристаллизации. Для этого нам необходимо четко определить критерии завершения процесса кристаллизации. Фармацевтическая кристаллизация является одним из ключевых этапов разработки лекарственных средств, который оказывает непосредственное влияние на чистоту, растворимость и биодоступность активных фармацевтических субстанций (АФС) в процессе производства. В традиционных методах мониторинга, которые часто включают визуальный контроль или передовые аналитические процедуры для измерения, использование оборудования в процессах кристаллизации может быть непрозрачным и может мешать получению достоверных данных. В этом исследовании демонстрируется возможность применения стратегий косвенного мониторинга, основанных на параметрах электрической сети, для повышения автоматизации и контроля в фармацевтическом процессе кристаллизации.

Это включало мониторинг параметров электрической сети в режиме реального времени, а также получение входных данных от узлов процесса кристаллизации для

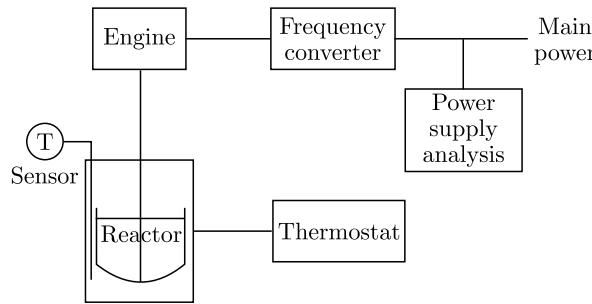


Рис. 1. Техническая схема эксперимента

анализа взаимосвязи между параметрами энергопотребления (например, ток, активная мощность, реактивная мощность) и состоянием кристаллизации. Экспериментальная установка состояла из стандартного периодического реактора (200/250 л), обычно используемого в фармацевтическом производстве, оснащенного датчиком температуры, преобразователем частоты INNOVERT IVD152B43E, охлаждающим термостатом VMT 24 и модулями OWEN ME210-701 для записи электрических параметров, прикладываемых к системе (рис. 1).

Значения полной, активной и реактивной мощности получены расчетным путем по формулам, приведенным ниже.

Полная мощность, VA:

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}},$$

где V_{rms} — среднеквадратичное (RMS) значение напряжения; I_{rms} — среднеквадратичное значение тока.

Активная мощность, VA:

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между V и I .

RMS значения напряжения и тока рассчитываются по следующим формулам:

$$V_{\text{rms}} = K_V \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}, \quad I_{\text{rms}} = K_I \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt},$$

где V — значение фазного напряжения; T — период; K_V — коэффициент трансформации напряжения; I — значение фазного тока; K_I — коэффициент трансформации тока.

Значимые закономерности в электрическом параметре активной мощности наблюдались по мере продвижения процесса кристаллизации через различные стадии (рис. 2). Например, во время фазы нуклеации наблюдалось последовательное увеличение электрического тока, что предполагает увеличение энергопотребления из-за процессов повышенного перемешивания и перемешивания, необходимых для образования кристаллов. Внезапное увеличение активной мощности связано с более высоким сопротивлением, с которым сталкивается мешалка реактора из-за более высокой вязкости раствора, чтобы продолжать перемешивание с той же частотой. С другой

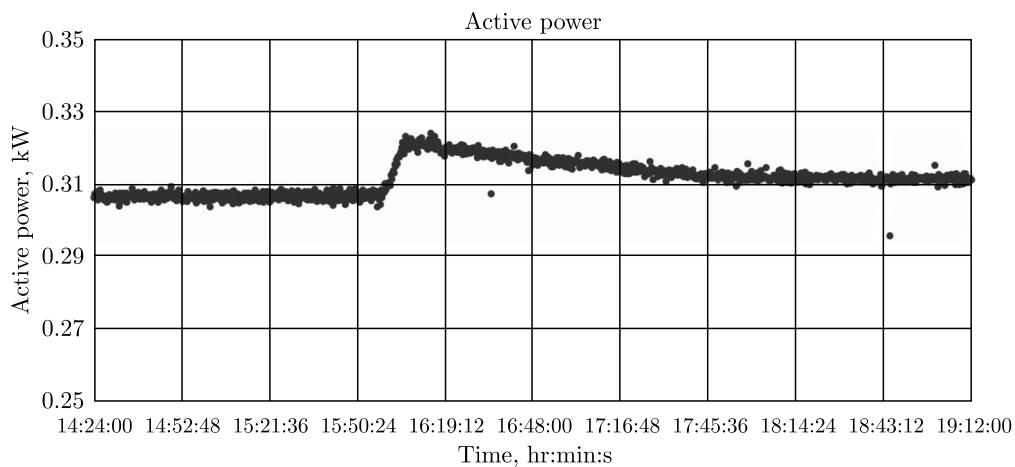


Рис. 2. График зависимости активной мощности от времени кристаллизации продукта VM1500A 905420724-2/7

стороны, поскольку акцент в системе сместился на стимулирование роста кристаллов, а не на создание турбулентности, стабилизация потребления тока и заметное снижение активной мощности во время фазы роста кристаллов свидетельствовали о том, что система стабилизировалась. Сравнивая эти наблюдения, мы смогли заключить, что потребление энергии является хорошим индикатором как энергозатрат, так и динамических изменений, происходящих внутри химического реактора. После установления надежной корреляции между конкретными условиями эксплуатации и электрическими параметрами мы создали калибровочную модель, которая позволила осуществлять прогнозирующее управление процессом кристаллизации, тем самым облегчая автоматизированную корректировку для максимизации выхода и чистоты.

В текущей экспериментальной установке начало и завершение процесса кристаллизации определялись путем непосредственного наблюдения химическими операторами и аналитического отбора проб в процессе производства в соответствии с обычной производственной процедурой. Эти визуальные оценки были сопоставлены с соответствующими данными измерений, полученными в ходе эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Косвенный мониторинг параметров электрической сети может предоставить важную информацию о динамике фармацевтических процессов кристаллизации, что подтверждается данным практическим примером. Определение состояния процесса без непосредственного визуального контроля улучшает возможности автоматизации, одновременно оптимизируя операционную эффективность. По мере дальнейшего исследования мониторинга электрических параметров будет продолжена разработка автоматизированных методов управления для широкого спектра технологий химической обработки. Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке надежных алгоритмов для корреляции параметров электрической сети с конкретными

переменными процесса, верификации методики посредством экспериментов и изучении возможности интеграции этого метода в уже существующие системы автоматизации. Управление процессами и оптимизация значительно улучшатся благодаря этим исследованиям, открывая путь к более надежной, экономичной и эффективной автоматизации в химической промышленности.

Применимость этого метода, однако, может быть ограничена внутренней природой исследуемой химической системы. Системы с незначительными колебаниями электрической нагрузки в критических фазах процесса, таких как инициация и завершение, могут не давать однозначных результатов. В будущих исследованиях необходимо изучить универсальность этого метода для различных химических систем, чтобы определить границы его успешного применения. Кроме того, необходимы дальнейшие исследования для оценки подходящей частоты дискретизации и методов обработки сигналов для точного мониторинга процессов кристаллизации с широким диапазоном кинетических профилей. В случаях чрезвычайно медленной кристаллизации ожидается, что тенденции активной мощности будут низкими, а инкрементные электрические изменения очень медленными, что создаст препятствие для установления их отличия от не связанных с процессом флюктуаций или базового шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aboudeif S., Ilyin A.* Analysis of Power Supply Parameters for Indirect Process Control // Proc. 7th Intern. Conf. on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA), Wuhan, China, 2024. P. 10–15.
2. ISPE. GAMP 5. A Risk-Based Approach to Compliant GxP Computerized Systems.
3. *Larsen P. A., Patience D. B., Rawlings J. B.* Industrial Crystallization Process Control // IEEE Control Systems Mag. 2006. V. 26, No. 4. P. 70–80.
4. Russian Federation Rules for the Installation of Electrical Installations. All Applicable Sections. 6th and 7th Ed. 2024.
5. OWEN ME210-701. Operation Manual 04.2023, Version 1.37.

Получено 7 апреля 2025 г.