

УДК 631

UDC 631

**РАССМОТРЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
АКУСТО-МАГНИТНЫХ АППАРАТОВ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВА-
НИЯ В ГИДРОПОННЫХ УСТАНОВКАХ**

**CONSIDERATION OF THE CRITERIA OF SIM-
ILARITY TO CREATE NEW DESIGNS OF
ACOUSTIC-MAGNETIC DEVICES INTENDED
TO BE USED IN HYDROPONIC STATIONS**

Коржаков Алексей Валерьевич
к.т.н., доцент

Korzhakov Alexey Valeryevich
Candidate of Technical Sciences, associate professor

Коржакова Светлана Александровна
к.э.н.
*Адыгейский государственный университет, Май-
коп, Республика Адыгея, Россия*

Korzhakova Svetlana Aleksandrovna
Candidate of Economic Sciences
*Adyghe state University, Maikop, Republic of Adygeya,
Russia*

В статье приведены результаты теоретического исследования критериев подобия акусто-магнитного аппарата, предназначенного для использования новых конструкций в гидропонных установках. Произведён расчет электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата, имеющей четыре взаимосвязанных контура

The article contains the results of theoretical research of the criteria of similarity of acoustic-magnetic device intended for the use of new designs in hydroponic stations. Calculation of the electromagnetic component of the acoustic-magnetic device that has four interrelated path has been made

Ключевые слова: МАГНИТНАЯ ЭНЕРГИЯ, ЗА-
КОН КИРХГОФА, АКУСТО-МАГНИТНЫЙ АП-
ПАРАТ, ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ КАТУШ-
КИ, КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ, ПОДСИСТЕМЫ,
КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ

Keywords: MAGNETIC ENERGY, KIRCHHOFF's
RULE, ACOUSTIC-MAGNETIC DEVICE, INTER-
RELATED COIL, SIMILARITY CRITERION, SUB-
SYSTEMS, CRITERIA EQUATION

Введение

Существует множество различных условных показателей и эмпирических коэффициентов для расчета электромагнитных катушек. Но их всех характеризует один существенный недостаток, связанный с узким диапазоном конструкций, работающих в определенных условиях. Преимущество перед ними имеют критерии подобия, которые не зависят от величины сравниваемых конструкций, т.к. являются безразмерными комплексами.

Состав критериев подобия показывает, какие величины должны быть измерены на опыте, чтобы их результаты были сопоставимы. Полученные экспериментальные данные, записанные в критериальной форме, могут быть использованы при обобщении результатов опытов с целью создания новых конструкций или сравнения с существующими.

Для создания электромагнитных катушек новой конструкции необходимо рассмотреть подобие: геометрическое, электромагнитное, тепловое, механическое.

Нам известно, что с изменением размеров электромагнитных катушек изменение индукции, температуры обмотки, плотности тока происходит непропорционально. Если существующая конструкция является рациональной, то подобная ей, но других размеров, может быть не работоспособной, или, по крайней мере, не рациональной. Поэтому основная задача видится в подборе наиболее подходящих для новой конструкции критериев подобия.

Рассмотрение тепловых критериев подобия - самостоятельная сложная задача, которая автором рассматриваться не будет, так как в настоящее время существует множество методов, позволяющих рассчитать значение коэффициента теплоотдачи.

Объектом исследования является акусто-магнитный аппарат.

Предмет исследования – расчет электромагнитной составляющей и критериев подобия акусто-магнитного аппарата.

Целью исследования является формирование критериев для создания новых акусто-магнитных аппаратов.

Задачи исследования:

- рассчитать электромагнитную составляющую акусто-магнитного аппарата;
- рассмотреть подобие цепей, имеющих взаимно индуктивную связь.

Постановка и решение задач.

Произведем расчет электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата, имеющей четыре взаимосвязанных контура.

Рассмотрим цепь, состоящую из четырёх контуров: первый из них

имеет параметры R_1, L_1, I_1 и включается на импульсное напряжение U_1 , второй контур R_2, L_2, I_2 , включается на импульсное напряжение U_2 , третий контур R_3, L_3, I_3 включается на импульсное напряжение U_3 и четвертый - короткозамкнутый контур, характеризующийся параметрами R_4, L_4, I_4 . В целом схема является системой, состоящей из четырех подсистем (контуров 1,2,3,4). Согласно первому дополнительному положению системы подобны, если соответственно подобны составляющие её системы. Перед нами стоит задача найти критерии подобия каждой из подсистем (контуров). Запишем систему уравнений, описывающих падение напряжения на каждом контуре.

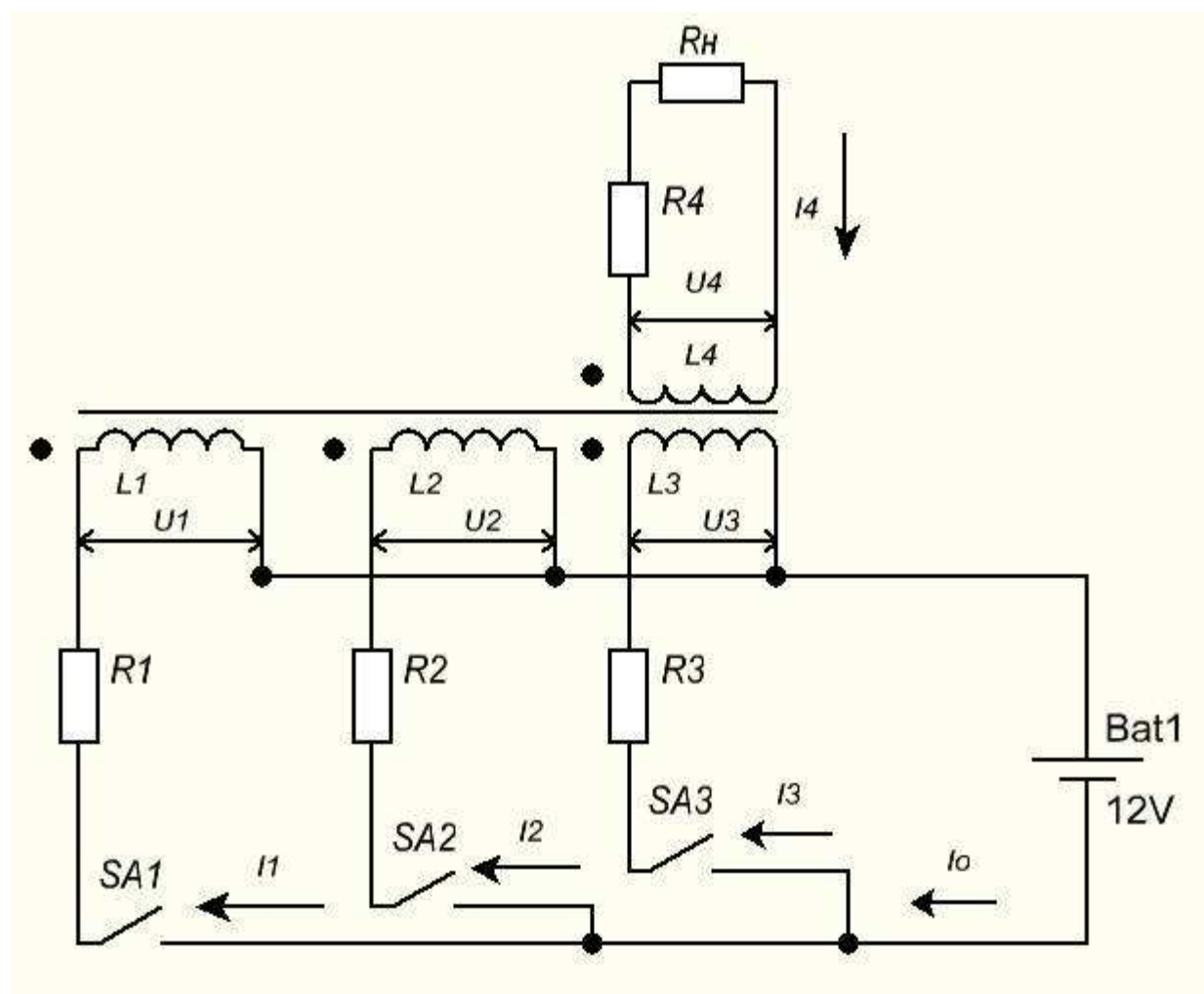


Рисунок 1 – Схема замещения электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата.

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt}; \\ u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} \\ u_3 = i_3 R_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_4}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt}; \\ 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{24} \frac{di_2}{dt} \\ 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{34} \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

где M_{14} – ЭДС взаимной индукции между катушками L_1 и L_4 ,

M_{24} – ЭДС взаимной индукции между катушками L_2 и L_4 ,

M_{34} – ЭДС взаимной индукции между катушками L_3 и L_4 .

Полная ЭДС, наводимая в первом контуре в момент включения выключателя SA1:

$$e_1 = -\frac{d}{dx}(L_1 i_1 \pm M_{14}) = e_{1L} \pm e_{1M_{14}}. \quad (3)$$

где M_{14} – ЭДС взаимной индукции между катушками L_1 и L_4 .

Полная ЭДС, наводимая в первом контуре в момент включения выключателя SA2:

$$e_1 = e_{1L} \pm e_{1M_{14}} \pm e_{1M_{12}}. \quad (4)$$

Полная ЭДС, наводимая в первом контуре в момент включения выключателя SA3:

$$e_1 = e_{1L} \pm e_{1M_{14}} \pm e_{1M_{12}} + e_{1M_{13}}. \quad (5)$$

Полная ЭДС, наводимая во втором контуре в момент включения выключателя SA2:

$$e_2 = e_{2L} \pm e_{2M_{14}} \pm e_{2M_{12}}. \quad (6)$$

Полная ЭДС, наводимая во втором контуре в момент включения выключателя SA3:

$$e_2 = e_{2L} \pm e_{2M_{14}} \pm e_{2M_{12}} + e_{2M_{23}}. \quad (7)$$

Магнитная энергия трёх магнитосвязанных катушек с токами I_1, I_2, I_3 равна:

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + \frac{L_3 I_3^2}{2} \pm M_{12} I_1 I_2 \pm M_{13} I_1 I_3 \pm M_{23} I_2 I_3, \quad (8)$$

В момент включения всех выключателей ток в цепи равен:

$$I_1 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3. \quad (9)$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для согласного включения катушек в момент включения выключателя SA2:

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_2 j\omega M_{12} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12} + \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) = \dot{E}_1 \end{cases} \quad (10)$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для согласного включения катушек в момент включения выключателя SA3:

$$\begin{cases} \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \dot{I}_2 j\omega M_{12} + \dot{I}_3 j\omega M_{13} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 j\omega M_{12} + \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) + \dot{I}_3 j\omega M_{23} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_3(R_3 + j\omega L_3) + \dot{I}_2 j\omega M_{23} + \dot{I}_3 j\omega M_{13} = \dot{E}_1 \end{cases} \quad (11)$$

Совместное решение уравнений даёт токи I_1, I_2, I_3 для моментов времени, когда включены SA1, SA2, SA3.

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для согласного включения катушек в момент, когда выключен выключатель SA3, а выключатели SA1 и SA2 остаются включены:

$$\begin{cases} \dot{I}_2(R_2 + j\omega L_2) + \dot{I}_3 j\omega M_{23} = \dot{E}_1 \\ \dot{I}_3(R_3 + j\omega L_3) + \dot{I}_2 j\omega M_{23} = \dot{E}_1 \end{cases} \quad (12)$$

Т.к. $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$, то можем рассчитать первичную и вторичную цепь трансформатора.

Для первичной цепи

$$\dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_3 R_3 + \dot{I}_1 j\omega L_1 + \dot{I}_2 j\omega L_2 + \dot{I}_3 j\omega L_3 + \dot{I}_0 j\omega M_0 = \dot{E}_1 \quad (13)$$

Для вторичной цепи

$$\dot{I}_4 R_4 + \dot{I}_4 j\omega L_4 + \dot{I}_0 j\omega M_0 + U_n = 0 \quad (14)$$

Покажем, что нагрузка имеет индуктивный характер $Z_n = Z_n e^{j\varphi_n}$.

Напряжение на нагрузке U_n опережает ток I_n на угол φ_n . Падение напряжения $I_4 R_4$ совпадает по фазе с током I_2 . Вектор $I_4 j\omega L_2$ опережает вектор тока I_4 на 90° . Подставим в уравнение (12) $U_n = I_4 (R_n + jX_n)$ и решим уравнения (13) и (14) относительно I_n :

(15)

где R_n и X_n - вносимые из вторичного контура в первичный контур активное и реактивное сопротивления, при этом

$$(16)$$

$$(17)$$

$$H = \frac{I_0 N}{2\pi r} \quad (18)$$

Индуктивность тороидальной и длинной цилиндрической катушки

$$L = \frac{AN^2 M_\alpha}{l}.$$

Решим задачу подобия цепей, имеющих взаимно индуктивную связь.

Схема, представленная на рисунке 1, состоит из четырёх подсистем. Согласно первому дополнительному положению, системы подобны, если соответственно подобны составляющие их подсистемы. Перед нами стоит задача найти критерии подобия каждой из подсистем (контуров). Рассмотрим одну из подсистем, состояние которой можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt}; \\ 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{14} \frac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (19)$$

Применим способ интегральных аналогов, находим пять критериев подобия, разделив соответственно на $i_1 R_1$ и $i_4 R_4$ уравнения системы (19)

получим:

$$\pi_1^y = \frac{U}{i_1 R_1} = \frac{i_1^\infty}{i_1}; \pi_2^y = \frac{L_1}{R_1 t} = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3^y = \frac{M_{14}}{R_1 t} \cdot \frac{i_4}{i_1} = \frac{T_{M_1}}{t} \cdot \frac{i_4}{i_1};$$

$$\pi_4^y = \frac{L_4}{R_4 t} = \frac{T_{L_4}}{t}; \pi_5^y = \frac{M_{14}}{R_4 t} \cdot \frac{i_4}{i_4} = \frac{T_{M_4}}{t} \cdot \frac{i_2}{i_4};$$

где $T_{M_1} = \frac{M_{14}}{R_1}$, $T_{M_4} = \frac{M_{14}}{R_4}$ – постоянные времени взаимоиндукции со-

ответственно контуров 1 и 4. Установим критерии подобия с помощью – теоремы. При этом мы должны принять во внимание все параметры, которые характеризуют все элементы и процессы, протекающие в этих контурах.

Для первого контура это будет набор параметров: $U, i_1, i_4, R_1, L_1, M_{14}, t$, а число форм записи $F_{\pi_1} = 21, F_{\pi_4} = 10$. Независимые параметры: i_4, R_4, t для второго и i_1, R_1, t первого контура. При этом получим семь критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{U}{i_1 R_1} = \frac{i_1^\infty}{i_1}; \pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t} = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3 = \frac{M_{14}}{R_1 t} = \frac{T_{M_1}}{t};$$

$$\pi_4 = \frac{i_4}{i_1}; \pi_5 = \frac{L_4}{R_4 t} = \frac{T_{L_4}}{t}; \pi_6 = \frac{M_{14}}{R_4 t} = \frac{T_{M_4}}{t}; \pi_7 = \frac{i_1}{i_4}.$$

При этом $\pi_3^y = \pi_3 \cdot \pi_4$, а $\pi_5^y = \pi_6 \cdot \pi_7$. Остальные критерии ($\pi_1^y, \pi_2^y, \pi_4^y$) совпадают с соответствующими критериями, полученными на базе –теоремы (π_1, π_2, π_5). Запишем критериальные уравнения, соответствующие контурам 1 и 4:

$$\pi_1 = f_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4); \pi_7 = f_2(\pi_5, \pi_6).$$

Выражение критерия π_7 эквивалентно критерию π_4 . В итоге получим для всей системы критериальное уравнение:

$$(U_1)\pi_1 = F_1(\pi_2 \pi_3 \pi_5 \pi_6).$$

Для подобия процессов необходимо и достаточно равенство четырёх определяющих критериев:

$$\pi_2 = \frac{T_{L_1}}{t}; \pi_3 = \frac{T_{M_1}}{t}; \pi_5 = \frac{T_{L_4}}{t}; \pi_6 = \frac{T_{M_4}}{t};$$

Полученные критерии подобия остаются справедливыми и для других контуров нашей цепи, содержащей четыре взаимосвязанных индуктивности и один источник питания. Установим критерии подобия для контуров 2 и 4.

$$\begin{cases} u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt}; \\ 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt} - M_{24} \frac{di_2}{dt}. \end{cases} \quad (20)$$

Найдём пять критериев подобия:

$$\pi_8^y = \frac{U_2}{i_2 R_2} = \frac{i_2^\infty}{i_2}; \pi_9^y = \frac{L_2}{R_2 t} = \frac{T_{L_2}}{t}; \pi_{10}^y = \frac{M_{24}}{R_2 t} \cdot \frac{i_4}{i_2};$$

$$\pi_{11}^y = \frac{L_4}{R_4 t} = \frac{T_{L_4}}{t} = \pi_5; \pi_{12}^y = \frac{M_{24}}{R_4 t} \cdot \frac{i_2}{i_4};$$

Параметры второго контура: $U_2, i_2, i_4, R_2, L_2, M_{24}, t$, для четвертого контура: $i_2, i_4, R_4, L_4, M_{24}, t$.

Получим семь критериев подобия, учитывая, что:

$$\pi_{11}^y = \pi_5^y; \pi_8 = \frac{U_2}{i_2 R_2}; \pi_9 = \frac{L_2}{R_2 t}; \pi_{10} = \frac{M_{24}}{R_2 t}; \pi_{11} = \frac{i_4}{i_2}; \pi_{12} = \frac{L_4}{R_4 t};$$

$$\pi_{13} = \frac{M_{24}}{R_4 t}; \pi_{14} = \frac{i_2}{i_4};$$

При этом $\pi_{10}^y = \pi_{10} \cdot \pi_{11}$, а $\pi_{12}^y = \pi_{13} \cdot \pi_{14}$; $\pi_{11}^y = \pi_5^y$.

Критерии π_8^y, π_9^y совпадают с полученными на базе π – теоремы, а

$$\pi_{11}^y = \pi_{12} = \pi_5.$$

Запишем критериальные уравнения в соответствующем контуре:

$$\pi_8 = f_3(\pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}); \quad \pi_{14} = f_4(\pi_5, \pi_{13}).$$

Выражение π_{14} эквивалентно π_{11} , в итоге критериальное уравнение для подсистемы состоит из контуров 2 и 4 имеет вид:

$$\llbracket (U)_2 \rrbracket \pi_8 = f_2(\pi_9, \pi_{10}, \pi_5, \pi_{13});$$

Действующие в данной цепи ЭДС при этом должны находиться в таких же соотношениях, какие имеются в цепи, подобной данной. При этом пропорциональные изменения значений всех ЭДС данной цепи влияют на

масштаб токов, не меняя подобия процессов.

Исходя из вышесказанного для второго контура, делаем вывод, что ЭДС, наводимую в момент включения выключателя SA1, можно описать уравнением:

$$e_2 = e_{2L} - e_{2M_{14}} + e_{2M_{12}},$$

где $e_{2L} = -L_2 \frac{di_2}{dt_1}; e_{2M_{14}} = -L_4 \frac{di_4}{dt_1}; e_{2M_{12}} = -L_2 \frac{di_2}{dt_1};$

Тогда для момента включения выключателя SA1 уравнение имеет вид:

$$\begin{cases} u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt_1} + M_{24} \frac{di_4}{dt_1} + M_{12} \frac{di_1}{dt_1} \\ 0 = i_4 R_4 + L_4 \frac{di_4}{dt_1} - M_{24} \frac{di_2}{dt_1} - M_{12} \frac{di_2}{dt_1}. \end{cases} \quad (21)$$

Критерии подобия:

$$\pi_8^y = \frac{U_2}{i_2 R_2};$$

$$\pi_9^y = \frac{L_2}{R_2 t_1}; \pi_{10}^y = \frac{M_{24}}{R_2 t_1} \cdot \frac{i_4}{i_2}; \pi_{11}^y = \frac{L_4}{R_4 t_1}; \pi_{12}^y = \frac{M_{24}}{R_4 t_1} \cdot \frac{i_2}{i_4}; \pi_{13}^y = \frac{M_{12}}{R_1 t_1} \cdot \frac{i_2}{i_1}; \pi_{14}^y = \frac{M_{12}}{R_2 t_1} \cdot \frac{i_1}{i_2}.$$

Параметры трёх контуров:

$$U_2, e_{2M_{14}}, e_{2M_{12}}, i_1, i_2, i_4, R_2, R_4, L_2, L_4, L_1, M_{24}, M_{12}, t_2.$$

Получим одиннадцать критериев подобия:

$$\pi_8 = \frac{U_2}{i_2 R_2}; \pi_9 = \frac{L_2}{R_2 t_2}; \pi_{10} = \frac{M_{24}}{R_2 t_2}; \pi_{11} = \frac{i_4}{i_2}; \pi_{12} = \frac{L_4}{R_4 t_2};$$

$$\pi_{13} = \frac{M_{24}}{R_4 t_2}; \pi_{14} = \frac{i_2}{i_4}; \pi_{15} = \frac{M_{12}}{R_1 t_2}; \pi_{16} = \frac{i_2}{i_1}; \pi_{17} = \frac{M_{12}}{R_2 t_2}; \pi_{18} = \frac{i_1}{i_2}.$$

Критериальные уравнения для контуров:

$$\pi_8 = f_3(\pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{16}); \pi_{14} = f_4(\pi_{12}, \pi_{13}); \pi_{18} = f_5(\pi_{17}, \pi_{15}).$$

π_{11} эквивалентен π_{14} ; π_{16} эквивалентен π_{18} . В итоге получим критериальное уравнение для системы в цепи в момент времени включения выключателя SA2:

$$\pi_8 = f_3(\pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{13}, \pi_{12}, \pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{15}).$$

Полученные критерии подобия справедливы и для других цепей, со-

держащих взаимные индуктивности. Всякая разветвленная цепь, подобная другой разветвленной цепи, может быть составлена из подобных между собой контуров. Действующие в данной цепи напряжения при этом должны находиться в таких же соотношениях, какие имеются в цепи, подобной данной. При этом пропорциональное изменение значений напряжений данной цепи влияют на масштаб токов, не меняя подобия процессов.

Заключение

1. Разработаны критерия подобия акусто-магнитного аппарата, предназначенного для использования новых конструкций в гидропонных установках.

2. Произведен расчет электромагнитной составляющей акусто-магнитного аппарата, имеющей четыре взаимосвязанных контура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеккер И.И. Физическое моделирование электромагнитных механизмов.- М.: «Энергия», 1969.- 64 с.
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия / Изд. 2-е, доп. и переработан. Учеб. Пособие для вузов.- М.: «Высшая школа», 1973.- 296 с.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и переработан.- М.: «Высшая школа», 1976.- 479 с.

References

1. Pekker I.I. Fizicheskoe modelirovanie jelektromagnitnyh mehanizmov.- M.: «Jenergija», 1969.- 64 s.
2. Guhman A.A. Vvedenie v teoriju podobija / Izd. 2-e, dop. i pererabotan. Ucheb. Posobie dlja vtuzov.- M.: «Vysshaja shkola», 1973.- 296 s.
3. Venikov V.A. Teorija podobija i modelirovanija (primenitel'no k zadacham jelektrojenergetiki) / Ucheb.posobie dlja vuzov. Izd. 2-e, dop. i pererabotan.- M.: «Vysshaja shkola», 1976.- 479 s.