

ность и качество разработки САУ за счет снижения времени испытания вариантов САУ и возможности проверки их функционирования в различных режимах работы. На основании разработанной методики создан программный моделирующий комплекс, ориентированный на предприятия отечественного двигателестроения. Апробация программного комплекса на профильном предприятии показала высокую степень адекватности воспроизведения основных режимов энергетических ГТУ и ЭЭС. В настоящее время программный комплекс используется для испытания САУ ГТУ мини-электростанций, построенных на базе авиационных двигателей ПС-90 и Д-30.

Список литературы

1. Михайлов А., Агафонов А., Сайданов В. Малая энергетика России классификация, задачи, применение // Новости электротехники. 2010. № 2.
2. Верлань А.В., Галкин В.В. Имитация динамики энергетических объектов в системах испытания программных средств управления. Киев: Наук. думка, 1991.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк. 1985.
5. Шмидт И.А., Кавалеров Б.В., Один К.А., Шигапов А.А. Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5 (42).
6. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петровичев А.Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций // Электричество. 2007, № 3.
7. Кавалеров Б.В., Кузнецов М.И., Шигапов А.А. Математическое моделирование автономных систем электроснабжения с учетом насыщения электрических машин // Электротехника. 2009, № 11.

*Кавалеров Борис Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета.
Контактный телефон (902) 471-65-82. E-mail: kbv@pstu.ru*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КРИВОЙ РАЗГОНА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МАСШТАБИРОВАНИЯ

В.Л. Бажанов (Самарский государственный университет путей сообщения)

Описывается эффективный способ определения передаточной функции объекта управления по экспериментальным данным о его кривой разгона (переходной характеристике). В его основу положен принцип масштабирования. На конкретном примере продемонстрирована методика применения способа, а также его достоинства, важные с точки зрения практического использования. В их числе простота и заведомо контролируемая точность получаемого результата. Представлена новая компьютерная программа "ММ-аппроксимация", позволяющая специалистам-практикам быстро и достоверно находить передаточную функцию по имеющейся записи кривой разгона.

Ключевые слова: кривая разгона, передаточная функция, масштабирование, ПИД-регулятор.

Для разработки и качественной настройки систем автоуправления, как правило, необходимо знать передаточную функцию управляемого объекта (ОУ). Типичной является ситуация, когда в качестве исходных данных для определения передаточной функции разработчик автоматизации располагает экспериментальной записью реакции ОУ на входное воздействие известной формы. Если это воздействие имело вид ступеньки, а в момент его подачи ОУ находился в равновесном состоянии, то такую реакцию принято называть переходной характеристикой или кривой разгона ОУ. Определение передаточной функции рабочего ОУ (математической модели) и вычисление ее параметров по записанной кривой разгона объекта — это одна из задач, с которыми регулярно приходится сталкиваться на практике.

Существуют разные способы ее решения. Они отличаются трудоемкостью и обеспечивают разную точность получаемого результата. Большинство способов реализуются по типовому алгоритму. Сначала делается заключение, к какому классу объектов следует отнести рассматриваемый объект. При этом устанавливается общая математическая форма, описывающая объекты данного класса. Затем эта форма конкретизируется с тем расчетом, чтобы передаточная функция в качест-

венном отношении достоверно отображала специфику экспериментальных данных об объекте управления (характер кривой разгона). На заключительном этапе одним из возможных способов выполняется идентификация параметров передаточной функции ОУ. После этого требуемый результат получен, тем не менее, работа еще не завершена, так как отсутствует уверенность в точности найденной передаточной функции. А такая уверенность необходима, поскольку недостоверная математическая модель ОУ способна сделать напрасным все, что будет получено в дальнейшем на ее основе. Поэтому неизбежен еще один этап работы, задача которого очевидна — оценить точность полученной передаточной функции. Это можно осуществить путем сравнения экспериментальных данных с расчетами, выполненными по проверяемой математической модели. Обычно начинают с расчета переходной характеристики, которая сравнивается с экспериментальной кривой разгона (с теми данными, на основе которых модель была получена). Если имеются дополнительные экспериментальные данные, то оценка выполняется более детально. К сожалению, итог оценки далеко не всегда оказывается положительным. Во многих случаях возникает неудовлетворенность точностью полученной математиче-

Кривая, если смотреть в плоскости искривления, вовсе не кажется таковой.

А.В. Иванов

ской модели, и возникает необходимость ее корректировки. Иногда требуется несколько повторных корректирующих шагов. Бывает и так, что задачу приходится целиком решать заново. Затраты времени и усилий оказываются весьма ощутимыми.

Избежать потерь времени, устранить фактор неопределенности и полностью освободиться от оценки точности математической модели "задним числом" позволяет способ аппроксимации экспериментальных данных, построенный на основе принципа масштабирования. Особенность способа и его преимущество состоят в том, что он дает пользователю возможность оценивать точность создаваемой математической модели ОУ уже на начальном этапе, до выполнения расчета ее параметров. Особенно эффективно эту возможность удалось реализовать с помощью специализированной программы "ММ-аппроксимация", разработанной в НПП "ПОРА-USWO" (г. Самара).

Подход к применению принципа масштабирования для аппроксимации экспериментальной кривой разгона во многом аналогичен тому, который использовался для расчета рациональных параметров настройки ПИД-регуляторов в замкнутых САР [1]. Программа "ММ-аппроксимация" содержит развитую (и пополняемую пользователем) библиотеку эталонных объектов управления, относящихся к классу наиболее распространенных объектов, описываемых передаточной функцией общего вида:

$$W(p) = \frac{K_0}{p^r \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)}, \quad (1)$$

K_0 – коэффициент передачи объекта; T_i – постоянные времени; r – степень астатизма объекта; $(m + r)$ – порядок объекта.

Параметры r , m , K_0 , T_i каждого эталонного ОУ, содержащегося в библиотеке, известны. Программа способна рассчитывать и выводить на дисплей график кривой разгона любого эталонного ОУ.

Для реализации принципа масштабирования вводится понятие "искусственная система координат", используемая для построения кривой разгона. Ее координаты (\bar{x}, \bar{t}) линейно связаны с координатами реальной системы (x, t) через масштабные коэффициенты M_x и M_t :

$$\bar{x} = M_x \cdot x, \quad (2)$$

$$\bar{t} = M_t \cdot t. \quad (3)$$

В программу вводятся экспериментальные данные о кривой разгона рабочего ОУ. На мониторе появляется график, представленный в искусственной системе координат (\bar{x}, \bar{t}) . Программа строит его по введенным данным при условии, что начальные значения масштабных коэффициентов равны единице

$$M_x = 1; M_t = 1.$$

По виду кривой разгона оценивается порядок ОУ $(m + r)$ и его степень астатизма r . Простой способ выполнения оценки описан в работе [2]. Он необходим, чтобы из библиотеки эталонных объектов выбрать однотипный объект (того же порядка и степени астатизма). Как только выбор сделан, программа рассчитывает и выводит на монитор кривую разгона эталонного объекта. Она представляется в реальных координатах (x, t) . Теперь на общей координатной плоскости пользователь видит две кривых разгона. Можно приступить к выполнению процедуры масштабирования. Программа предоставляет для этого клавиши управления курсором. Удерживая нажатой ту или иную клавишу, пользователь изменяет в нужную сторону величину масштабных коэффициентов M_x , или M_t с установленным шагом. При этом на мониторе отображается, как кривая разгона рабочего ОУ сжимается или растягивается относительно координатных осей $0\bar{x}$ и $0\bar{t}$. Главная задача процедуры масштабирования состоит в том, чтобы добиться наиболее точного совмещения кривых разгона рабочего и эталонного объектов управления. Полученная степень совпадения кривых служит оценкой точности, которой будет обладать передаточная функция (математическая модель) рабочего ОУ, определяемая на основе принципа масштабирования. Отметим, что еще не рассчитаны параметры передаточной функции, а представление о ее точности уже имеется. Это большое удобство для практики.

Опыт работы с программой "ММ-аппроксимация" показывает, что в большинстве случаев требуемая степень совпадения кривых разгона достигается уже при первой попытке. В редких случаях, когда этого не происходит, достаточно просто выбрать из библиотеки эталонный ОУ другого порядка и повторить масштабирование. Причем по виду несовпадения кривых разгона легко установить, в какую сторону следует изменять порядок выбираемого объекта. Повторное масштабирование практически всегда обеспечивает достаточную степень совпадения кривых разгона. А значит и необходимую точность получаемой математической модели ОУ.

И только когда появилась уверенность в точности будущего результата, делается последний шаг – рассчитываются параметры передаточной функции. Для этого пользователю программы "ММ-аппроксимация" достаточно щелкнуть мышью по клавише "Аппроксимация". Компьютер за долю секунды выполняет расчеты и выдает результаты на монитор.

Передаточная функция ОУ определена. Точность ее известна. Цель достигнута.

Для самостоятельного использования принципа масштабирования интерес будут представлять соотношения, по которым программа "ММ-аппроксимация" рассчитывает параметры передаточной функции. Это простые алгебраические выражения, получить которые можно различными способами. Один из них реализуется следующей логикой.

Достигнутая масштабированием требуемая точность совпадения кривых разгона, позволяет условно отождествить эталонный объект управления с рабочим, представленным в искусственных координатах. То есть принимается, что рабочий ОУ в искусственных координатах $(\bar{x}; \bar{t})$ и эталонный ОУ в реальных координатах (x, t) имеют одинаковые передаточные функции.

Все сведения о передаточной функции эталонного ОУ известны: степень астатизма r и порядок $m + r$; коэффициент передачи $K_0^{ЭТ}$; постоянные времени $T_i^{ЭТ}$, ($i \in \bar{1}; m$).

Известны также значения масштабных коэффициентов M_x и M_t , при которых достигается наилучшее совпадение кривых разгона. Теперь остается задача "перевести" полученную передаточную функцию рабочего ОУ из искусственных координат (\bar{x}, \bar{t}) в реальные координаты (x, t) .

Принимая во внимание известное свойство преобразования Лапласа

$$p \cdot F(p) \Leftrightarrow \frac{d}{dt}(f(t)), \text{ где } F(p) = L(f(t)), \quad (6)$$

а также введенное соотношение (3), можно получить следующее равенство:

$$\bar{p} \Leftrightarrow \frac{d}{d\bar{t}} = \frac{d}{d(M_t \cdot t)} = \frac{1}{M_t} \cdot \frac{d}{dt} \Leftrightarrow \frac{1}{M_t} \cdot p. \quad (7)$$

Оно устанавливает связь между параметрами преобразования Лапласа \bar{p} и p для функций с линейной модификацией аргумента (3).

Соотношения (2) и (7) позволяют составить последовательность преобразований, приводящих в дальнейшем к получению желаемого результата.

$$\begin{aligned} \bar{W}(\bar{p}) &= \frac{\bar{X}(\bar{p})}{Y(\bar{p})} = \frac{K_0^{ЭТ}}{\bar{p}^r \cdot \prod_{i=1}^m (T_i^{ЭТ} \bar{p} + 1)} = \\ &= \frac{K_0^{ЭТ}}{\left(\frac{p}{M_t}\right)^r \cdot \prod_{i=1}^m \left(T_i^{ЭТ} \cdot \frac{p}{M_t} + 1\right)} = \\ &= \frac{K_0^{ЭТ} \cdot M_t^r}{p^r \cdot \prod_{i=1}^m \left(\frac{T_i^{ЭТ}}{M_t} \cdot p + 1\right)} = \frac{M_x \cdot X(p)}{Y(p)} = M_x \cdot W(p). \quad (8) \end{aligned}$$

Из записи (8) выражается искомая передаточная функция:

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{K_0^{ЭТ} \cdot M_t^r}{M_x \cdot p^r \cdot \prod_{i=1}^m \left(\frac{T_i^{ЭТ}}{M_t} \cdot p + 1\right)}. \quad (9)$$

Результат (9) приводится к виду передаточной функции (1), если выполняются равенства

$$K_0 = K_0^{ЭТ} \cdot \frac{M_t^r}{M_x}, \quad (10)$$

$$T_i = \frac{T_i^{ЭТ}}{M_t}. \quad (11)$$

Соотношения (10) и (11) – именно те формулы, по которым программа "ММ-аппроксимация" пересчитывает параметры передаточной функции эталонного объекта в параметры искомой передаточной функции рабочего объекта управления.

Лучший способ ощутить удобство применения принципа масштабирования и оценить достоверность получаемого результата, это обратиться к практике. Поэтому группе специалистов по автоматизации была предоставлена возможность самостоятельного испытания программы "ММ-аппроксимация". Предварительно участники испытаний были ознакомлены с программой и порядком работы с ней (в пределах вышеизложенного материала). В качестве исходных данных им была предоставлена запись кривой разгона ОУ, имеющего передаточную функцию следующего вида:

$$W(p) = \frac{0,8}{(12p + 1)(8p + 1)(6p + 1)(3p + 1)}. \quad (12)$$

Сама функция (12) участникам испытаний была неизвестна. Требовалось воспроизвести ее по данным о кривой разгона.

Программой предусматриваются два возможных способа ввода в нее экспериментальных данных о кривой разгона – ручной набор координат каждой точки или ввод данных из сформированных файлов. Участники предпочли второй вариант, как более быстрый и надежный. После ввода данных кривая разгона объекта (12) отобразилась на мониторе в виде графика (рис. 1, кривая с маркерами).

Далее для выбора эталонного ОУ нужно было по кривой разгона оценить степень астатизма r и порядок рабочего ОУ $m+r$. Вопрос о степени астатизма решился сразу. Наличие у объекта самовывравнивания явно указывает на нулевую степень астатизма ($r = 0$). Оценку порядка ОУ можно сделать по начальному участку кривой разгона. Порядок характеризуется степенью параболы, наиболее точно вписывающейся в этот участок. Выявить степень такой параболы можно "по трем точ-

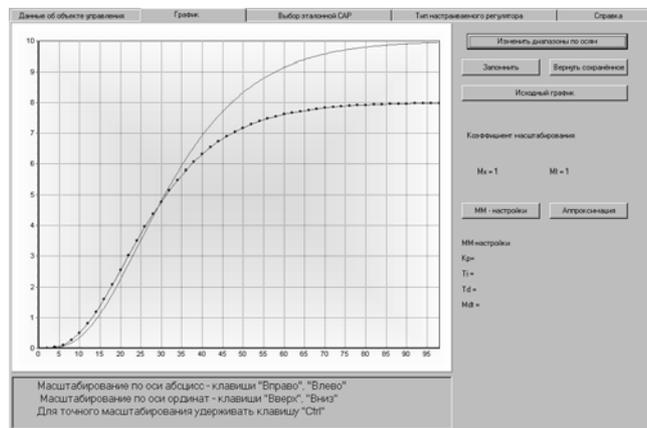


Рис. 1. Вид заставки программы "ММ-аппроксимация" до процедуры масштабирования. График с маркерами отображает кривую разгона рабочего объекта управления, гладкой линией представлена кривая разгона эталонного объекта.

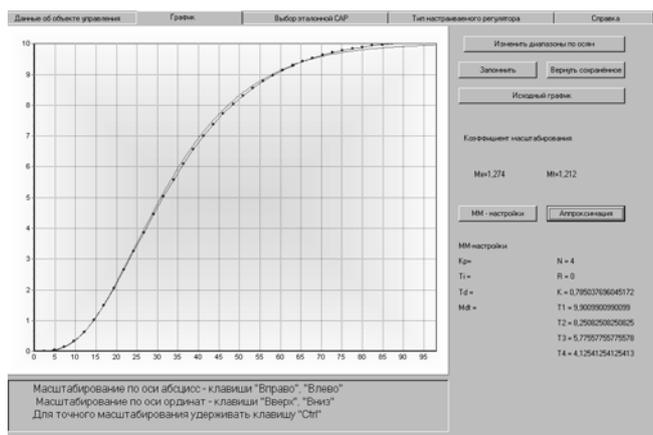


Рис. 2. Вид совмещенных кривых разгона после процедуры масштабирования. Рассчитанные параметры искомой передаточной функции представлены в правом нижнем углу заставки

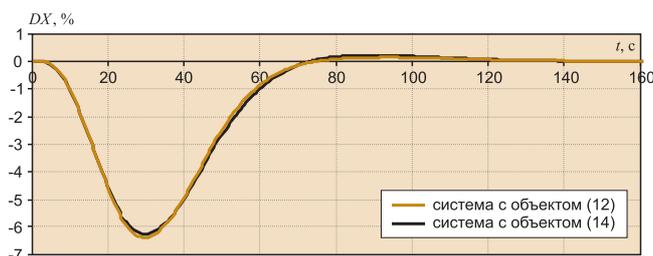


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутых системах при возмущении в виде ступеньки 20 %, приложенном ко входу объектов

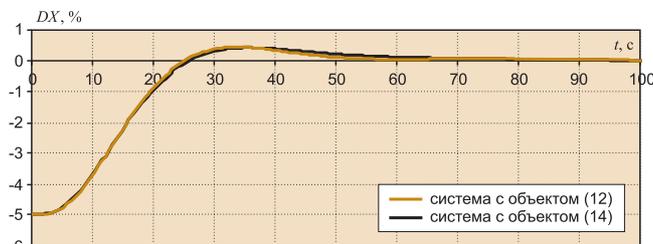


Рис. 4. Переходные процессы в замкнутых системах при увеличении задания регуляторам на 5 %

кам". Можно воспользоваться специальными компьютерными программами. Участники испытаний предпочли свой вариант – прямой перебор эталонных объектов управления. Поочередно извлекая из библиотеки эталонные объекты с самовыравниванием, они видели на экране две кривых разгона (рис. 1) и быстро выполняли масштабирование, оценивая достигаемую точность их совпадения. Менее чем за 5 мин. было установлено, что лучше всего кривые разгона совпадают в случае выбора эталонного ОУ четвертого порядка. Вид совмещенных кривых представлен на рис. 2. Программа выводит на монитор значения масштабных коэффициентов, при которых обеспечивается совмещение

$$M_x = 1,274; M_f = 1,212. \quad (13)$$

Достигнутая степень совмещения кривых позволяет надеяться на вполне удовлетворительную точность бу-

дущей математической модели ОУ (передаточной функции). Пока известно, что модель будет четвертого порядка с самовыравниванием. Но ее параметры еще не рассчитаны. Тем не менее, определенная уверенность в качестве ожидаемого результата уже имеется.

Осталось завершить работу щелчком мыши на клавише "Аппроксимация". По этой команде программа рассчитывает параметры искомой передаточной функции ОУ по формулам (10) и (11) и выдает результаты на монитор (рис. 2). Окончательный результат получился следующим:

$$W(p) = \frac{0,785}{(9,9p + 1)(8,25p + 1)(5,8p + 1)(4,1p + 1)}. \quad (14)$$

Теперь можно сравнить полученную передаточную функцию (14) с точной передаточной функцией (12). Что касается степени астатизма и порядка модели, то здесь явное попадание "в десятку". А вот численные значения параметров, хотя и оказались одного порядка, но все-таки разные.

Конечно, достигнутое при масштабировании совпадение кривых разгона (рис. 2) дает уверенность, что модель (14) будет достаточно точно описывать реакцию ОУ на входную "ступеньку". Но ведь предназначение модели может быть и другим. Например, она может использоваться для исследования процессов в замкнутой системе управления с объектом (12). Тогда уместен вопрос, правомерно ли доверять результатам, полученным по этой модели, на том лишь основании, что она хорошо описывает кривую разгона объекта (12)?

Ответ можно получить моделированием поведения систем. Сравним процессы в системах, взяв в одной системе объект управления с передаточной функцией (12), в другой – с передаточной функцией (14), при равных прочих условиях.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования таких систем с ПИД-регулятором, имеющим одинаковые настройки:

$$K_p = 1,91; T_i = 19 \text{ с}; T_d = 6,6 \text{ с}. \quad (15)$$

Отчетливо видно, что качественные и количественные показатели переходных процессов в обеих системах получились практически одинаковыми: и в случае обработки внешних возмущений, и при изменении задания регулятору.

Это доказывает, что передаточная функция (14), полученная на основе принципа масштабирования, вполне применима для исследования поведения реальной системы управления с объектом (12) и для оптимизации ее работы.

Заключение

Применение принципа масштабирования позволяет по-новому решать задачу определения передаточной функции объектов управления по экспериментальным данным об их кривых разгона. Реализация принципа в виде программы "ММ-аппроксимация" радикально сокращает время, затрачиваемое на

решение задачи, и обеспечивает желаемую точность получаемого результата.

Созданием программы "ММ-аппроксимация" НПП "ПОРА-USWO" завершает разработку инструментального комплекса для специалистов, связанных с практикой внедрения систем автоуправления параметрами объектов промышленного, транспортного и бытового назначения.

Бажанов Владимир Леонидович — канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте" Самарского государственного университета путей сообщения.

Контактный телефон (927) 760-28-84.

E-mail: uswo@samtel.ru; tklinkov@mail.ru Http://www.uswo.lgg.ru

Список литературы

1. *Бажанов В.Л.* Метод масштабирования — эффективный инструмент для практической настройки регуляторов в замкнутых САР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6.
2. *Бажанов В.Л.* Функция самонастройки по методу масштабирования для цифровых ПИД-регуляторов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 12.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

С.Н. Довбань, О.В. Веселов (Владимирский государственный университет)

Для оценки технического состояния электромеханической системы используется сигнал прямоугольной формы, подаваемый на ее вход. При прохождении через систему сигнал претерпевает изменения, связанные с изменением состояния объекта. В качестве алгоритма оценки изменения состояния используется энергия сигнала на выходе объекта. Отклонение энергии от эталонного значения оценивается на основе метрического метода.

Ключевые слова: техническое состояние, сигнал, измерение, импульсная функция, деформация сигнала, энергия, метрический метод.

Поддержание любой системы в работоспособном и исправном состоянии должно ориентироваться не на отыскание неисправности, как обычно это делается, а на предсказании ее возникновения. В идеале, на основе измерения параметров, хотелось бы установить, каков остаточный ресурс системы. Однако такая задача трудно разрешима. С другой стороны, можно решить задачу непрерывного контроля состояния системы, для чего необходимо использовать специализированные технические средства и быстрые алгоритмы, выполняемые в темпе работы оборудования. В этом случае оценка технического состояния электромеханических систем (ЭМС) может быть основана на диагностике, выполняемой в РВ с использованием микропроцессорных систем.

Среди множества методов оценки технического состояния ЭМС можно выделить алгоритмы диагностирования на основе анализа в частотной области. В этом случае используют либо методы фильтрации, либо спектральный анализ, каждый из которых трудоемок или с точки зрения аппаратной реализации, или с точки зрения сложности и протяженности алгоритма. Упрощение этих методов может быть достигнуто с помощью применения информационного подхода, то есть представления диагностируемой системы в виде канала передачи данных, состояние которого влияет на характеристики выходного сигнала и может приводить последний к искажениям. В результате деформации сигнала изменяются его параметры, что связано с потерей доли энергии. Иными словами суть предлагаемого подхода заключается в оценке энергии выходного сигнала. Этот метод дает возможность выявлять неисправности в конкретных устройствах диагностируемой системы на ос-

нове анализа потери энергии не только во всем диапазоне частот, но и по отдельным ее составляющим.

Удачным решением можно было бы считать установление работоспособности системы по одному выходному сигналу, но, учитывая, что распознать в одном выходном сигнале множество возможных состояний сложно, необходимо использовать сигналы с выходов промежуточных узлов, тем самым обеспечивая больший объем информации, способствующий более точному принятию решения о состоянии объекта.

Свяжем оценку технического состояния ЭМС с подачей на вход системы сигналов с известными характеристиками, измерением характеристик выходных сигналов и проверкой условий работоспособности для полученных результатов измерений [1].

Условие работоспособности можно представить в следующем виде

$$\left| \sum_{i=1}^n a_{im} c_i - \sum_{i=1}^n a_{im} c_{im} \right| \leq \delta, \quad (1)$$

где a_{im} — коэффициенты, c_i, c_{im} — эталонные и измеряемые параметры, δ — допустимое отклонение.

Для обеспечения требуемой полноты контроля общее число измеряемых значений $R_9 (9 = 1, 2, \dots, n_1)$ должно быть не меньше числа существенных параметров n .

Так как при каждом измерении входной сигнал и алгоритм преобразования чаще всего являются известными, то измеряемые характеристики R_9 , составляющие вектора R , также являются известными функциями параметров ЭМС:

$$R = F(c), \quad (2)$$

где $c (c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$ — вектор параметров.