

УДК 621.318.3.004.4

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МЕХАНОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОИСТОЧНИКА С МУЛЬТИПЛИКАТОРОМ

В.П. ПЕВЧЕВ, А.К. КУДИНОВ

(Тольяттинский государственный университет)

Рассмотрено применение методов электроакустических и электромеханических аналогий при моделировании сейсмоисточника с гидравлическим мультипликатором электрической схемой. Предложен оригинальный алгоритм объединения электрических схем замещения механической и акустической подсистем механоакустической системы.

Ключевые слова: сейсмоисточник, мультипликатор, аналогии, схема замещения.

Введение. При сейсморазведке полезных ископаемых используются импульсные источники мощных механических воздействий на поверхность грунта – сейсмоисточники, в настоящее время в основном электромеханические. Техническим результатом, который достигается при их работе, является создание сейсмических волн в земной коре, распространяющихся на глубину до 5-7 км и используемых для исследования её строения без бурения скважин и отбора проб грунта. Скорость воздействия на грунт не должна превышать 2 м/с [1], в то время как импульсные линейные электрические двигатели, используемые в сейсмоисточниках, работают с высоким КПД при существенно больших скоростях движения их рабочих элементов. Поэтому сейсмоисточник независимо от типа двигателя может оснащаться мультипликатором, уменьшающим величину скорости воздействия на грунт при необходимых для эффективной работы электромеханического двигателя скоростях движения его рабочих элементов, например, якоря и индуктора [2].

В механической системе сейсмоисточника нет неподвижной точки опоры, и в классической механике анализ таких систем относится к наиболее трудным для понимания случаям. Уравнения движения такой системы имеют сложный вид. Однако получение этих уравнений по электрической схеме замещения (после замены пространственной структуры графом) не представляет труда. На уровне схем проявляется сходство дифференциальных уравнений, описывающих процессы в системах различной физической природы, являющееся основой метода аналогий [3-4]. На уровне схем упрощается анализ систем, у которых протекающие в подсистемах различной физической природы процессы взаимосвязаны. Получение электрической схемы замещения механической системы с гидравлическим мультипликатором описано в работе [2], где в качестве схемы замещения мультипликатора применён идеальный электрический трансформатор.

Однако проблема учёта в схеме замещения таких параметров мультипликатора, как упругие и инерционные свойства заполняющей его жидкости, а также потери энергии в нём при срабатывании, ещё не решена. Рассмотрим особенности составления электрической схемы замещения механоакустической системы, в которой эти свойства легко могут быть учтены. Процедура объединения схем нескольких систем различной физической природы (в данном случае механической и акустической) в одну является одним из недостаточно формализованных элементов метода аналогий.

Объект исследования. В рассматриваемом в качестве примера механоакустической системы сейсмоисточнике (рис.1) нижние поверхности якоря 2 и индуктора 3 линейного электрического двигателя образуют с излучателем 4 полость мультипликатора 1, которая заполняется жидкостью. Силовое воздействие якоря на мультипликатор приводит к появлению в жидкости

давления p , распространяющегося во все стороны. Для последующей замены сейсмоисточника схемой взаимодействующие с жидкостью мультипликатора поверхности представим поршнями: a – на якоре с площадью S_a , b – на индукторе с площадью S_b и c – на излучателе с площадью $S_c=S_a+S_b$ [2].

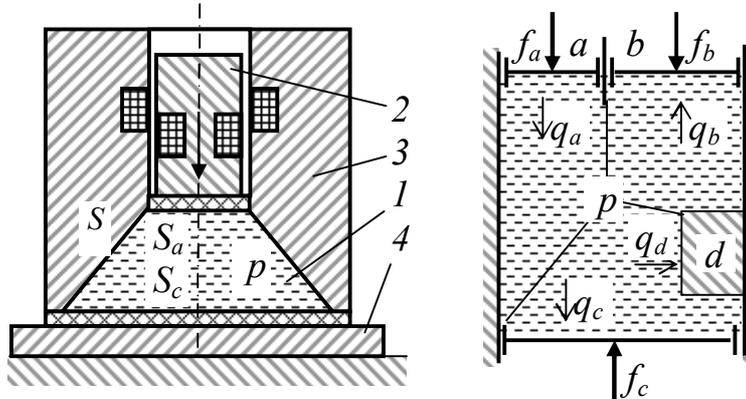


Рис.1. Сейсмоисточник с мультипликатором и поршневая модель мультипликатора

Электроакустическая аналогия. Гидравлический мультипликатор можно считать акустической системой – совокупностью полостей, заполненных подвижной рабочей средой [5]. Разделим условно (тонкими линиями на рис.1) мультипликатор сейсмоисточника на четыре полости: три, подвергающиеся воздействию соответствующих поршней, и одну – d , моделирующую такие свойства мультипликатора, как акустическую податливость ξ_d и отдачу тепла, возникающего при сжатии жидкости в нём, во внешнюю среду – акустическое сопротивление χ_d .

При замещении схемой указанные полости заменяются двухполюсными элементами и макроэлементами. Состояние двухполюсного элемента схемы определяется двумя переменными разных типов. Разность давлений p на полюсах элемента является переменной дифференциального типа, а расход q подвижной рабочей среды через элемент – потокового.

Существует аналогия переменных: давления p в акустической схеме и напряжения u в электрической, а также акустического расхода q и электрического тока i . Уравнения для пассивных элементов этих схем тоже аналогичны:

$$u = Ri \leftrightarrow p = \chi q,$$

$$u = L \frac{di}{dt} \leftrightarrow p = \mu \frac{dq}{dt},$$

$$u = \frac{1}{C} \int idt \leftrightarrow p = \frac{1}{\xi} \int qdt,$$

где R, L, C – электрические сопротивление, индуктивность и ёмкость; χ, μ, ξ – акустические сопротивление, масса и податливость.

Поэтому электрическая схема, граф которой идентичен графу акустической, а элементы в ветвях аналогичны, является схемой замещения акустической системы. Её токи и напряжения являются для элементов реальной акустической системы расходами и давлениями.

Электромеханическая аналогия. Силы f в схемах замещения механических систем имеют потоковый тип, а скорости v движения элементов – дифференциальный (значения скорости на разных полюсах элемента разные) [4].

Аналогия между силой f в механической системе и напряжением u в электрической, а также между скоростью v и электрическим током i получила название первой системы электромеханических аналогий [3]:

$$\begin{aligned} u &= Ri \leftrightarrow f = hv, \\ u &= L \frac{di}{dt} \leftrightarrow f = m \frac{dv}{dt}, \\ u &= \frac{1}{C} \int idt \leftrightarrow f = \frac{1}{e} \int vdt, \end{aligned}$$

где h , m , e – механические трение, масса и податливость.

Из-за того, что силы f в схеме замещения механической системы имеют потоковый тип, а напряжения u в электрической – дифференциальный, их непосредственное сопоставление невозможно. При применении первой системы электромеханических аналогий необходимо дуальное перестроение схемы механической системы [3], при котором типы переменных изменяются. В электрической схеме замещения, граф которой идентичен графу дуальной механической схемы, а элементы в ветвях аналогичны, токи и напряжения являются для элементов механической системы скоростями и силами.

Правила объединения схем замещения. Электрические схемы замещения механической и акустической систем могут быть состыкованы. При этом токи и напряжения в объединённой схеме должны соответствовать переменным какой-то одной из двух систем, чтобы не нарушалось единство описания. То есть параметры одной из них должны быть первичными, а второй – приведёнными.

Так как источник энергии сейсмоисточника находится в механической системе, а не в акустической, то рационально рассматривать акустическую в качестве вторичной. Электрическую схему её замещения следует присоединять к электрической схеме замещения механической системы вместо элементов этой схемы. То есть необходимо определить общие элементы стыкуемых схем. Например, в соответствии с рис.1 общими для двух рассматриваемых систем элементами могут быть поршни a , b , c . Величины площадей S указанных поршней можно использовать для пересчёта параметров акустической схемы в параметры механической:

$$\begin{aligned} f &= pS, \\ v &= q/S. \end{aligned}$$

Предлагается в схеме замещения поршни a , b , c моделировать идеальными трансформаторами T_a , T_b , T_c с числами витков w_a , w_b , w_c в механической цепи, равными площадям соответствующих поршней S_a , S_b , S_c (их величины могут быть дробными), и единичными в акустической цепи. Соответственно величины S^2 (размерностью метр в четвёртой степени) будут являться коэффициентами пересчёта величин пассивных элементов, относящихся к цепям соответствующих трансформаторов в акустической схеме, в величины их аналогов в электрической схеме механической системы.

Электрическая схема замещения акустической системы. Схема замещения акустической системы показана на рис.2. Давление в мультипликаторе соответствует значению дифференциальной переменной p на соединённых параллельно одновитковых обмотках трансформаторов T_a , T_b , T_c (в статике – на элементе ξ_A). Полость d заменена последовательно соединёнными акустической податливостью ξ_A и акустическим сопротивлением χ_A . Акустическими сопротивлениями χ_a , χ_b , χ_c учтено вязкое трение в жидкости. В этом примере инерционные свойства жидкости учитывать не будем. При большой скорости движения жидкости они могут быть смоделированы акустическими массами, включёнными в схему последовательно с акустическими сопротивлениями χ_a , χ_b , χ_c .

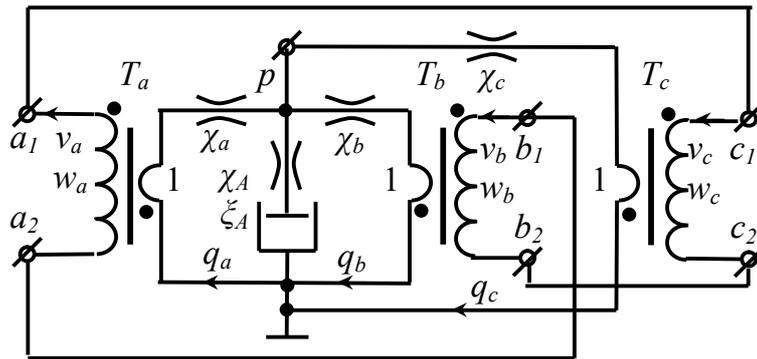


Рис.2. Полная схема мультипликатора в сейсмоисточнике

Приведённая на рис.2 схема может быть упрощена. Перенесём элементы χ_a, χ_b, χ_c из цепей вторичных (одновитковых) обмоток трансформаторов в соответствующие первичные – из акустической цепи в механическую (с коэффициентами пересчёта, равными квадратам числа витков соответствующих обмоток, или, что то же самое, квадратам площадей):

$$r_a = S_a^2 \chi_a,$$

$$r_b = S_b^2 \chi_b,$$

$$r_c = S_c^2 \chi_c.$$

После такой процедуры все три одновитковые обмотки окажутся включенными параллельно. Три трансформатора в этом случае можно заменить одним многообмоточным. Общую одновитковую обмотку также можно исключить, перенеся цепочку $\chi_A \xi_A$ в какую-либо первичную цепь (например, в цепь обмотки w_a). При этом:

$$C_A = S_a^2 \xi_A,$$

$$r_A = S_a^2 \chi_A.$$

Электрическая схема замещения механической системы. Схема замещения механической системы рассматриваемого сейсмоисточника дана на рис.3, а. Якорь, индуктор и излучатель в схеме представлены массами m_a, m_b и m_c соответственно, грунт – податливостью ξ_c . Силы веса якоря P_a , индуктора P_b и излучателя P_c направлены к общей точке – системе отсчёта. Источник силы f , развиваемой электромеханическим двигателем, действует на индуктор вверх (встречно направлению силы его веса, поэтому источники обращены к полюсу массы m_b разными полюсами), а на якорь – вниз (согласно направлению силы его веса). Давление p в акустической системе (АС – выделена пунктиром) действует на индуктор и якорь вверх силами f_a и f_b , соответственно, а на излучатель – силой f_c вниз (направления сил определены по соответствию с направлениями сил веса).

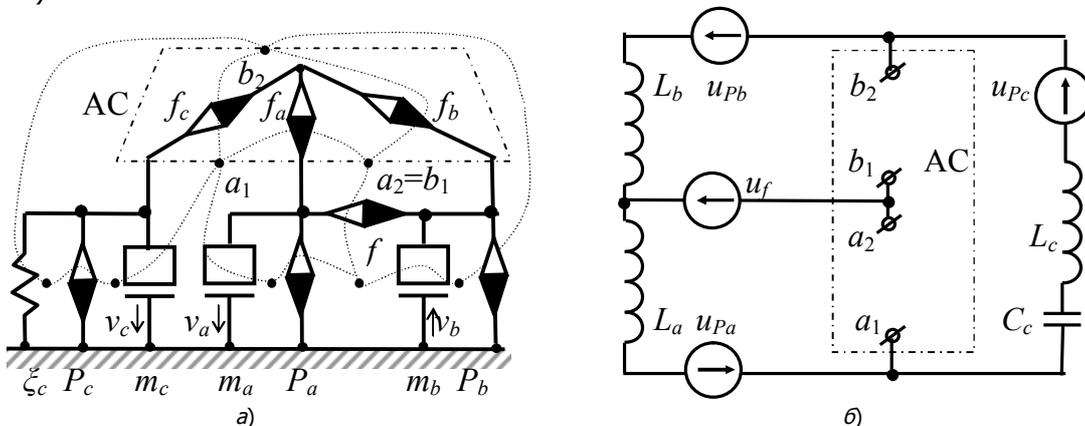


Рис. 3.Схемы замещения механической системы сейсмоисточника:
а – с источниками силы потокового типа; б – дуальная электрическая

Граф дуальной схемы механической системы сейсмоисточника показан на рис.3, а тонкими линиями, а на рис.3, б приведена полученная применением первой системы электромеханических аналогий соответствующая графу электрическая схема замещения. В ней направления источников $u_f, u_{Pa}, u_{Pb}, u_{Pc}$, замещающих силы f, P_a, P_b, P_c , определены по правилу: если в исходной (механической) схеме источник направлен к узлу, то в дуальной (электрической) он направлен по часовой стрелке в контуре, заменившем указанный узел [2].

Итоговая схема замещения. На рис.4 представлена итоговая электрическая схема замещения рассмотренной механоакустической системы сейсмоисточника, полученная стыковкой в точках a_1, a_2, b_1 и b_2 электрической схемы акустической системы (АС, выделена пунктиром) с дуальной электрической схемой механической системы, показанной на рис.3, б.

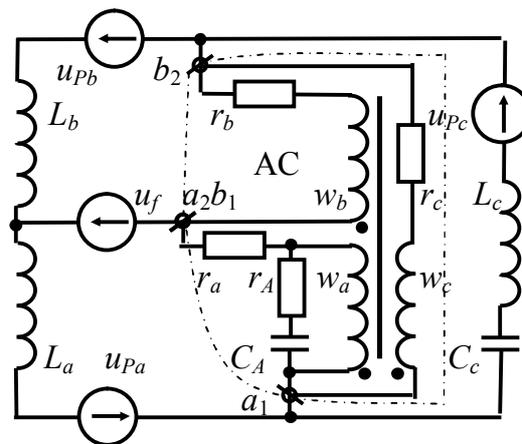


Рис.4. Электрическая схема замещения механоакустической системы

Схема замещения полости d акустической системы χ_{ASA} может быть приведена к любому поршню (обмотке), в этом примере – к назначенному первичным поршню a . В случае, когда вязким трением в мультипликаторе можно пренебречь, сопротивления r_a, r_b, r_c из схемы могут быть удалены. А так как площадь S_c равна сумме площадей S_a и S_b (и, соответственно, $w_a + w_b = w_c$), обмотку w_c при этом можно удалить тоже, получив необходимую силу с последовательно включённых обмоток $w_a + w_b$. Схема, показанная на рис.4, была получена в работе [2].

Получение из разработанных общих научных положений частных научных результатов подтверждает достоверность продемонстрированной методики объединения схем замещения механической и акустической систем с помощью трансформаторов.

Заключение. 1. В электрической схеме замещения механическая и акустическая системы сейсмоисточника с гидравлическим мультипликатором содержат переменные двух одинаковых типов (силы и скорости). Это позволяет применять при анализе механоакустической системы распространённые программные средства анализа электрических схем и упрощает расчёт процессов в сейсмоисточнике.

2. Схемы этих систем могут быть состыкованы с применением идеальных трансформаторов с числами витков в механической цепи, равными площадям воздействующих на жидкость в мультипликаторе элементов механической системы, и единичными – в акустической цепи.

3. Электрическая схема замещения механоакустической системы позволяет моделировать не только основную функцию гидравлического мультипликатора, но и его упругие, инерционные и диссипативные свойства.

Библиографический список

1. Молоканов Г.И. Преобразование механической энергии в сейсмическую при ударе по поверхности / Г.И. Молоканов // Разведочная геофизика. – 1979. – Вып. 65. – С. 3–12.
2. Ивашин В.В. Построение электрических цепей – аналогов механических систем с преобразовательными элементами / В.В. Ивашин, И.А. Милорадов // Известия вузов. Электромеханика. – 1983. – №7. – С.108–111.
3. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий / Г.А. Гамбурцев // Доклады академии наук. – 1935. – №8-9 – 303 с.
4. Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т.1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1973. – 399 с.
5. Ленк А. Электромеханические системы / А. Ленк. – М.: Мир, 1978. – 283 с.

Материал поступил в редакцию 02.03.11.

References

1. Molokanov G.I. Preobrazovanie mehanicheskoi energii v seismicheskuyu pri udare po poverhnosti / G.I. Molokanov // Razvedochnaya geofizika. – 1979. – Vyp. 65. – S. 3–12. – In Russian.
2. Ivashin V.V. Postroenie elektricheskikh cepei – analogov mehanicheskikh sistem s preobrazovatel'nymi elementami / V.V. Ivashin, I.A. Miloradov // Izvestiya vuzov. Elektromehanika. – 1983. – №7. – S.108–111. – In Russian.
3. Gamburgcev G.A. O sostavlenii elektromehanicheskikh analogii / G.A. Gamburgcev // Doklady akademii nauk. – 1935. – №8-9 – 303 s. – In Russian.
4. Harkevich A.A. Izbrannye trudy. V 3 t. T.1. Teoriya elektroakusticheskikh preobrazovatelei. Volnovye processy / A.A. Harkevich. – M.: Nauka, 1973. – 399 s. – In Russian.
5. Lenk A. Elektromehanicheskie sistemy / A. Lenk. – M.: Mir, 1978. – 283 s. – In Russian.

MECHANICAL-ACOUSTIC SYSTEM EQUIVALENT OF SEISMIC-WAVE GENERATOR WITH MULTIFIER

V.P. PEVCHEV, A.K. KUDINOV

(Togliatti State Technical University)

The application of methods of the electro-acoustic and electro-mechanical analogies to simulate a seismic-wave generator with hydraulic multiplier by the electric circuit is analyzed. An original algorithm of integrating the electric circuit equivalent of mechanical and acoustic subsystems of the mechanical-acoustic system is offered.

Keywords: seismic-wave generator, multiplier, analogies, equivalent.