

АВТОМАТИЗАЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ

С.И. Малафеев (ООО Компания «Объединенная Энергия»),

Ю.В. Тихонов (Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

Рассматриваются результаты применения методов моделирования рабочих процессов для диагностики состояния электрооборудования горных машин. Дано описание алгоритмов и приведены сведения об их реализации в информационно-диагностических системах, разработанных в ООО Компания «Объединенная Энергия»¹.

Ключевые слова: автоматизация, моделирование, электрооборудование, ресурс, компьютер, диагностика, система управления.

Введение

Повышение технологических и эксплуатационных характеристик горных машин имеет особое значение для развития добывающей промышленности. Современные горные машины – сложные высокопроизводительные агрегаты, содержащие множество различных механизмов с электроприводами разных типов [1, 2]. Поэтому актуальной является задача оптимизации жизненного цикла электрооборудования (трансформаторов, электрических машин, коммутационной аппаратуры и др.), предполагающая прогнозирование физических процессов в различных режимах, оценивание состояния и остаточного ресурса оборудования. Создание интеллектуальных систем для горных машин предполагает разработку специализированных программно-технических средств для решения этих задач в реальном масштабе времени [3]. Основу таких систем составляют математические модели рабочих процессов и эволюции характеристик оборудования в процессе эксплуатации [4].

Функционирование любой системы можно представить как результат взаимодействия трех ресурсов: материального, энергетического и информационного [5]. Материальный ресурс – это физические элементы и устройства, образующие систему и имеющие определенный запас прочности. Эффективность использования в системе материального ресурса, так же как и энергетического, в значительной степени определяется уровнем информационного ресурса – присущей ей структурной и процессуальной организации. Поэтому важной функцией интеллектуальной системы является непрерывный контроль состояния материального ресурса компонентов.

В настоящей работе представлены результаты проектирования и практической реализации информационно-диагностических систем для мехатронных комплексов горных машин, выполненных в ООО Компания «Объединенная Энергия» (Москва).

Организация мониторинга с использованием диагностических моделей оборудования

Традиционные системы мониторинга электрооборудования горных машин обеспечивают сбор и обработку данных с датчиков, отображение на оператор-

ской панели основных параметров ТП и состояния электрического и механического оборудования, регистрацию всех отображаемых параметров в энерго-независимой памяти. Организация технологических экранных страниц предусматривает как параллельное представление всех процессов, так и детальное отображение процессов в отдельных подсистемах с графическими формами данных и параметрами компонентов системы [2].

Обычные способы мониторинга, как правило, направлены на сбор данных и обеспечивают общее предупреждение о прогнозируемом отказе оборудования. Традиционно специалисты оценивают имеющиеся данные на основании технологических тенденций и личного опыта. Решение о ремонте или выполнении технического обслуживания принимается на основании оценки надежности в соответствии с субъективным мнением эксперта. Во многих случаях оценивание ресурса основывается только на количестве часов работы оборудования с момента начала эксплуатации или последнего технического обслуживания.

Анализ данных оператором или другими специалистами, в том числе с помощью удаленного мониторинга, не обеспечивает желаемой эффективности из-за большого объема информации. Интеллектуальная обработка данных и представление результатов в виде решений и заключений позволяет автоматизировать процессы контроля и диагностики и организовать эксплуатацию машины при минимальных затратах на поиск и обнаружение неисправностей, ремонты и восстановление.

Обработка данных о состоянии, нарушениях и прогнозе дальнейшей работы и остаточном ресурсе опирается на физические и математические модели рабочих процессов [4]. Математические описания разных компонентов и подсистем объекта (двигатели, преобразователи, трансформаторы и др.) имеют принципиально различные структуры, а в горных машинах (экскаваторах, буровых станках, земснарядах) используются десятки подсистем и сотни групп оборудования. Разработка адекватных моделей для разных компонентов машины с учетом специфики их работы в конкретных условиях составляет основную задачу при построении интеллектуальной диагностической системы.

¹ Статья подготовлена в процессе выполнения научно-исследовательской работы по гранту РФФИ № 14-08-00455.

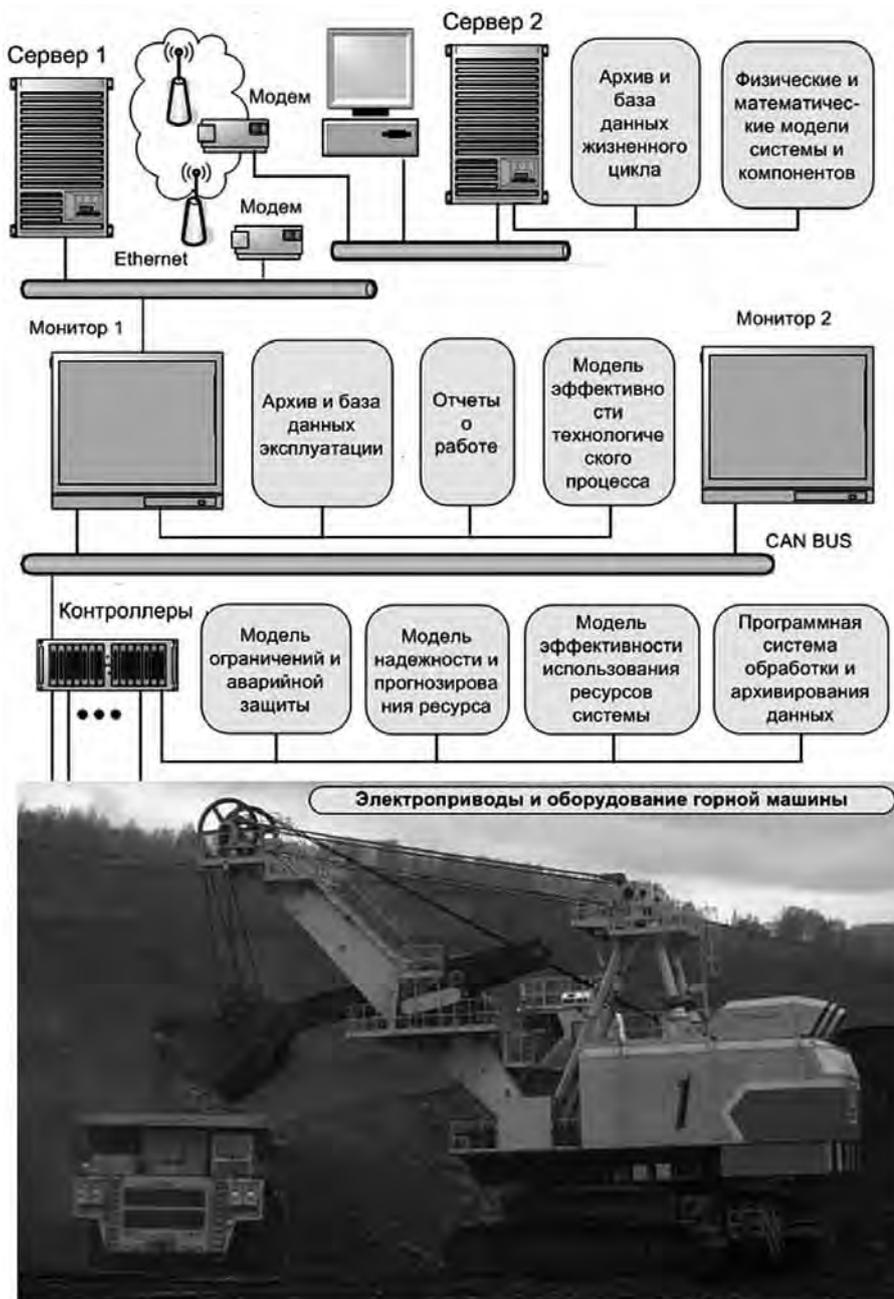


Рис. 1. Функциональная схема системы диагностики на основе моделей рабочих процессов

Все основное и вспомогательное оборудование горной машины оснащается подсистемами расширенного мониторинга с полным набором первичных датчиков, программных и технических средств сбора диагностической информации и интеграции в информационно-диагностическую систему (ИДС). Локальные подсистемы расширенного мониторинга для разных компонентов комплектуются вместе с оборудованием и используют подстанционные средства визуализации, архивирования и документирования.

На рис. 1 показана функциональная схема взаимодействия компонентов интеллектуальной системы мониторинга оборудования с использованием моделей рабочих процессов. Локальные системы мониторинга

построены на основе специализированных контроллеров или промышленных компьютеров, которые выполняют обработку данных с датчиков, их анализ и архивирование. Модель ограничений и аварийной защиты обеспечивает работу локальных систем защиты оборудования. Модель надежности используется для оценивания текущего состояния оборудования и прогнозирования ресурса на основе текущих и архивных данных. Модель эффективности использования ресурсов системы обеспечивает контроль энергопотребления, оценивание потерь и загрузки компонента. Обработанные данные от всех устройств передаются на сервер машины (сервер 1). Первый монитор, размещенный в кабине машиниста, обеспечивает получение оператором сведений о состоянии машины. Второй монитор размещен в машинном отделении. Контроллеры обеспечивают мгновенную диагностику отказов. Все тревожные сообщения и предупреждения отражаются на мониторах. Уровень локальных подсистем контроля обеспечивает штатное функционирование всех узлов и агрегатов, позволяет вовремя сообщать о замене компонентов или проведении технического обслуживания по состоянию. ПО позволяет оценивать эффективность и правильность действий машиниста, выдавая соответствующие рекомендации [2].

Программно-аппаратный комплекс «Электронный машинист» — это аналитический наблюдатель за работой экскаватора и его подсистем в течение всего жизненного цикла, выполняет обработку сигналов из ИДС и анализ процессов, состояния оборудования и действий машиниста, на основе анализа формирует объективные данные об эффективности работы машины, формирует базу данных эксплуатации, отражающую историю, состояние и ресурс.

Данные, поступающие из ИДС и преобразованные по специальным алгоритмам, выводятся на монитор и сохраняются на сервере. Важная для оценки работы информация запоминается в программных модулях и обрабатывается с целью анализа эффективности работы экскаватора, оценивания его надежности.

В процессе работы производится регистрация основных процессов, изменения состояния оборудования, протоколов аварий и др. Данные хранятся на сервере и передаются в центр. Срок хранения записей зависит от вида процесса и типа оборудования. Данные, получаемые с машины, используются разработчиком оборудования для уточнения моделей при проектировании новых машин и коррекции параметров существующих.

Примеры диагностических моделей оборудования

Основное электрооборудование горных машин — электрические машины (двигатели и генераторы), коммутационные аппараты, трансформаторы, полупроводниковые преобразователи, технические средства автоматики.

1. Двигатели постоянного тока

Контролируемые параметры двигателей постоянного тока приводов главного движения: температура обмоток статора, температура подшипников, вибрация, сопротивление изоляции и состояние коллекторно-щеточного узла. Данные о температуре используются для тепловой защиты двигателей и оценивания ресурса изоляции в соответствии с ГОСТом 14209-97. Непрерывный контроль сопротивления изоляции двигателя производится с помощью специальных устройств типа Аргус [6, 7]. На рис. 2 показана функциональная схема системы контроля и визуализации работы щеточно-коллекторного узла.

Контроль работы щеточно-коллекторного узла производится путем измерения температуры обмоток, параметра, характеризующего искрение, тока, угловой скорости двигателя и длины щеток на основании модели его работы. На основании данных непрерывных измерений вычисляются коэффициент корреляции между параметром ξ , характеризующим искрение, и током i двигателя $r_{\xi i}$ и коэффициент корреляции между параметром ξ , характеризующим искрение, и угловой скоростью Ω двигателя $r_{\xi \Omega}$ на скользящем интервале времени по формулам:

$$r_{\xi i} = \frac{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}] \cdot [i(k) - \bar{i}]}{\sqrt{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}]^2 \cdot \sum_{k=n-N+1}^n [i(k) - \bar{i}]^2}}$$

$$r_{\xi \Omega} = \frac{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}] \cdot [\Omega(k) - \bar{\Omega}]}{\sqrt{\sum_{k=n-N+1}^n [\xi(k) - \bar{\xi}]^2 \cdot \sum_{k=n-N+1}^n [\Omega(k) - \bar{\Omega}]^2}}$$

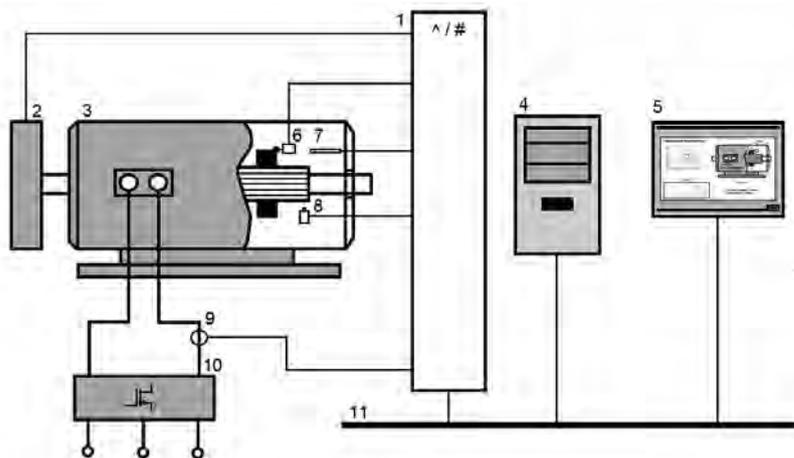


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля искрения щеточно-коллекторного узла электрического двигателя постоянного тока, где 1 – контроллер, 2 – датчик угловой скорости ротора, 3 – электрический двигатель постоянного тока, 4 – компьютер (уровня АСУТП), 5 – панель оператора, 6 – датчик длины щеток, 7 – датчик параметра, характеризующего искрение, 8 – датчик температуры обмоток ротора, 9 – датчик тока якорной обмотки, 10 – преобразователь напряжения 11 – шина данных

где $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n \xi(k)$; $\bar{i} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n i(k)$; $\bar{\Omega} = \frac{1}{N} \sum_{k=n-N+1}^n \Omega(k)$; $n \geq N$; n – базисная точка на оси времени; N – число отсчетов на скользящем интервале времени.

Значения $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$ позволяют определить вероятную причину искрения и оценить состояние щеточно-коллекторного узла двигателя в зависимости от принадлежности рабочей точки в пространстве контролируемых параметров к области нормальных, допустимых или аварийных режимов по следующей схеме: если $r_{\xi i} \approx 0$ и $r_{\xi \Omega} \approx 0$, то искрение отсутствует, если $r_{\xi i} \gg r_{\xi \Omega}$, то причины искрения электромагнитные, если $r_{\xi i} \ll r_{\xi \Omega}$, то причины искрения механические, если $r_{\xi i} \approx r_{\xi \Omega}$ и $r_{\xi i} \gg 0$, то причины искрения – смешанные.

Принадлежность режима работы двигателя к области нормальных, допустимых или аварийных режимов производится с помощью неравенств:

$$\begin{cases} I_1 < i < I_2; \\ \Omega_1 < \Omega < \Omega_2; \\ \theta_1 < \theta < \theta_2; \\ \xi_1 < \xi < \xi_2; \\ r_{\xi \Omega 1} < r_{\xi \Omega} < r_{\xi \Omega 2}; \\ r_{\xi i 1} < r_{\xi i} < r_{\xi i 2}; \\ l_1 < l < l_2. \end{cases} \quad (1)$$

В неравенства входят измеренные параметры: ток якорной обмотки i , угловая скорость Ω , температура обмоток ротора θ , длина щеток l , параметр, характеризующий искрение ξ и коэффициенты корреляции $r_{\xi \Omega}$ и $r_{\xi i}$. Каждому из режимов (нормальному, допустимому и аварийному) соответствуют свои допустимые интервалы для каждого из параметров.

Система неравенств (1) представляет собой модель технического состояния коллекторно-щеточного узла двигателя. Если все параметры находятся в нормальных интервалах значений, режим работы двигателя считается нормальным. Если хотя бы один из параметров выходит из интервала, соответствующего нормальному режиму, и при этом ни один из параметров не выходит за границы интервала, соответствующего допустимому режиму, режим работы двигателя считается допустимым. Если хотя бы один из параметров выходит из интервала, соответствующего допустимому режиму работы, то в этом случае двигатель работает в аварийном режиме.

Вычисление остаточного ресурса щеток производится по формуле:

$$T(\tau) = T_0 - k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt - k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt - k_3 \int_0^{\tau} e^{-\frac{t-i_0}{i_0}} dt. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой модель ресурса щеток двигателя, где T_0 — полный номинальный ресурс работы щеток, соответствующий техническим условиям; $k_1 \int_0^{\tau} \Omega(t) dt$ и $k_2 \int_0^{\tau} i^2(t) dt$ — составляющие, характеризующие механическое и электрическое изнашивание щеток соответственно; $k_3 \int_0^{\tau} e^{-\frac{t-i_0}{i_0}} dt$ — составляющая, характеризующая изнашивание щеток при малых токах.

Таким образом, моделирование процесса износа щеток в реальном времени позволяет достаточно точно определить этот показатель без необходимости его непосредственного измерения.

Компьютерная визуализация работы щеточно-коллекторного узла, использующая анимированное изображение искрения на основе значений температуры обмоток, угловой скорости ротора, тока, длины щеток, параметра, характеризующего искрение, и коэффициентов корреляции $r_{\xi i}$ и $r_{\xi \Omega}$, обеспечивает возможность субъективной оценки состояния электрической машины, в том числе путем удаленного мониторинга. Например, при обнаружении повышенного уровня искрения и автоматическом определении вероятной его причины специалист сервисного центра или организации-разработчика оборудования с использованием голосовой связи с персоналом на объекте осуществляет руководство работами по восстановлению исправного состояния щеточно-коллекторного узла двигателя.

2. Автоматические выключатели. Физический ресурс автоматического выключателя при его работе расходуется в результате изнашивания механических и электрических компонентов при воздействии протекающих токов, механических ударных нагрузок и электромеханических коммутационных процессов при отключениях. Интенсивность изнашивания определяется энергией воздействия на выключатель и может быть представлена суммой двух составляющих: электромеханической при отключениях и элек-

трической при протекании тока в рабочем режиме. Электромеханическая составляющая изнашивания возникает при отключениях и зависит от величины разрываемого при коммутации тока. Исчерпание ресурса при отключении регламентируется заводами-изготовителями автоматических выключателей [8]. Электрическая составляющая изнашивания пропорциональна тепловым потерям и, следовательно, интегралу от квадрата тока [9].

Вычисление остаточного ресурса автоматического выключателя по формуле:

$$T(t) = T_0 - \sum_{j=1}^n k_1(i_j) - k_2 \int_0^t i^2 dt,$$

где i_j — значение тока автоматического выключателя, вызвавшего его срабатывание при j -ом отключении, $j=1, \dots, n$; $k_1(i_j)$ и k_2 — весовой коэффициент, равный расчетному коэффициенту ресурсного изнашивания автоматического выключателя при срабатывании и протекании тока соответственно; n — общее число срабатываний автоматического выключателя от начала эксплуатации.

Таким образом, в процессе эксплуатации автоматического выключателя непрерывно производится оценивание его остаточного ресурса с учетом электромеханической и электрической составляющих. Текущая оценка хранится в памяти контроллера, отображается на мониторе и может использоваться для своевременной замены или ремонта автоматического выключателя.

Заключение

Применение диагностики компонентов машины на основе моделей рабочих процессов и интеллектуальной обработки данных обеспечивает повышение надежности работы всех устройств и машины в целом, возможность выполнения ремонтных работ и технического обслуживания по состоянию. Непрерывный контроль и автоматизация обработки данных снижает влияние человеческого фактора на оценки технических характеристик, производительности и состояния компонентов машины. При этом осуществляется организация объективного полного учета работы машины, производительности и качества работы, бригады и организации горных работ, включая подготовку забоя, электроснабжение и работу транспорта.

Разработанные модели и ПО в настоящее время используются для комплектации систем управления для карьерных экскаваторов [10] и буровых станков [1] в ООО Компания «Объединенная Энергия». Новые информационно-диагностические системы обеспечивают полный контроль всех основных рабочих параметров, нагрузок, состояния компонентов оборудования, анализ и представление в удобном виде данных по основным технологическим показателям работы экскаватора. Использование моделей рабочих процессов для диагностики состояния и оце-

нивания ресурса компонентов расширяет информационный ресурс человеко-машинной системы и повышает эффективность использования оборудования.

Список литературы

1. Малафеев С. И., Афанасьев П. М., Студеникин В. А. Информационно-диагностическая система бурового станка//Автоматизация в промышленности. 2012. № 9. С. 51-53.
2. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов//Автоматизация в промышленности. 2013. № 10. С. 33-37.
3. Трубецкой К. Н., Кулешов А. А., Клебанов А. Ф., Владимиров Д. Я. Современные системы управления горно-транспортными комплексами/Под ред. Трубецкой К. Н.. СПб. Изд. Наука. 2007. 306 с.
4. Доронин С. В., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Шонкин Ю. И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск. Изд. Наука. 2005. 250 с.
5. Малафеев С. И., Малафеева А. А. Основы автоматики и системы автоматического управления. М.: Академия. 2010. 384 с.
6. Малафеев С. И., Малафеев С. С., Серебренников Н. А. Применение прогнозирующей модели для непрерывного контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети//Управление. Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 57-60.
7. Малафеев С. И., Серебренников Н. А., Фролкин В. Г. Анализ электрической сети с преобразователем рода тока при нарушениях сопротивления изоляции//Электротехника. 2004. № 12. С. 11-14.
8. Андреев Д. А., Назарычев И. А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей//Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 2, С. 1-16.
9. Кабышев А. В., Тарасов Е. В. Низковольтные автоматические выключатели. Томск. Изд. Томского политехнического университета. 2011. 345 с.
10. Малафеев С. И., Новгородов А. А., Серебренников Н. А. Новый экскаватор ЭКГ-18 Р: система приводов постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией//Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 6. С. 21-25.

Малафеев Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ООО «Компания «Объединенная Энергия», *Тихонов Юрий Васильевич* – аспирант Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
Контактный телефон (495) 558-88-18.
E-mail: sim_vl@nm.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ¹

В.М. Каравайков, И.О. Волков (Костромской государственный технологический университет)

Представлена методика разработки математической модели тепловых процессов в теплице с водяным обогревом с целью предварительного определения параметров регулятора температуры для разработки системы автоматического регулирования по каналу управления температура теплоносителя – температура воздуха.

Ключевые слова: математическая модель, переходная характеристика, параметры регулятора.

Известно, что для определения параметров регулятора необходима идентификация объекта управления, заключающаяся в нахождении его передаточной функции. Определение передаточной функции объекта управления может производиться как аналитическими, так и экспериментальными методами.

В данной работе предлагается теоретико-экспериментальный метод, основанный на исследовании компьютерной модели объекта управления методом вычислительного эксперимента, позволяющий оценить наиболее важные характеристики теплицы как объекта управления, уже на стадии проектирования.

Широкое распространение получили методы идентификации объектов управления путем определения аналитического выражения переходной характеристики $h(t)$ по экспериментально полученной реакции объекта при ступенчатом изменении управляющего воздействия на входе.

Одним из применяемых способов определения коэффициентов дифференциального уравнения (или

параметров передаточной функции, или частотной характеристики объекта) является метод, основанный на аппроксимации экспериментально полученной функции $h(t)$ решением линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами и нулевыми начальными условиями, где входное воздействие $u(t)$ задается в виде единичной ступенчатой функции:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Фактически реальные системы характеризуются пространственной протяженностью с характеристиками, распределенными в пространстве, то есть являются объектами с распределенными параметрами. Следовательно, точная аппроксимация $h(t)$ для таких объектов решением уравнения (1) возможна лишь

¹ Работа выполняется при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ государственный контракт № 14.740.11.1373.