УДК 621.3

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-2-82-89

Инженерные методики идентификации электромеханических объектов с учетом моделей обменных процессов

А. Ю. Омельченко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

alex1957.12@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются инженерные методики импульсно-энергетического обмена в системе «прибор–объект» в рамках первого этапа измерения функции Грина. Вводятся основные понятия, необходимые для описания процесса измерения на указанном этапе. В частности, предлагается использовать условия адиабатической инвариантности действия в колебательных процессах. Приводится схема эксперимента и ее теоретическое обоснование, в основе которого лежат явление адиабатической инвариантности действия и идея использования прямого и обратного канонического преобразования пар переменных «координата–импульс» и «действие–угол». При обосновании процесса измерения используются и другие принципы гамильтоновой механики. Делается возможный анализ кванта действия как первичного понятия обменной механики.

Ключевые слова: импульсно-энергетический обмен, адиабатическая инвариантность, квант действия, функция Грина, каноническое преобразование, производящая функция, функция обмена, система «прибор–объект», детектор, анализатор, колебательный процесс, контур стабилизации действия

Для цитирования: Омельченко А. Ю. Инженерные методики идентификации электромеханических объектов с учетом моделей обменных процессов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 82–89. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-82-89.

Original article

Engineering Methods for Identifying Electromechanical Objects Taking into Account Models of Exchanged Processes

A. Yu. Omelchenko

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ alex1957.12@mail.ru

Abstract. Engineering methods of pulse-energy exchange in the «device–object» system are considered as part of the first stage of measuring the Green's function. The basic concepts necessary to describe the measurement process at this stage are introduced. In particular, it is proposed to use the conditions of adiabatic invariance of action in oscillatory processes. The experimental design and its theoretical justification are presented, which is based on the phenomenon of adiabatic invariance of action and the idea of using direct and inverse canonical transformation of pairs of variables «coordinate–momentum» and «action–angle». When justifying the measurement process, other principles of Hamiltonian mechanics are also used. A possible analysis of the quantum of action is made as the primary concept of exchange mechanics.

Keywords: pulse-energy exchange, adiabatic invariance, quantum of action, Green's function, canonical transformation, generating function, exchange function, «device–object» system, detector, analyzer, oscillatory process, action stabilization circuit

For citation: Omelchenko A. Yu. Engineering Methods for Identifying Electromechanical Objects Taking into Account Models of Exchanged Processes // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 82–89. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-82-89.

Введение. Полученная и представленная в [1] математическая модель обменных процессов, протекающих в системе «прибор–объект» (СПО), дает основания для качественного и количественного анализа конкретных систем при решении обратной задачи обменной механики (ОМ) (идентификации).

В ОМ «чистый» объект заключен в «частично прозрачную оболочку» прибора, удалить которую невозможно. Существование «чистого» (без оболочки) объекта есть абстракция метода классической электромеханики, достигшей несомненных успехов при моделировании процессов движения.

Отсюда следует, что СПО представляет собой целостный объект, изучаемый ОМ для решения как вновь поставленных, так и традиционных задач.

Рассмотренная в [2] редукция обменных процессов, протекающих в СПО, позволяет связать фундаментальные результаты из [1] с выводом функции Грина из обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ). При этом редукция требует стремления кванта действия к нулю, что ведет к почти идеальному прибору в паре «прибор–объект».

Функция Грина СПО – это результат решения задачи идентификации. Она, наряду с кривой стационарных состояний, представляет собой предельно полное описание СПО, насколько это позволяют ограничения прибора, ведущие к статистичности описания всей модели.

Вместе с тем, в [2] показано, что рассматриваемый метод вывода функции Грина справедлив не для всех классов ОДУ.

Целью данной статьи служит разбор и обоснование методов и средств для инженерного решения обратной задачи обменной механики.

В [1], [2] просматриваются три этапа расчета функции Грина СПО.

На первом этапе в [1] посредством решения уравнения обмена находится функция обмена. В [2] этому соответствует запись модели в виде ОДУ.

На втором этапе в [1] определяется функция Грина в координатно-энергетическом представлении. В [2] этому соответствует получение передаточной функции, зависящей от координаты как от параметра, в паре с кривой стационарных состояний.

На третьем этапе в [1] выполняется расчет функции Грина СПО в импульсно-энергетическом представлении. В [2] здесь выполняется расчет функции Грина с учетом редукционных соотношений.

Указанные этапы должны присутствовать в инженерной методике идентификации СПО. Но с учетом квазигармонических колебаний СПО с малой, но конечной амплитудой при медленном изменении частоты, на первом этапе следует учитывать явление адиабатической инвариантности действия. Это достаточно тонкое [3] явление будет нивелироваться либо преобладать – в зависимости от явлений диссипации или контрдиссипации в СПО.

Для описания явлений адиабатической инвариантности обычно пользуются аппаратом классической (гамильтоновой) механики, хотя считается, что эти явления наблюдаются в макро- и микромире. Например, действие в механике – это аналог энтропии в термодинамике. Особенно хорошо это заметно на модели идеального газа, находящегося в цилиндре с медленно движущимся поршнем, пусть даже газ состоит всего из одной молекулы и скорость движения этой молекулы во много раз больше скорости движения поршня. Тогда в результате упругих соударений цилиндра и поршня о дно молекула успеет много раз переместиться между ними, прежде чем положение поршня претерпит сколько-нибудь заметное изменение. Для ансамбля молекул налицо изоэнтропийный (адиабатический) процесс. Для одной молекулы площадь, охваченная фазовой траекторией, – это адиабатический инвариант.

Функция Грина системы «прибор–объект» формально представляет собой реакцию системы на постоянное входное воздействие в импульсно-энергетическом представлении, которое соответствует функции Дирака в координатно-временном представлении.

Далее рассматривается первый этап измерения и его теоретическое обоснование. Этот этап – наиболее ответственный с физико-технической точки зрения, так как от структур данных, здесь полученных, зависит качество расчетов на последующих этапах.

Постановка задачи. В данной статье требуется найти модели для ряда подзадач, связанных с первым этапом решения обратной задачи ОМ (идентификации).

Требуется определить условия адиабатической инвариантности действия в колебательных процессах измерения СПО.

Далее на основании производящей функции канонического преобразования следует получить прямое и обратное преобразования «действие–угол» для гармонических колебаний первого этапа решения обратной задачи ОМ (идентификации).

В результате на основе математического аппарата гамильтоновой механики и определенного заранее кванта действия требуется построить функциональную схему первого этапа идентификации СПО. Для этого уже имеются условия для адиабатической инвариантности действия и выбраны канонические переменные, преобразующиеся внутри функциональной схемы между анализатором и детектором.

С учетом того, что СПО на первом этапе решения обратной задачи ОМ совершает малые гармонические колебания, становится возможным построение модели кванта действия на основе классической модели осциллятора, что также будет сделано далее.

Выбранный способ определения кванта действия допускает определение так называемого инерционного коэффициента СПО, который в данном подходе необязателен. Однако такое определение сближает ОМ с классической механикой и делает более понятными предлагаемые здесь построения.

Далее будет представлен пример расчета инерционного коэффициента СПО, рассматриваемой в рамках электромеханики.

Условия адиабатической инвариантности действия в колебательных процессах. В случае весьма медленного изменения параметров извне в почти консервативной гамильтоновой системе некоторые переменные имеют тенденцию сохраняться с достаточно высокой точностью. При этом энергия системы, разумеется, не сохраняется. В [4]–[8] эти вопросы рассмотрены и приведены условия «адиабатического» (медленного и плавного) изменения этих параметров. Пусть λ – параметр, T – период движения системы. Тогда должны быть соблюдены условия

$$\dot{\lambda} T \ll \lambda;\ \ddot{\lambda} T \ll \dot{\lambda}. \qquad (1)$$

Здесь первая формула обеспечивает медленность изменения параметра системы, вторая – плавность. В случае линейного гармонического колебания, используемого на первом этапе измерения, когда этим параметром служит частота ω, вместо (1) будем иметь

$$\dot{\omega} \ll \omega^2;\ \ddot{\omega} \ll \dot{\omega}\omega. \qquad (2)$$

Пусть $H(p, x, \lambda)$ – функция Гамильтона СПО, совершающей почти периодическое движение. Если $\lambda = \text{const}$, то $H(p, x, \lambda) = E$ ($E = \text{const}$). Отсюда можно найти $p = p(x, E, \lambda)$. Тогда площадь, охватываемая на фазовой плоскости этой траекторией, $S(E,\lambda) = \oint p(x,E,\lambda)\, dx.$

Если λ медленно меняется, то E не сохраняется, но скорость изменения I, φ (координаты действие–угол) будет также малой и среднее значение $\langle \dot{E} \rangle = \dfrac{1}{T}\int_0^T \dot{E}(t)\, dt$ будет скоростью систематически медленного изменения энергии системы, как и $\dot{\lambda}$. Зависимость E от λ можно представить в виде постоянства некоторой функции от E и λ, которая и есть *адиабатический инвариант* $I(E, \lambda)$:

$$I(E,\lambda) = \frac{1}{2\pi} S(E,\lambda) = \frac{1}{2\pi} \oint p(x,E,\lambda)\, dx.$$

Для одномерного осциллятора, являющегося здесь моделью СПО, функция Гамильтона $H(p, x, t)$ имеет вид:

$$H(p,x,t) = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega(t)^2 x^2}{2}, \qquad (3)$$

где частота ω изменяется в соответствии с (2); m – масса материальной точки.

Так как уравнение фазовой траектории дается законом сохранения энергии $H(p, x) = E$ то, согласно (3), эта траектория ограничивает эллипс с полуосями $A_p = \sqrt{2mE}$ и $A_x = \sqrt{\dfrac{2E}{m\omega^2}}$. Его площадь $S(E,\omega) = \pi A_p A_x$. Таким образом,

$$I = \frac{1}{2m} S(E,\omega) = \frac{E}{\omega}.$$

Для контроля постоянства действия I из-за диссипации энергии в СПО удобно вместо фазовых координат p, x использовать координаты I, φ (действие–угол).

Расчет канонических преобразований «действие–угол». Преобразование координат в гамильтоновой механике должно сохранять вид уравнений Гамильтона (ковариантность). Для этого преобразование должно быть *каноническим*: в отличие от преобразования координат – степеней свободы в механике Лагранжа преобразование фазовых координат $p, x \to P, X$ в механике Гамильтона не обладает такой широкой свободой.

Однако в случае ковариантности этих уравнений в обеих системах координат должен быть справедлив принцип наименьшего действия. Тогда подынтегральные выражения будут отличаться друг от друга лишь на полный дифференциал некоторой функции, которая при варьировании исчезает (как разность значений на пределах интегрирования) [4]:

$$dF = p\,dx - PdX + (H' - H)\,dt, \tag{4}$$

где F – производящая функция канонического преобразования; H' – функция Гамильтона в координатах P, X. Отсюда также видно, что движение системы можно рассматривать и как последовательность канонических преобразований координат. Поэтому в качестве производящей функции $F(x, I)$ может быть выбрано укороченное действие $S_0(x, E(I)) = \int p(x, E)\,dx.$

Для системы, совершающей гармонические колебания, импульс найдется из выражения $H(p, x) = E$. Будем иметь: $S_0(x, E) = \int \sqrt{2mE - (m\omega x)^2}\,dx.$ Интегрируя и выполняя преобразования, получим:

$$S_0(x, E) = \frac{1}{2}x\sqrt{2mE - (m\omega x)^2} + \frac{E}{\omega}\arcsin\left(\sqrt{\frac{m}{2E}}\omega x\right) + 2\pi n\frac{E}{\omega} + c, \tag{5}$$

где c – постоянная.

Учитывая, что $E(I) = I\omega$, найдем из (5) $F(x, I)$:

$$F(x, I) = \frac{1}{2}x\sqrt{2m\omega I - (m\omega x)^2} + I\arcsin\left(\sqrt{\frac{m}{2\omega I}}\,\omega x\right) + 2\pi n I + c.$$

Для расчета прямого и обратного канонических преобразований найдем связь переменных p, x и I, φ, где I – новый «импульс», а φ – новая «координата». Из (4) получим:

$$p(x, I) = \frac{\partial F(x, I)}{\partial x};\ \varphi(x, I) = \frac{\partial F(x, I)}{\partial I}. \tag{6}$$

В результате расчета и преобразований из (6) будем иметь

$$p(I, x) = \sqrt{m\omega\left(2I - m\omega x^2\right)};\quad \varphi(I, x) = A\sin\left(\omega x\sqrt{\frac{m}{2\omega I}}\right), \tag{7}$$

где A – полуось эллипса, ограничивающего действие, расположенная на оси переменной x.

Подставляя x из второй формулы (7) в первую, после преобразований получим пару формул *обратного канонического преобразования* (ОКП):

$$x(I, \varphi) = \sqrt{\frac{2I}{m\omega}}\sin\varphi;\ p(I, \varphi) = \sqrt{2m\omega I}\cos\varphi. \tag{8}$$

Для получения *прямого канонического преобразования* (ПКП) следует решить (8) относительно I, φ. Будем иметь

$$\varphi(x, p) = A\tan 2\left(m\omega\frac{x}{p}\right);\quad I(x, p) = \frac{p^2}{2m\omega} + \frac{m\omega x^2}{2}. \tag{9}$$

Вторая формула в (9) есть функция Гамильтона осциллятора, деленная на частоту.

Определение модели кванта действия и расчет коэффициента инерции СПО. Далее из рассмотрения схемы процесса идентификации СПО будет следовать, что на разных траекториях и частотах требуется поддерживать определенное, заранее заданное значение действия I.

Квант действия – это первичная модельная форма, значение которой можно определить опытным путем при практическом решении обратной задачи СПО, если задать соотношение сигнала и шума.

Однако идеальную модель кванта действия можно построить, исходя из соображений классической механики, введя модель колебательной системы в виде линейного осциллятора механической или электромагнитной природы. Можно предположить, что каждый малый элемент амплитудно-фазового спектра СПО есть линейный одномерный осциллятор, совершающий свободные колебания в проходящем через него потоке энергии. При этих допущениях энергия E осциллятора как такового может быть определена выражением $E = \frac{mA^2\omega^2}{2}.$ Поскольку, с одной стороны, квант действия при адиабатически медленном изменении какого-либо из параметров осциллятора сохраняется и, с другой стороны, $I = \frac{\partial E}{\partial \omega},$ то

$$I = mA^2\omega, \tag{10}$$

где $A = \sqrt{\frac{2E}{m\omega^2}}$ – полуось эллипса, ограничивающего действие, расположенная на оси переменной x.

Коэффициент инерции («точечная масса») СПО может быть найден из условия сохраняющегося кванта действия:

$$m = \frac{I}{A^2\omega}. \tag{11}$$

Ясно, что в (10) инерционный коэффициент не выбран в качестве медленно меняющегося параметра, так что площадь $A^2\omega$ сохраняется.

Так как в пределах эллипса кванта действия положение «точечной массы» не определено, можно полагать, что эта масса равномерно распределена по всей площади эллипса в фазовой плоскости. Следует далее расширить определение модели кванта действия. Пусть A_0 – амплитуда при некотором значении ω_0, при которой отношение «сигнал–шум» δ равно единице. Тогда, задавая определенное отношение $\delta \gg 1$, из (11) получим

$$I = \delta^2 m A^2 \omega_0. \tag{12}$$

В этом выражении коэффициент инерции m (имеющий размерность массы, момента инерции, индуктивности и т. д.) СПО определен на основании (11), с учетом шума.

Структура СПО отражена в спектре, начинающемся со значения аргумента $E_0 = I\omega_0$ и заканчивающемся значением $E_m = I\omega_m$. Спектр определяется приведением матрицы функции Грина G к диагональному виду (задача о поиске собственных значений). Если ω_0 из (12) – это начальное значение частоты, то при колебаниях с энергией $E_0 \to 0$ СПО на большом участке амплитуды совершает движение, близкое к равномерно-прямолинейному, и его движение подобно свободному движению материальной точки с массой m. По правилам электромеханической аналогии определение коэффициента инерции переносится в электромагнитную область.

Например, для механического осциллятора собственная частота колебаний ω есть $2\pi\sqrt{\dfrac{b}{m}}$, где b – коэффициент жесткости материала (например, жесткость и геометрия пружины, участвующей в колебаниях); m – масса тела, совершающего одномерные колебания. Изменение частоты здесь достигается адиабатическим изменением коэффициента жесткости при постоянстве m. Для электромагнитного осциллятора $\omega = \dfrac{2\pi}{\sqrt{LC}}$, где L – индуктивность колебательного контура; C – его емкость. Изменение частоты здесь достигается адиабатическим изменением емкости, при постоянстве L.

Функциональная схема первого этапа идентификации. При рассмотрении экспериментальной части первого этапа измерения следует руководствоваться схемой (см. рисунок), совмещающей в себе свойства структурной схемы и алгоритма.

Так, на рисунке представлены система «прибор–объект» (СПО) и блоки алгоритма для процесса измерения функции $W'(x(t), E)$. Последняя представляет собой функцию Грина в координатно-энергетическом представлении (xE-представлении), заданную на траекториях $x(t)$. Далее, на втором этапе, из этой функции следует получить $W(x, E)$, которая зависит от x как от аргумента.

Основной частью схемы (см. рисунок) служит контур стабилизации действия $I_з$, состоящий из четырех блоков: блока *4*, блока *6* обратного канонического преобразования (ОКП), блока *7* СПО и блока *8* прямого канонического преобразования (ПКП). Контур стабилизации реализован на двух системах канонических переменных, «действие–угол» и «импульс–координата». Это связано с тем, что для расчета гармонического управляющего сигнала на СПО следует выполнить преобразование канонических переменных «действие–угол» в управляющие координату и импульс u, p_u (ОКП). Поэтому для перехода от одной пары переменных к другой предусмотрены блоки ОКП в прямом канале управления и ПКП в канале обратной связи.

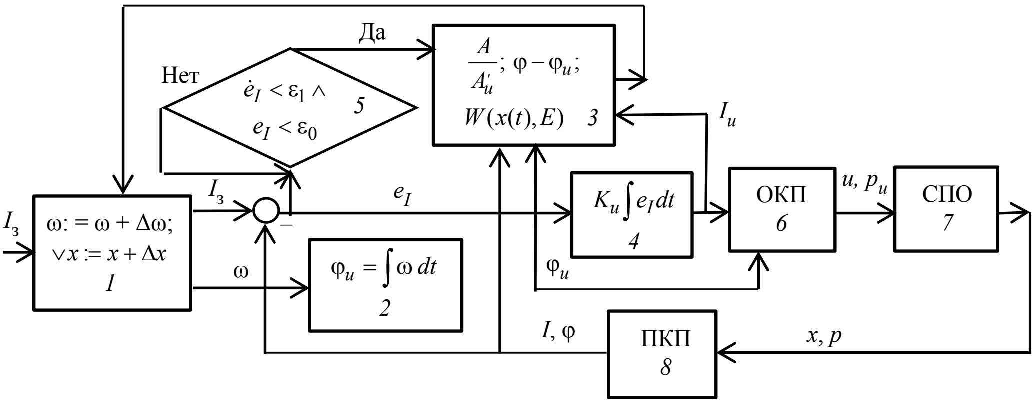

Схема первого этапа измерения
The first stage measurement diagram

Сумматор контура стабилизации действия определяет рассогласование $e_I = I_3 - I$. Несмотря на весьма медленное изменение сигнала частоты ω, поступающего на сумматор, возможно появление рассогласования вследствие неконсервативности СПО, поэтому блок *5* детектора [1] контролирует как само рассогласование e_I, так и скорость его изменения e_I в соответствии с (2). Так что измерение $W'(x(t), E)$ не происходит, пока указанные ошибки не достигнут нужных пределов ε_0 и ε_1 соответственно.

Качество работы контура стабилизации действия определяется блоком регулятора *4*. Предполагается, что коэффициент $K_u = \dfrac{1}{T_u}$ (T_u – характерное время для наблюдения явлений адиабатической инвариантности) должен по порядку соответствовать скорости изменения частоты ω при измерении.

На входе блока СПО произведение переменных u, p_u пропорционально мощности. Произведение переменных x, p на выходе СПО пропорционально действию.

На входе контура стабилизации действия расположен блок *1* изменения частоты ω и траектории $x(t)$. В нем выполняется расчет статической характеристики (если это требуется) $x_0 = f(u_0)$, где u_0 – сигнал управления, требуемый для поддержания координаты x_0 – одного из значений x (статическая характеристика СПО).

В блоке *3* на рисунке (первом анализаторе [1]) выполняется расчет функции Грина $W'(x(t), E)$ в точке на траектории $x(t)$ в зависимости от энергии E. Этому расчету предшествует выделение первой гармоники и усреднение смещения $x(t)$ по E. Затем определяется отношение выходной A и входной A_u амплитуд и разность выходной φ и входной φ_u фаз (последняя рассчитывается в блоке *2*). Символы $\vee$, $\wedge$ в блоках *1* и *5* означают логическое сложение и умножение соответственно.

Пример определения инерционного коэффициента для электромеханической системы «прибор–объект» (СПО). С учетом предположений (14, 15, 16) рассчитаем, на основании (16), инерционный коэффициент m для вращательного движения по нижеследующим данным. Введем для этой цели понятие энергетической доступности (недоступности) отдельных частей СПО. Одна часть СПО энергетически недоступна для другой, если колебательные процессы, протекающие в другой части СПО, не могут вызвать фазовые сдвиги и изменения в амплитудах колебаний первой части СПО. В прежних понятиях при бесконечно малых амплитудах это означало, что «полосы частот» этих частей разделены. Предположим, что электромагнитная часть СПО находится за пределами энергетической доступности со стороны механической части. Тогда можно раздельно определить квант действия электромагнитной и механической частей СПО. Например, для механической части СПО при следующих исходных данных: $\delta = 40$; $A_0 = 0.001$ rad; $\omega_0 = 0.5$ с$^{-1}$; $I = 1.6 \cdot 10^{-4}$ Дж · с, найдем m:

$$m = \frac{I}{\delta^2 A^2 \omega_0} = \frac{1.6 \cdot 10^{-4}}{40^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.25} = 0.4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Если электромагнитная часть СПО находится в пределах энергетической доступности механической части, то, используя свойство аддитивности, следует принять квант действия как сумму электромагнитной и механической частей. При этом не важно, в каких единицах будет измеряться инерционный коэффициент.

Обсуждение результатов. При построении инженерной методики идентификации в качестве инструментальных средств целесообразно использовать аппарат гамильтоновой механики, несмотря на его консервативную природу.

Это связано с тем, что благодаря управляемому и измеряемому подводу или отводу энергии от СПО она совершает колебания, подобные колебаниям истинных гамильтоновых систем. Тем самым реализуется сохранение консервативных частей энергии и импульса.

Пара переменных «действие–угол» позволяют адиабатически медленно (с учетом условий адиабатической инвариантности (1)), изменять частоту и координату в рамках контура стабилизации действия.

Особый интерес, на наш взгляд, представляет процесс сохранения действия (адиабатическая инвариантность действия) при поддержке квазистатических колебаний в схеме на рисунке. Наличие регулятора в координатах «действие–угол» обеспечит стабилизацию действия, насколько это позволит сделать закон регулирования и плавность изменения частоты. Здесь интересен количественный вклад закона адиабатической инвариантности в процесс идентификации на первом этапе.

Благодаря «энергетической» системе единиц масштабирования мощности, работы, энергии и действия схема на рисунке универсальна в техническом отношении, т. е. пригодна для исследования не только механических и электромеханических систем, но и электронных устройств – электронных силовых и слаботочных усилительно-преобразовательных устройств с внутренними контурами управления. Эти устройства также могут рассматриваться как системы «прибор–объект».

Тот факт, что в схеме первого этапа идентификации на рисунке участвуют пары переменных («действие–угол» и «импульс–координата»), имеет принципиальное значение: указанные переменные – сопряженные в смысле гамильтоновой механики. Сопряженность как явление особенно значима в физике и технике, а также присутствует как раздел в обменной механике. Функциональная полнота рассмотрения системы «прибор–объект» возникает в связи с учетом как минимум пары, сопряженных переменных.

Проблема возникновения и учета сопряженности переменных в обменной механике станет предметом рассмотрения в последующих публикациях.

Для правильной идентификации СПО наиболее важен успех первого этапа, приведенного ранее на функциональной схеме. Именно на этом этапе приобретаются знания о системе. На втором и третьем этапах проводятся расчеты и идет математическая обработка данных первого этапа.

Квант действия служит первичной измеряемой константой для СПО. Существует принципиальная возможность по значению кванта действия оценить значение инерционного коэффициента (индуктивности, массы, момента инерции и т. д.).

Поскольку вся ценная и существенная информация о системе «прибор–объект» находится в спектрах, описывающих эту систему операторов, то, казалось бы, нет необходимости рассчитывать инерционный коэффициент системы (физически это масса, индуктивность и т. д.), как это предлагалось в соответствующем разделе статьи.

Автору, однако, представляется полезным опыт выхода на твердые основы классической механики посредством такой давно и тщательно изученной модели, как линейный осциллятор, тем более, что малые квазилинейные колебания лежат в основе модели, представленной на рисунке.

Выводы:

1. Приведено обоснование методов и средств применения инженерного подхода, который позволяет строить алгоритмы и, следовательно, проводить количественные исследования рассматриваемых здесь процессов.

2. Предложен новый подход к идентификации электромеханического объекта, в математическом описании которого явно присутствует импульсно-энергетический обмен. Для этого в рассмотрение введен новый физико-технический агрегат, получивший название «система „прибор-объект“» (СПО).

3. Указанный подход доведен до описания в виде инженерной методики, представленной математической моделью и в виде алгоритма. Модель построена на основе принципов гамильтоновой механики.

4. Показано, что импульсно-энергетический обмен в данной методике обеспечивается явлением адиабатической инвариантности действия и регулятором, функционирующим в канонических переменных «действие–угол».

5. Отмечено, что для успешной реализации первого этапа идентификации, названного здесь первым этапом решения обратной задачи ОМ, требуется медленное и плавное изменение частоты и координаты СПО. Такое требование позволяет рассматривать методику в русле задач, представленных в [1].

6. Представлена математическая модель кванта действия, вбирающая в себя статистическую составляющую полной модели идентификации, поскольку последняя основана на принципах классической механики и не может учесть ряд положений, изложенных в [1].

7. Предложен метод определения инерционного коэффициента СПО из математической модели линейного осциллятора. Этот коэффициент в явном виде может не присутствовать в расчетных схемах, но, как уже было указано, служит для согласования с классической механикой.

Список литературы

1. Омельченко А. Ю. Математические модели обменных процессов для идентификации и управления электромеханическими объектами // Изв. СПГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 67–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-67-74.

2. Омельченко А. Ю. Редукция модели обменных процессов при идентификации электромеханических объектов // Изв. СПГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 6. С. 78–83. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-78-83.

3. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. М.: Наука, 1989. 479 с.

4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1988. 216 с.

5. Полак Л. С. Вариационные принципы механики: их развитие и применения в физике. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 600 с.

6. Якоби К. Лекции по динамике / пер. с нем. Н. С. Кошлякова. М.: Едиториал УРСС, 2004. 272 с.

7. Уиттекер Э. Т. Аналитическая динамика / пер. с англ. И. Г. Малкина. М.: Едиториал УРСС, 2004. 595 с.

8. Парс Л. А. Аналитическая динамика / пер. с англ. К. А. Лурье. М.: Наука, 1971. 636 с.

Информация об авторе

Омельченко Алексей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: alex1957.12@mail.ru

References

1. Omel'chenko A. Ju. Matematicheskie modeli obmennyh processov dlja identifikacii i upravlenija jelektromehanicheskimi ob#ektami // Izv. SPGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 3. S. 67–74. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-67-74. (In Russ.).

2. Omel'chenko A. Ju. Redukcija modeli obmennyh processov pri identifikacii jelektromehanicheskih ob#ektov // Izv. SPGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 6. S. 78–83. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-6-78-83. (In Russ.).

3. Arnol'd V. I. Matematicheskie metody klassicheskoj mehaniki. M.: Nauka, 1989. 479 s. (In Russ.).

4. Landau L. D., Lifshic E. M. Teoreticheskaja fizika: uchebn. posobie v 10 t. T. 1. Mehanika. M.: Nauka, 1988. 216 s. (In Russ.).

5. Polak L. S. Variacionnye principy mehaniki: ih razvitie i primenenija v fizike. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2010. 600 s. (In Russ.).

6. Jakobi K. Lekcii po dinamike / per. s nem. N. S. Koshljakova. M.: Editorial URSS, 2004. 272 s. (In Russ.).

7. Uitteker Je. T. Analiticheskaja dinamika / per. s angl. I. G. Malkina. M.: Editorial URSS, 2004. 595 s. (In Russ.).

8. Pars L. A. Analiticheskaja dinamika / per. s angl. K. A. Lur'e. M.: Nauka, 1971. 636 s. (In Russ.).

Information about the author

Aleksey Yu. Omelchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: alex1957.12@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.11.2024; принята к публикации после рецензирования 23.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 02.11.2024; accepted 23.12.2024; published online 28.02.2025.