УДК 62-503.56

Методология формирования алгоритмов идентификации и диагностирования аналоговых промышленных объектов

В.В. Лузгин[a], А.Д. Ульянов[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]Uts@brstu.ru, [b]Coberul@gmail.com
Статья поступила 23.04.2013, принята 21.08.2013

Вводятся понятия системного анализа диагностической информации (САДИ) и информационно плотного промышленного объекта (ПО). На основе анализа проведенных исследований кратко формулируются основные задачи методологии формирования алгоритмов идентификации и диагностирования аналоговых ПО. Определяются необходимое и достаточное условия диагностической ценности математической модели ПО, единство которых всегда находится в противоречии. Рассмотрены алгоритмы диагностирования ПО на основе классического и прикладных методов восстановления дифференциальных уравнений и решения системы нелинейных алгебраических уравнений, представляющих собой зависимости коэффициентов дифференциальных уравнений от структурных параметров ПО. Практическое применение метода восстановления дифференциального уравнения 4-го порядка рассматривается на примерах динамики трансформатора высоковольтных импульсов системы зажигания, вертикальных свободных колебаний подвески автомобиля, динамики следящего электропривода. Определяются основные недостатки классического восстановления дифференциальных уравнений, затрудняющие его практическую реализацию. Предлагаемые прикладные методы восстановления дифференциальных уравнений, по существу, являются некорректными, т. к. основаны на исследовании одного частного решения, представляющего собой алгебраическую сумму всех частных решений, а не всей совокупности частных решений фундаментальной системы. Определяются факторы, влияющие на погрешность восстановления дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: методология, алгоритмы, методы, промышленный объект, диагностирование, системный анализ диагностической информации, математическая модель объекта, идентификация динамики ПО, коэффициенты дифференциального уравнения.

Methodology for formation of identification algorithm and diagnosis of analog industrial facilities

V.V. Luzgin[a], A.D. Ul'yanov[b]

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russia
[a]Uts@brstu.ru, [b]Coberul@gmail.com
Received 23.04.2013, accepted 21.08.2013

The article presents the definitions of the system analysis of diagnostic information and information dense object. The goals, objectives and stages of the analysis are given in detail. The applied algorithm for diagnosing electrothermal objects is considered. The necessary and sufficient conditions for the object's mathematical model are determined (the unity of these conditions is always in conflict). The conditions to determine the structural parameters on the basis of ratio calculation of the known type of differential equations by the output process and solution of nonlinear algebraic systems have been produced, and their equations express the dependencies of the differential equations coefficients on the structural parameters characteristic. Classical algorithm for recovering the homogeneous linear differential equation under the non-zero initial conditions is examined. The practical application of the method to determine the differential equation coefficients by the example of the dynamics of the transformer of a high-voltage pulse ignition system has been demonstrated. The general solution of the fourth order differential equation describing the dynamics of the transformer of a high-voltage pulse ignition system, vertical free motion of a car suspension, the servo drive of other software have been considered. The major shortcomings of the general solution that impede its practical realization have been determined. It has been established that if the output process is the algebraic sum of partial solutions and their total forms a fundamental system, then at a certain type of the differential equation one can determine the coefficients of this differential equation. The factors having effect on the inaccuracy of determining the differential equations coefficients are determined.

Keywords: system analysis of diagnostic information, object mathematical model, primary identification of software dynamics, secondary identification of software dynamics, differential equation coefficients, dynamics of a transformer of a high-voltage pulse ignition system, inaccuracy of determining differential equations coefficients.

Введение. Основой методологии формирования методов и алгоритмов диагностирования является системный анализ диагностической информации (САДИ) [1].

САДИ включает в себя: априорную информацию о состоянии промышленного объекта (ПО) и апостериорную информацию, получаемую по результатам кон кретных, целенаправленных исследований формального и неформального характера; информацию, получаемую в процессе обучения эвристических программ [2].

Если состояние ПО при заданной глубине и достоверности диагноза определено при известных или пренебрежимо малых внешних возмущающих воздействиях, то ПО как объект диагностики является, по определению У. Эшби, информационно плотным. Под внешними воздействиями понимаются возмущения со стороны внешней среды по отношению к ПО и воздействия внешних устройств технической системы, в которой находится исследуемый ПО [3].

Задачи и алгоритмы САДИ. *Первой задачей* САДИ ПО является решение вопроса об информационной плотности исследуемого ПО.

Если ПО является информационно плотным, то решается *вторая задача* САДИ. На основании исследования динамики ПО формируется его физико-математическая модель в виде, например, дифференциальных уравнений, коэффициенты которых определяются нелинейными зависимостями от структурных параметров и образуют систему нелинейных алгебраических уравнений. Решение такой задачи соответствует первичной идентификации динамики ПО (по результатам которой определяются коэффициенты дифференциальных уравнений), то есть восстановлению исходных дифференциальных уравнений.

После первичной идентификации решается *третья задача* – задача оптимизационной (вторичной) идентификации, которая позволяет, по мере возможности, уточнить результаты первичной идентификации [4].

Четвертая задача САДИ заключается в решении и анализе решений системы нелинейных алгебраических уравнений, определяющихся зависимостями коэффициентов дифференциальных уравнений от структурных параметров.

Аналитическое определение коэффициентов влияния и допусков структурных параметров при отсутствии их в справочных данных является *пятой задачей* САДИ.

Шестой может быть задача по использованию полученной информации для определения состояния других ПО технической системы, связанных с исследуемым ПО.

Если возникает необходимость в оптимизации стратегии поиска неисправности, то решается *седьмая задача*, что является характерным для сложных ПО [1].

Перечисленные задачи вполне соответствуют теории принятия решений, опирающейся на современный математический аппарат. Однако только формальные методы описания решения задач диагностики без использования эвристического программирования, т. е. неформальных процедур, не могут обеспечить формирование в достаточной полной мере глубокого, достоверного и конструктивного диагноза. Формирование эвристических программ ПО является *восьмой задачей* САДИ.

В прагматическом аспекте формирование алгоритмов диагностирования ПО может быть представлено следующими этапами:

1) предварительный анализ задачи формирования алгоритмов диагностирования ПО;

2) структурное описание исследуемых ПО как объектов диагностики;

3) формирование ФММ ПО как объекта диагностики и ее анализ;

4) экспериментальное определение статических и динамических характеристик ПО;

5) идентификация ПО на основе моделирования выходных процессов и проверка адекватности ФММ реальным процессам;

6) анализ ФММ ПО и формирование алгоритмов их диагностирования;

7) аналитическое определение коэффициентов влияния и допусков структурных параметров;

8) формирование оптимальных алгоритмов диагностирования ПО на основании теоретических, экспериментальных и эвристических данных;

9) проверка и корректировка разработанных алгоритмов диагностирования ПО;

10) оценка эффективности системы диагностики ПО.

Прикладные алгоритмы диагностирования. На основе исследования ПО как объектов диагностики необходимо не только получить конкретные полезные результаты, но и по результатам анализа проведенных исследований разработать прикладные алгоритмы диагностирования для вполне определенного класса ПО.

Практически динамика любых ПО (тепловых, электрических, гидравлических, пневматических, электромеханических, электронных и других) может быть представлена широким спектром дифференциальных уравнений (линейными, линеаризованными, с постоянными и переменными коэффициентами, с запаздывающим аргументом [5], функциональными, квазилинейными, нелинейными уравнениями математической физики и др.).

В зависимости от целей задач исследований выбирается та или иная модель ПО. Например, при исследовании электротепловых объектов как объектов диагностики динамика их температуры при нагреве может быть описана следующими передаточными функциями:

$$\frac{k}{TP+1},\ \frac{k}{T_2^2P^2+T_1P+1},\ \frac{ke^{-\tau P}}{TP+1},\ \frac{ke^{-\tau P}}{(T_1P+1)(T_2P+1)},$$

$$\frac{ke^{-\tau P}}{(T_1P+1)(T_2P+1)(T_3P+1)}.$$

При идентификации динамики ПО с целью формирования алгоритмов диагностирования их математические модели должны удовлетворять в первую очередь необходимым и достаточным условиям. С нашей точки зрения, необходимым условием является возможность физической интерпретации параметров математической модели. Достаточным условием является получение необходимой точности в определении структурных параметров при реализации существующих и разработанных алгоритмов диагностирования.

Единство этих условий всегда находится в противоречии. Например, в процессе идентификации современные вычислительные комплексы позволяют получить математические модели динамики ПО, достаточно близкие к реальным процессам, но если при этом нарушается необходимое условие, т. е. возможность физической интерпретации параметров этих моделей, то такие модели не обладают какой-либо диагностической ценностью при решении задач диагностики ПО.

Если возникшие изменения структурных параметров повлияли на выходной процесс так, что его динамика относительно выходных сигналов описывается дифференциальным уравнением или системой дифференциальных уравнений того же вида, что и при исправном состоянии, т. е. имеют место лишь постепенные отказы (внезапные отказы отсутствуют), то эти структурные параметры можно определить на основании расчета коэффициентов известного вида дифференциальных уравнений по выходному процессу и решения нелинейных алгебраических систем, уравнения которых выражают зависимости коэффициентов дифференциальных уравнений от структурных параметров.

Для определения коэффициентов дифференциальных уравнений и их систем, а также структурных параметров линейных динамических устройств были разработаны методы и алгоритмы, соответствующие целям и задачам исследований.

Классический алгоритм восстановления линейного однородного дифференциального уравнения при ненулевых начальных условиях может быть представлен следующим образом.

Известно, что фундаментальная система решений вполне определяет соответствующее ей линейное дифференциальное уравнение:

$$y^{(n)}+a_1(t)y^{(n-1)}+...+a_n(t)y=0. \qquad (1)$$

Следовательно, можно поставить задачу о восстановлении уравнения (1), т. е. определении его коэффициентов, имеющего соответствующую фундаментальную систему решений:

$$y_1,\ y_2,\ ...,\ y_n. \qquad (2)$$

При известной фундаментальной системе решений (2) уравнение (1) можно записать (при n – четном) в виде:

$$y^{(n)}-\frac{1}{W}\sum_{i=n-1}^{0}(-1)^i\Delta_i y^{(i)}=0, \qquad (3)$$

где

$$\Delta=\begin{vmatrix} y_1 & y_2 & ... & y_n & y \\ y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & ... & y_n^{(1)} & y^{(1)} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ y_1^{(n-1)} & y_2^{(n-1)} & ... & y_n^{(n-1)} & y^{(n-1)} \\ y_1^{(n)} & y_2^{(n)} & ... & y_n^{(n)} & y^{(n)} \end{vmatrix};$$

W – определитель Вронского; Δ_i – алгебраическое дополнение i-ой производной от функции y определителя Δ.

Раскрыв каждое соотношение определителей уравнения (3), получим соответствующие коэффициенты $a_1(t),\ a_2(t),\ ...,\ a_n(t)$. При постоянных коэффициентах уравнения (3) необходимо найти численные значения членов определителей при фиксированном значении t, то есть потребуется измерение каждого из значений частных решений и их n производных в момент времени t для определения постоянных коэффициентов уравнения n-го порядка.

Практическая реализация метода. При практической реализации метода определения коэффициентов дифференциального уравнения, вытекающего непосредственно из теоремы, необходимо в первую очередь иметь общее решение:

$$y=\sum_{i=1}^{n}c_i y_i, \qquad (4)$$

где c_i – произвольные постоянные; y_i – линейно независимые частные решения дифференциального уравнения.

Начальные условия определяются непосредственно из выходного процесса путем измерения в момент времени $t=0$, значений y_0 и его производных $y_0^{(1)}$, $y_0^{(2)}$, …, $y_0^{(n-1)}$. Также необходимо установить возможность измерения параметров качества частных решений. Если такая возможность существует, то при измеренных параметрах качества частных решений определяются произвольные постоянные c_i из решения системы алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^{n}c_i y_i^{(k)}(t_0)=y_0^{(k)},\ k=\overline{0,\ n-1}. \qquad (5)$$

При определении частных решений фундаментальной системы (2) можно определить коэффициенты дифференциального уравнения путем вычисления отношений определителей уравнения (3).

Например, общее решение дифференциального уравнения 4-го порядка, описывающего динамику трансформатора высоковольтных импульсов системы зажигания [6], вертикальных свободных колебаний подвески автомобиля, следящего электропривода других ПО, имеет вид:

$$y(t)=e^{-\alpha_1 t}\left(c_1\sin\frac{2\pi}{T_1}t+c_2\cos\frac{2\pi}{T_1}t\right)+ \\ +e^{-\alpha_2 t}\left(c_3\sin\frac{2\pi}{T_2}t+c_4\cos\frac{2\pi}{T_2}\right), \qquad (6)$$

где α_1, α_2, T_1, T_2 – соответственно коэффициенты затухания и периоды низкочастотной и высокочастотной составляющих свободных колебаний.

Следует отметить, что такого вида переходными функциями описывается обширный класс ПО. В инерционных ПО ввиду интенсивного подавления высокочастотной составляющей, как правило, низкочастотная составляющая явно выделяется. Например, в трансформаторе высоковольтных импульсов напряжений системы зажигания низкочастотная составляющая явно выделяется через $1{,}5\div2$ периода. Так как низкочастотная составляющая выделяется после быстрого затухания высокочастотной составляющей, то параметры α_1 и T_1 могут быть измерены непосредственно по пе реходной характеристике.

Для того чтобы определить параметры α_2 и T_2 высокочастотной составляющей, необходимо вычесть из общего выходного процесса низкочастотную составляющую.

Все необходимые вычисления по определению параметров α_1, α_2, T_1, T_2 можно произвести по специально разработанной программе. При известных параметрах α_1, α_2, T_1, T_2 и начальных условиях, определяемых также по выходному процессу $y(t)$, вычисляют произвольные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 и коэффициенты дифференциального уравнения.

Основные недостатки рассмотренного метода, затрудняющие его практическую реализацию, заключаются в следующем:

– необходимо определять корни характеристического уравнения для составления общего решения (4);

– определить параметры частных решений по выходному процессу практически невозможно, если составляющие, соответствующие частным решениям, явно не выделяются в выходном процессе.

Предложен прикладной метод восстановления коэффициентов дифференциальных уравнений, базирующийся на следующем предположении.

Если выходной процесс является алгебраической суммой частных решений, совокупность которых образует фундаментальную систему, то при известном виде дифференциального уравнения, описывающего динамику выходного процесса, можно определить коэффициенты этого дифференциального уравнения на основании решения системы линейных алгебраических уравнений, уравнения которой составлены относительно неизвестных коэффициентов путем замены функции $y(t)$ и ее n-производных численными значениями, определяемыми в точках координаты времени $t_1, t_2, ..., t_n$ по выходному процессу.

В общем виде реализация этого метода может быть представлена следующим образом. Известно, что динамика объекта диагностики описывается дифференциальным уравнением:

$$y^{(n)} + \sum_{i=n-1}^{0} a_i y^{(i)} = 0 . \qquad (7)$$

По известному выходному процессу, состоящему из алгебраической суммы графиков частных решений фундаментальной системы, определяем значения функции и ее производные:

$$y(t_k),\ y^{(1)}(t_k),\ ...,\ y^{(n)}(t_k)\ ,\ k = \overline{1,\ n} . \qquad (8)$$

Подставляя значения (8) в уравнения (7), получим систему из n линейных алгебраических уравнений:

$$y^{(n)}(t_k) + \sum_{i=n-1}^{0} a_i y^{(i)}(t_k) = 0\ ,\ k = \overline{1,\ n} . \qquad (9)$$

Решая систему (9), определим искомые коэффициенты $a_0, a_1, ..., a_{n-1}$.

Если требуется определить коэффициенты системы из m дифференциальных уравнений, составленной относительно переменных $y_1(t)$, $y_2(t)$, …, $y_n(t)$, то в этом случае, определяя значения переменных и их производных в точках координаты времени, можно систему дифференциальных уравнений свести к m системам линейных алгебраических уравнений, где количество уравнений в k-ой системе определяется количеством неизвестных коэффициентов соответствующего k-го уравнения системы дифференциальных уравнений.

Погрешности в определении коэффициентов дифференциальных уравнений зависят от следующих факторов:

– степени идентичности решения дифференциального уравнения и выходного процесса;

– степени влияния коэффициентов дифференциальных уравнений на выходной процесс, т. е. доминирующие коэффициенты определяются с меньшей погрешностью;

– погрешности измерения выходной величины и ее производных;

– величины порядка дифференциального уравнения.

Выводы

1. Передаточные функции, формируемые в процессе исследования промышленных объектов как объектов диагностики, не только являются обобщенными показателями их состояния, но и позволяют определить структурные параметры, на основании анализа которых может быть получена необходимая информация для последующего решения задач прогнозирования постепенных и внезапных отказов объектов диагностики.

2. Системный анализ диагностической информации позволяет реализовать комплексный подход к оценке работоспособности и поиску неисправности аналоговых промышленных объектов в виде упорядоченной последовательности методов и алгоритмов.

3. Обеспечение высокого качества, надежности и безопасности технологических процессов и производств возможно только при одновременном и непрерывном решении триединой задачи: идентификации, диагностики и управления промышленными объектами в процессе их разработки, наладки и эксплуатации.

Литература

1. Лузгин В.В. Системный анализ диагностической информации промышленных объектов // Вестн. Моск. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). М. 2010. № 4 (23). С. 73.

2. Лузгин В.В. Структура, формирование и функционирование эвристических программ диагностирования промышленных объектов //Там же. 2009. № 4 (19). С. 25-29.

3. Лузгин В.В., Говорущенко Н.Я. Метод диагностирования линейных динамических звеньев и систем // Автомобильный транспорт: сб. ст. Киев, 1974. Вып. 11. С. 62-67.

4. Лузгин В.В., Колтыгин Д.С., Патрусова А.М. Вторичная идентификация (VtorId v 1.00): программа для ЭВМ. ГР. 2003612203 25.09.2003.

5. Лузгин В.В., Ларионов А.С., Панасов В.В. Прикладной метод исследования динамики систем автоматического регулирования с запаздыванием // Науч. вестн. НГТУ. 2008. № 2. С. 170.

6. Лузгин В.В. Идентификация динамики вторичного напряжения трансформатора высоковольтных импульсов с учетом запаздывания и нестационарности // Современные технологии. Системный анализ. 2011. № 4. С. 130.

References

1. Luzgin V.V. Sistemnyj analiz diagnosticheskoj in-formacii promyshlennyh ob#ektov // Vestnik moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta (MADI). M. 2010. № 4 (23). S. 73.
2. Luzgin V.V. Struktura, formirovanie i funkcionirovanie jevristicheskih programm diagnostirovanija promyshlennyh obektov // Vestnik moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudar-stvennogo tehnicheskogo universiteta). M. 2009. № 4 (19). S. 25-29.
3. Luzgin V.V., Govorushhenko N.Ja. Metod diagnostirovanija linejnyh di-namicheskih zven'ev i sistem, // Sb. «Avtomobil'nyj transport», vyp. 11, «Tehnika», Kiev. 1974. S. 62-67.
4. Luzgin V.V., Koltygin D.S., Patrusova A.M. Vtorichnaja identifikacija (VtorId v 1.00), // Avtorskoe svidetel'stvo ob oficial'noj registracii programmy dlja JeVM. N 2003612203 25.09.2003.
5. Luzgin V.V., Larionov A.S., Panasov V.V. Prikladnoj metod issledovanija dina-miki sistem avtomaticheskogo regulirovanija s zapazdyvaniem // Nauchnyj vestnik NGTU. Novosibirsk. 2008. № 2. S.170.
6. Luzgin V.V. Identifikacija dinamiki vtorichnogo naprjazhenija transformatora vysokovol'tnyh impul'sov s uchjotom zapazdyvanija i nestacionarnosti // Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Irkutsk. 2011. № 4. S. 130.

УДК 517.929: 517.93 /.935

Разрешимость нелинейного дифференциального уравнения первого порядка с последействием и его приложения

А.С. Ларионов[a], И.А. Никишина[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] larios84@yandex.ru, [b] ipa_Q@mail.ru
Статья поступила 19.05.2013, принята 12.08.2013

Рассматривается нелинейное функционально-дифференциальное уравнение первого порядка с локально определенным оператором (оператором Немыцкого) в правой части, не обладающим, вообще говоря, свойством монотонности. Предлагаются достаточные условия разрешимости в некотором конусном отрезке краевой задачи и задачи Коши. В основе доказательства теорем о существовании (и единственности) решения нелинейных задач лежит редукция исходного дифференциального уравнения к эквивалентному в некотором смысле интегральному уравнению Гаммерштейна с монотонным вполне непрерывным оператором. Для таких уравнений справедливо утверждение о разрешимости и о существовании упорядоченной пары решений. Редукция к уравнению с монотонным оператором оказывается возможной, если функция Грина некоторой вспомогательной линейной краевой задачи (функции Коши соответствующего линейного функционально-дифференциального уравнения) сохраняет свой знак. Полученные в первой части статьи результаты применяются для исследования динамических процессов, протекающих в экономике, биологии, педагогике. В частности, изучается динамика основных производственных фондов на предприятии с учетом запаздывания в процессе освоения капитальных вложений. При этом предполагается, что поступление инвестиций носит нелинейный характер. Исследуется также нелинейная задача из области динамики популяции, учитывающая временные запаздывания (модель Хатчинсона-Райта): приводятся достаточные условия существования ограниченного решения функционально-дифференциальной модели.

Ключевые слова: функционально-дифференциальное уравнение, математическая модель, монотонный оператор, экономика, биология.

Solvability of a nonlinear functional differential equation of the first order with aftereffect and its applications

A.S. Larionov[a], I.A. Nikishina[b]

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russia
[a] larios84@yandex.ru, [b] ipa_Q@mail.ru
Received 19.05.2013, accepted 12.08.2013

In this paper, a nonlinear functional differential equation of the first order with a locally defined operator (Nemytsky's operator) on the right-hand side is considered. Generally speaking, the operator doesn't possess the property of monotonicity. The sufficient solvability conditions at some cone segment of the boundary value problem and the Cauchy's problem are proposed. The proof of the theorems on the existence (and uniqueness) of the nonlinear problems solution is based on the reduction of the initial differential equation to an equivalent, in some sense, Hammerstein's integral equation with a monotone completely continuous operator. For such equations, the statement of solvability and the existence of the solutions ordered pair is true. The reduction to the equation with a monotone operator is possible if Green's function of some auxiliary linear problem (Cauchy's function of the corresponding linear functional differential equation) retains its sign. The results obtained in the first part of the paper are used for the research of dynamic processes in Economics,