

Первому критерию при работе на воздухе удовлетворяют все три закона стабилизации. Однако при работе в воде только два из них (постоянство действующего потокосцепления и максимального напряжения на конденсаторе сброса) обеспечивают необходимую однозначность при настройке с начальной частоты, лежащей выше основного резонанса. Для закона стабилизации максимального значения напряжения на конденсаторе сброса имеются два близко расположенных резонансных пика, что сказывается на эффективности использования резонанса, в отличие от закона стабилизации действующего значения потокосцепления, при котором резонансный пик только один. Следовательно, первому критерию лучше удовлетворяет закон стабилизации действующего значения потокосцепления.

Второму критерию также предпочтительнее закон стабилизации потокосцепления. Менее эффективен закон стабилизации максимального напряжения на конденсаторе сброса.

Для оценки законов стабилизации по третьему критерию определим отношение среднего значения полос пропускания механических координат при работе в воде к среднему значению полос пропускания при работе на воздухе. В результате проведенных расчетов наименьшее отношение наблю-

дается при использовании закона стабилизации действующего потокосцепления.

Четвертый критерий можно рассматривать как критерий линейности системы – чем более система приближается к линейной, тем более симметричен резонансный пик относительно резонансной частоты. Сделать однозначный вывод по этому критерию не представляется возможным, поскольку в случае работы на воздухе наибольшая симметрия наблюдается при законе стабилизации максимального напряжения на конденсаторе сброса, а в случае работы в воде – действующего тока катушек. При законе стабилизации действующего потокосцепления резонансные пики в обеих средах несимметричны.

Пятый критерий применяется только при работе активатора на воздухе, по причине отсутствия побочных резонансов при работе в воде. Данному критерию лучше соответствуют законы стабилизации действующего значения тока катушек и максимального значения напряжения на конденсаторе сброса.

Принимая во внимание степень важности критериев, можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим для построения адаптивной поисковой системы автоматической настройки на резонанс является закон стабилизации действующего значения потокосцепления катушек ВЭМА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвитин А.И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Электрические молотки, вибраторы, быстросходный электромагнитный привод. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 144 с.

2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.: ил.

УДК 621.318.38

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ АКТИВАТОРОМ

Р.Ф. Бекишев, А.С. Глазырин, С.В. Цурпал

Томский политехнический университет
E-mail: EPATPU@mail2000.ru

Приведены основные требования, предъявляемые к системе автоматического управления вибрационным электромагнитным активатором. Представлена математическая модель системы управления с помощью которой, проведен анализ временных и частотных характеристик электромагнитного активатора при работе в различных средах.

Для снижения вязкости нефтепродуктов и химических жидкостей и суспензий применяют вибрационные электромагнитные активаторы (ВЭМА) с якорем специальной формы [1].

До последнего времени систем автоматического управления (САУ) вибрационными электромагнитными активаторами (ВЭМА) не существовало. Однако без САУ представляется затруднительным использо-

вать в полной мере все достоинства ВЭМА. Поэтому была поставлена задача разработки и исследования систем питания и автоматического управления ВЭМА.

Применение системы автоматического управления позволяет использовать все полезные свойства вибрационного электромагнитного активатора при работе в различных рабочих средах, в том числе при обработке высоковязких нефтепродуктов.

Приведём основные требования к разрабатываемой САУ ВЭМА [2, 3]. Система должна:

- настраиваться на максимальный КПД устройства; путь достижения – резонансный режим работы механической части с использованием дополнительной корректировки формы тока;
- настраиваться на максимальную полезную мощность, или, другими словами, на предельную амплитуду колебаний якоря – активатора;
- обеспечивать максимально возможный коэффициент мощности;
- обрабатывать аварийные ситуации, как в электрическом, так и в механическом контуре.

Одним из эффективных методов исследования САУ ВЭМА является математическое моделирование [4]. Математическая модель САУ ВЭМА включает в себя модель системы питания (силовой части САУ) и модель управляющей части САУ, рис. 1, 2.

Математическая модель САУ ВЭМА основана на системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_c(t) = U_{c,0} \sqrt{2} \sin(2\pi f_c t), \\ \Psi_K = f(U_c, frv, fpch, \delta, t), \\ i_K(\Psi_K, \delta) = \frac{H\left(\frac{\Psi_K}{w_K S_{МП}}\right) I_{МП} + \frac{\Psi_K}{w_K} R_M(\delta)}{2 \cdot w_K}, \\ F_{ЭМ}(\Psi_K) = \frac{\Psi_K^2}{w_K^2 S_{МП}^2 \mu_0}, \\ F_{ЭМ}(t) = m_\Sigma a(t) + R_{МЭХ(V(t))} V(t) + x(t) k_\Sigma, \\ x(t) = \delta_0 - \delta(t), \\ V(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \\ a(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}, \\ frv = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_k, a, t), \\ fpch = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_k, a, t), \end{array} \right. \quad (1)$$

где U_c – сетевое напряжение (здесь и далее все единицы физических величин в системе СИ), t – текущее время, $U_{c,0}$ и f_c – действующее значение и частота сетевого напряжения, Ψ_K – потокосцепление катушки, frv и $fpch$ – флаги состояний ключей преобразователей напряжения и частоты, δ – величина зазора магнитной цепи, i_K – ток катушки, $i_K(\Psi_K, \delta)$ – вебер-амперная характеристика катушки,

$B = \frac{\Psi_K}{w_K S_{МП}}$ – магнитная индукция, $H(B)$ – основная

кривая намагничивания стальных участков магнитной цепи ВЭМА, $F_{ЭМ}$ – электромагнитная сила, стягивающая зазор, определяемая по формуле Максвелла [5], k_Σ – суммарная жёсткость системы «пружина-стенка корпуса», δ_0 – величина магнитного зазора при неработающем ВЭМА (положение рав-

новесия), $x(t) = \delta_0 - \delta(t)$ – смещение якоря-активатора относительно положения равновесия,

$$V(t) = \frac{dx(t)}{dt} \text{ и } a(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \text{ – скорость и ускорение}$$

якоря-активатора, m_Σ – суммарная колеблющаяся масса, $R_{МЭХ(V(t))}$ – механическое сопротивление, U_0 – напряжение на выходе выпрямительного моста – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН₀, U_1 – напряжение на конденсаторе накопителя C_1 – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН₁, U_2 – напряжение на конденсаторе C_2 («ёмкость сброса») – сигнал обратной связи с датчика напряжения ДН₂, i_1 – ток дросселя преобразователя напряжения – сигнал обратной связи с датчика тока ДТ₁, $frv = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_k, a, t)$ и $fpch = f(U_0, U_1, U_2, i_1, i_k, a, t)$ – флаги состояния ключа преобразователя напряжения frv и состояния ключей преобразователя частоты $fpch$, которые как функции координат обратной связи и времени реализованы в САУ ВЭМА в соответствии с алгоритмом управления.

Математическая модель объекта управления (ВЭМА) включает в себя механический и магнитный контуры. Расчет механического контура рассмотрен в [6].

Силовая схема САУ ВЭМА состоит из преобразователей напряжения (рис. 1) и частоты (рис. 2). На схемах замещения используются следующие обозначения: $flag_{v1} = frv$ и $flag_{v23} = fpch$ – флаги состояний ключей преобразователей напряжения и частоты (1 – включен, 0 – выключен), L_{1TV} , L_{2TV} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток развязывающего трансформатора, M_{12TV} – взаимная индуктивность между обмотками трансформатора, R_{1TV} , R_{2TV} – омические сопротивления обмоток, $R_{\mu TV}$ – эквивалентное сопротивление потерь в стали трансформатора TV1, $R_{дн0}$, $R_{дн1}$, $R_{дн2}$, $R_{дт1}$, $R_{дт2}$ – сопротивления датчиков напряжения и тока, i_{ymv} , i_{ymd} – токи утечек транзисторных ключей и диодов, U_{vt} – падение напряжения на открытом транзисторном ключе, U_{vd} – падение напряжения на открытом диоде, $M_{к12}$, $M_{к34}$, $M_{к56}$ – взаимные индуктивности и $R_{к1}$ – $R_{к6}$ – омические сопротивления катушек ВЭМА, $L_{к1}$ – $L_{к6}$ – индуктивности рассеяния катушек ВЭМА, L_1 и R_1 – индуктивность и сопротивление дросселя регулятора напряжения, $U_{пит}$ – напряжение на входе мостового выпрямителя, U_{C1} – напряжение на накопителе C_1 , $R_{нц}$ – эквивалентное сопротивление потерь в стали ВЭМА (при параллельном включении катушек), определяемое как [7]

$$R_{нц} = \frac{16 \rho_c w_k^2 S_{мп}}{l_{мп} \delta_l^2}, \quad (2)$$

где ρ_c – удельное электрическое сопротивление листовой стали магнитопровода, $S_{мп}$ – площадь его поперечного сечения, w_k – число витков катушки, $l_{мп}$ – общая длина стальных участков и δ_l – толщина листов стали магнитопровода.

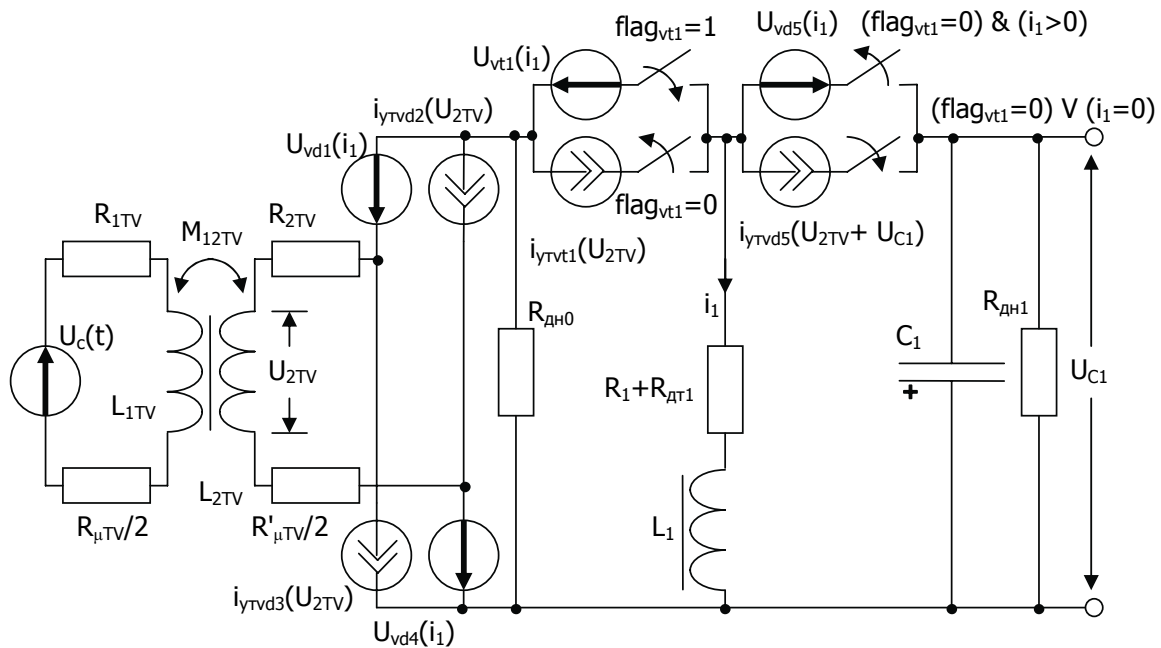


Рис. 1. Схема замещения силовой части САУ ВЭМА. Преобразователь напряжения

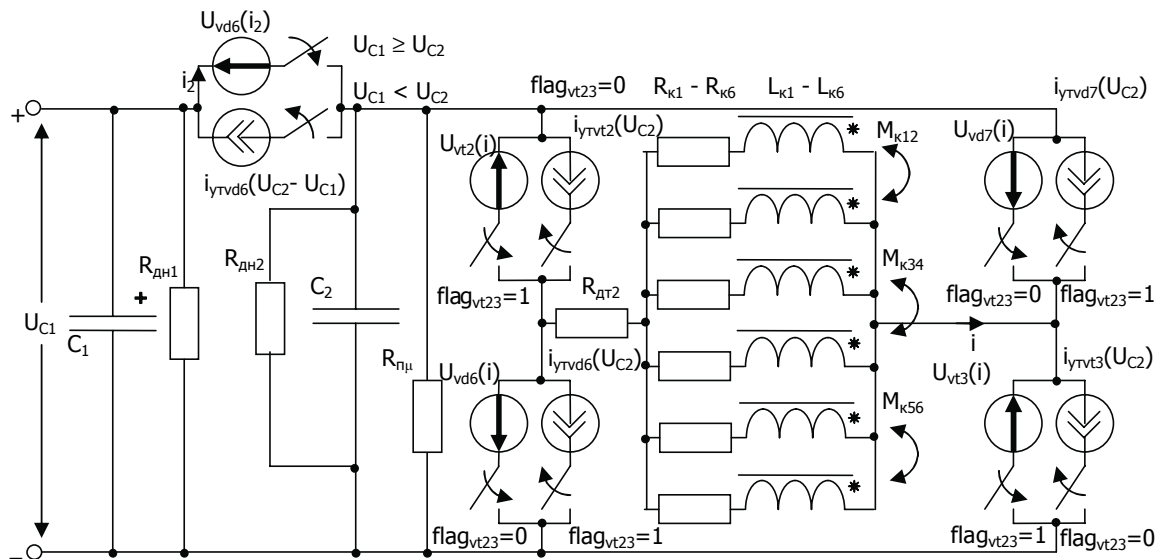


Рис. 2. Схема замещения силовой части САУ ВЭМА. Преобразователь частоты

Вынуждающая колебания электромагнитная сила определяется:

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{\Psi_K^2}{w_K^2 S_{\text{МП}} \mu_0}, \quad (3)$$

где: μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Уравнение равновесия механического контура ВЭМА:

$$F_{\text{ЭМ}}(t) = m_{\Sigma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + R_{\text{МЕХ}}(v(t)) \frac{dx(t)}{dt} + x(t)k_{\Sigma}. \quad (4)$$

Математическая модель системы питания и управления ВЭМА имеет допущения:

- все якоря-активаторы колеблются синхронно вследствие конструктивной идентичности колебательных каналов,
 - ключи преобразователя частоты работают синхронно,
 - потери в стали вынесены в электрический контур и учитываются эквивалентным сопротивлением $R_{\text{нл}}$.
- Для интегрирования дифференциальных уравнений, входящих в систему (1), применён метод Рунге-Кутта второго порядка [8]. Шаг интегрирования определяется, исходя из постоянного времени механического и электрического контура ВЭМА.

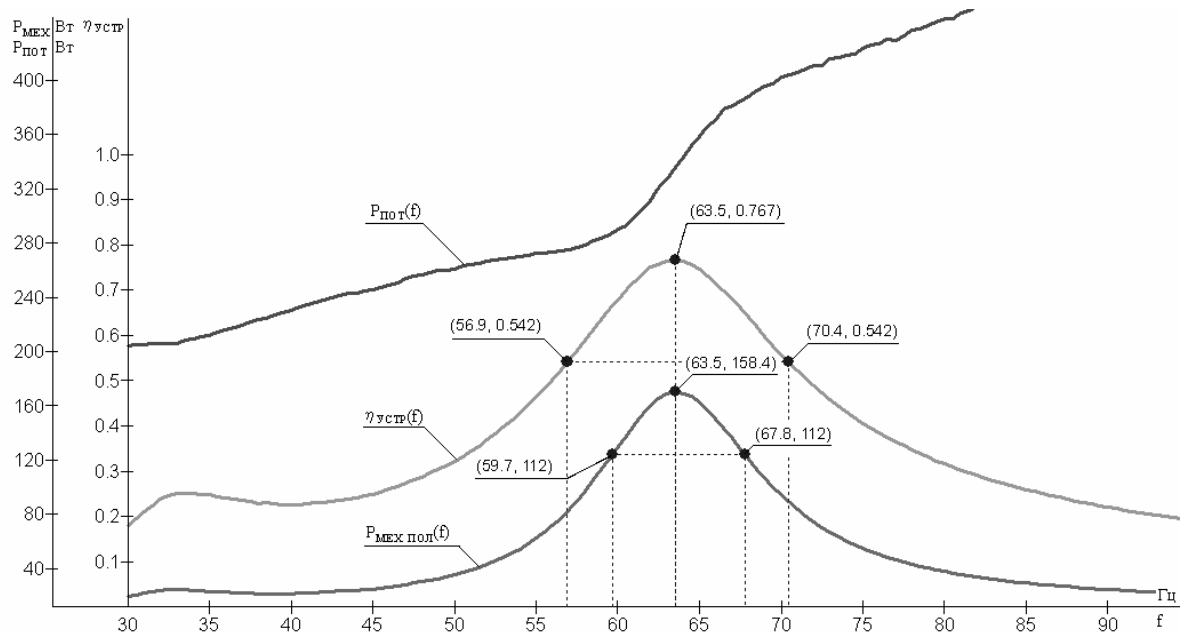


Рис. 3. Энергетические координаты ВЭМА в функции частоты

Для моделирования процессов в САУ ВЭМА разработан прикладной программный продукт, позволяющий получать и анализировать временные и частотные характеристики при работе САУ.

Согласно полученным энергетическим характеристикам в диапазоне частот от 30 до 70 Гц наблюдается максимум КПД $\eta_{\text{устр}} = 0,77$.

Таким образом, разработанная математическая модель САУ ВЭМА позволяет получать и анализировать временные и частотные характеристики при работе активатора в различных рабочих средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2128547 РФ. МПК В01F 11/00, 13/08. Виброструйный перемешиватель и разжижитель жидкостей и суспензий / С.П. Гузев, В.А. Данекер, С.В. Рикконен, А.К. Хорьков. – Оpub. в Б.И. № 10, 1999.
2. Глазырин А.С., Данекер В.А., Доленко В.В., Саидов В.С. Разработка системы управления виброструйным электромеханическим преобразователем // Технология и автоматизация атомной энергетики: Матер. регион. научно-техн. конф. – Северск, 2001. – С. 22–24.
3. Глазырин А.С., Бекишев Р.Ф. Система управления виброструйным электромеханическим преобразователем // Проблемы развития автоматизированного электропривода промышленных установок: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Новокузнецк, 2002. – С. 48–50.
4. Глазырин А.С., Данекер В.А., Доленко В.В., Саидов В.С. Математическая модель виброструйного электромеханического преобразователя // Технология и автоматизация атомной энергетики: Матер. регион. научно-техн. конф. – Северск, 2001. – С. 19–21.
5. Гарнин А.Ю., Силаева Е.В., Шлегель О.А., Попенко В.Н. Расчёт тягового усилия электромагнита постоянного тока // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 55–57.
6. Глазырин А.С., Данекер В.А., Кособуцкий А.А. Свободно-вынужденные колебания в механической системе виброструйного электропривода на резонансной частоте // Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение: Труды V Междунар. конф. МКЭЭЭ-2003. Ч. I. Крым. – Алушта, 2003. – С. 786–789.
7. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчёт импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия, 1980. – 112 с.
8. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 632 с.