

М.8.О.Экспериментальное исследование колебательных процессов в электрической модели теплогидравлической системы.

И.А.Золотухин

Московский энергетический институт (Технический университет)Каф. теоретических основ электротехники

В последнее время актуальными становятся проблемы диагностики теплового гидравлического оборудования электростанций. В теплогидравлических контурах электростанций (в том числе атомных) могут возникать различные колебательные явления, которые приводят к авариям, и подобные аварии уже имели место в мировой практике. В системах такого типа возможно возникновение всего многообразия колебаний, в том числе параметрических, феррорезонансных и хаотических. Одним из механизмов развития опасных явлений является параметрический механизм, который возникает за счет того, что рабочее оборудование, системы охлаждения и другие компоненты постоянно, в том числе и при правильном режиме работы подвержены вибрациям со стороны вращающихся механизмов (насосы, турбины, генератор и др.) и перекачиваемой рабочей среды. Следует отметить, что теплогидравлические системы имеют высокую добротность.

Процессы, происходящие в теплогидравлических системах, описываются теми же дифференциальными уравнениями, которые используются в электротехнике. Разработана методика, позволяющая моделировать гидравлические параметры с помощью электрических аналогов (табл.1).

Таблица 1.Аналогия между гидравлическими и электрическими величинами.

Гидравлические параметры		Электрические параметры	
Название	Обозначение	Название	Обозначение
Объемная скорость потока	W_v	Сила тока	i
Перепад давления	Δp	Напряжение	u
Акустическое сопротивление	R	Активное сопротивление	R
Акустическая масса	m	Индуктивность	L
Акустическая податливость объема	C	Емкость	C

В представленной таблице акустическая масса среды (электрический аналог – индуктивность) характеризует инерционность гидравлической среды. Этот параметр зависит от плотности среды и геометрических характеристик объекта. Акустическая податливость объема (электрический аналог – емкость) характеризует способность среды сжиматься и зависит от скорости звука в данной среде при данных параметрах (давление и температура и пр.) Акустическое сопротивление (аналог – активное сопротивление) характеризует все виды потерь, возникающих в гидравлической системе.

Таким образом, теплогидравлические системы моделируются с помощью электрических схем. Данный подход имеет множество достоинств, главными из которых являются

изученность электрических явлений и отработанная методика решения электротехнических задач. Кроме этого, при проведении экспериментов на электрической модели измеряемые величины могут быть определены с большой точностью.

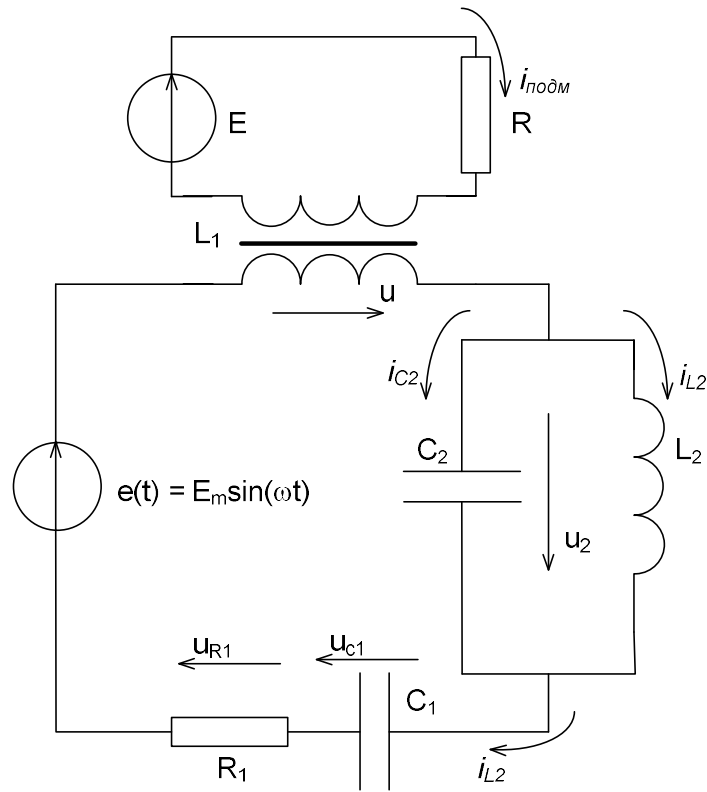


Рис.1 Двухконтурная электрическая модель энергетической установки.

В работе исследовалась электрическая цепь (рис.1), представляющая собой упрощенную схемную модель теплогидравлического контура энергетической установки. Катушка индуктивности L_1 имеет ферритовый тороидальный сердечник и две обмотки. Вебер-амперная характеристика катушки L_1 исследовалась экспериментально с помощью осциллографа и представлена на рис.2. Характеристика намагничивания может быть аппроксимирована следующим образом:

$$i(\psi) = a \cdot \psi + b \cdot \psi^2 + c \cdot \psi^3. \tag{1}$$

Параллельный L-C контур является высокочастотным, в то время как последовательно соединенные нелинейная катушка индуктивности L_1 и емкость C_1 имеют меньшую резонансную частоту.

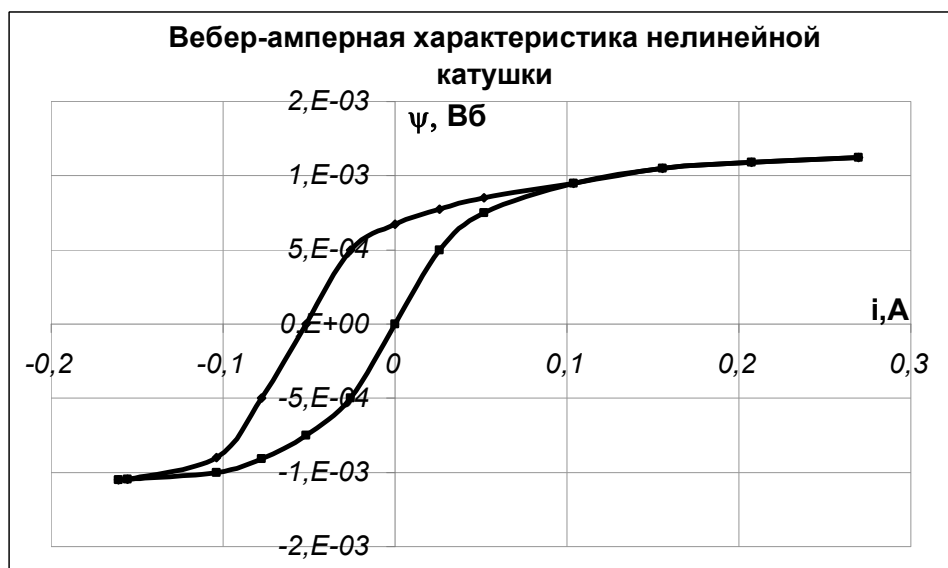


Рис.2. Вебер-амперная характеристика нелинейной катушки.

В ходе многочисленных экспериментов было выявлено, что в системе могут возникать субгармонические и хаотические колебания. Основной целью экспериментальных исследований было определение резонансных частот, определение области возбуждения субгармонических и хаотических колебаний, а также анализ механизма возникновения хаотических колебаний в рассматриваемой электрической системе.

При проведении эксперимента использовался звуковой генератор ГЗ-109, генератор постоянного тока, цифровой вольтметр В7-38, осциллограф С1-67, а также измерительный комплекс NI ELVIS, подключенный к ПК и разработанный фирмой National Instruments. Измерительный комплекс NI ELVIS (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite) выполняет функции вольтметра (постоянного и переменного тока), амперметра (постоянного и переменного тока), омметра, прибора для измерения емкости и индуктивности, а также двулучевого осциллографа. NI ELVIS имеет встроенные регулируемые источники питания как постоянного, так и синусоидального тока, генератор импульсов несинусоидальной формы (меандр, треугольник) и генератор сигналов произвольной формы, монтажную панель и различные разъемы для подключения к другим устройствам. Данный комплекс позволяет работать с аналоговыми сигналами, обеспечивая частоту дискретизации до 1 Мбит/сек. Таким образом, NI ELVIS предоставляет очень широкие возможности для проведения различных экспериментов.

Для определения резонансных частот системы была произведена серия экспериментов и построена частотная характеристика системы (рис.3). При небольшом напряжении генератора $e(t)$ была снята зависимость напряжения на измерительном резисторе $R_1 = 1$ Ом от частоты питания. При частотах $f_{01} = 0,45-0,50$ кГц и $f_{02} = 3,8-4,5$ кГц в системе наблюдается два резонанса напряжений. Сопротивление системы при резонансе напряжения наименьшее, а значит величина тока – наибольшая. При $f_{11} = 1,90$ кГц в системе наблюдается резонанс токов, и напряжение U_{R1} имеет минимальное значение. Характеристика снималась без подмагничивания и при токе подмагничивания 150 мА и 230 мА. При увеличении тока подмагничивания происходит смещение второй резонансной частоты в сторону больших частот. При этом первая резонансная частота и частота, при которой происходит резонанс токов, остается неизменной. Если увеличивать напряжение при неизменной величине тока подмагничивания, что вторая резонансная частота смещается в сторону меньших частот. Это является следствием нелинейности системы.

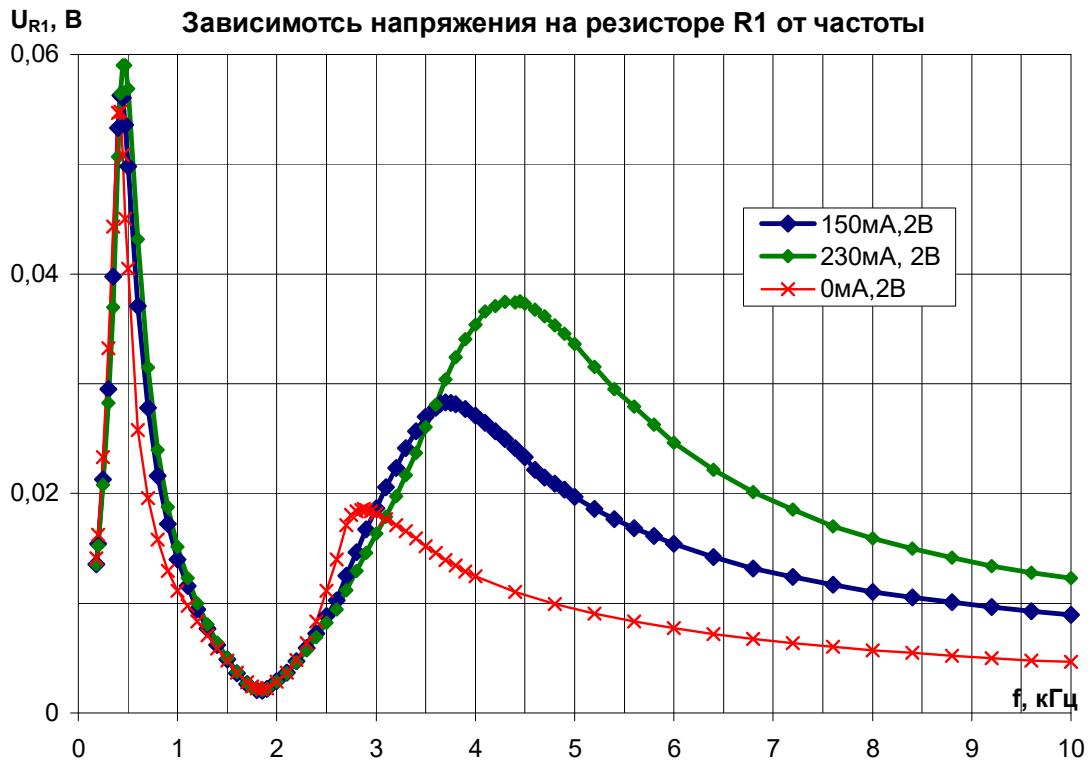


Рис.3 Частотная характеристика системы

Эксперименты по определению областей возбуждения субгармонических и хаотических колебаний проводились в следующей последовательности. Задавалась частота переменного напряжения генератора, а также ток подмагничивания в обмотке нелинейной катушки индуктивности $L1$. Напряжение генератора плавно увеличивалось. На экране осциллографа наблюдалась временная зависимость напряжения на емкости $C1$. По виду осциллограммы напряжения на емкости $C1$ определялся режим работы системы. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

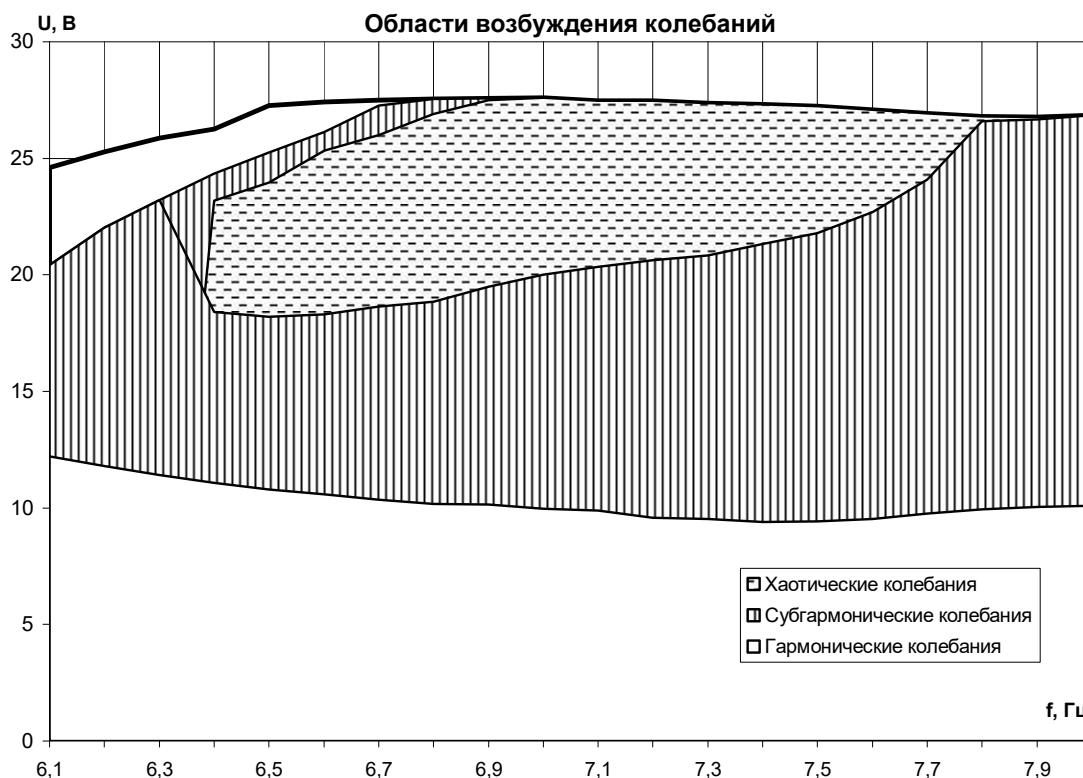


Рис.4 Области возбуждения колебаний.

В данной системе механизмом перехода к сложным неупорядоченным хаотическим колебаниям является механизм перекрытия резонансов. В нелинейных системах вид колебаний зависит не только от частоты, но и от напряжения. При небольших напряжениях источника питания, систему можно условно считать линейной, поэтому напряжение на емкости C_1 имеет синусоидальную форму. При увеличении напряжения генератора в системе возникают комбинационные (субгармонические) колебания. При этом в спектре колебаний присутствуют вторая и третья гармоники. В дальнейшем, при последующем увеличении напряжения генератора субгармонические колебания переходят в хаос. Это объясняется тем, что при данных условиях появляются еще и феррорезонансные колебания, которые, накладываясь на комбинационные колебания, срывают их. Затем опять возникают субгармонические колебания, на которые накладываются феррорезонансные колебания и т.д. Пример хаотических колебаний приведен на рис.5. Отметим, что область хаотических колебаний является замкнутой сверху.

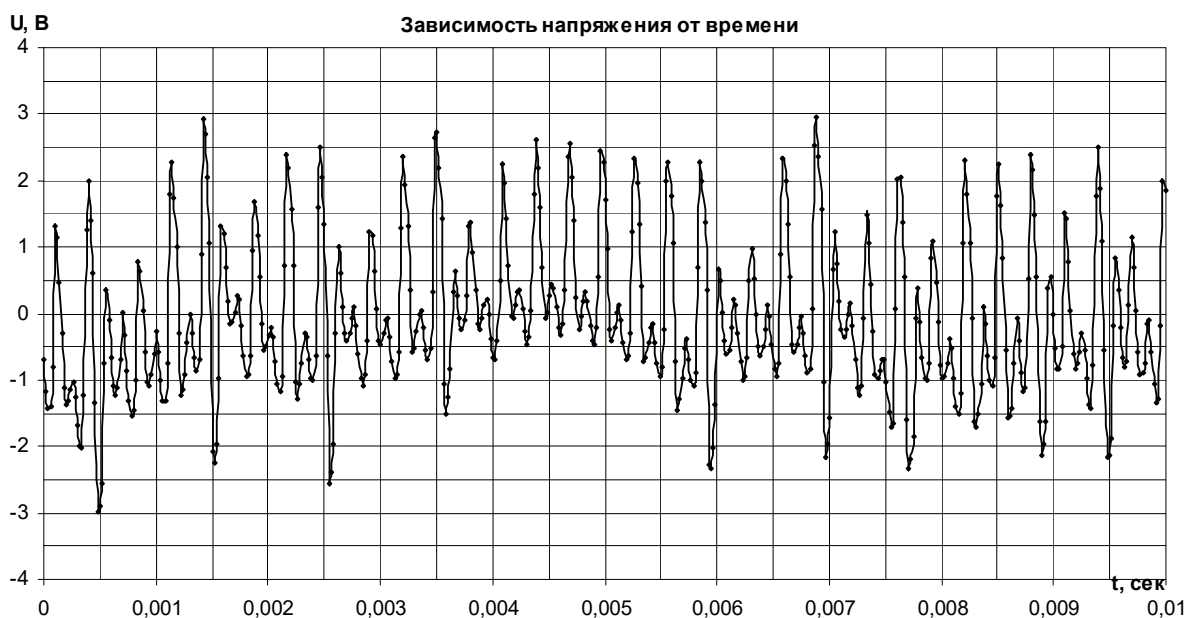


Рис.5. Хаотические колебания

Область субгармонических колебаний также замкнута сверху. Ввиду сильной нелинейности при некотором значении напряжения источника форма напряжения на генераторе искажается, и дальнейшее исследование системы становится нецелесообразным.

Таким образом, в результате работы была построена частотная характеристика системы, определены ее резонансные частоты, были установлены области возбуждения комбинационных и хаотических колебаний. Отмечено, что они замкнуты сверху.

Литература

1. **Аварии и инциденты** на атомных электростанциях. Учебное пособие под общей редакцией д.ф.-м.н., профессора С.П.Соловьева. – Обнинск, ИАТЭ, 1992 – 300с. стр. 35-50.
2. **Проскуряков. К.Н.** Использование виброакустических шумов для диагностики процессов в АЭС. – М.: МЭИ, 1999. 68с.
3. **Магницкий Н.А., Сидоров С.В.** Новые методы хаотической динамики. –М.: Едиториал УРСС, 2004 – 318с.
4. **Автоматизация** физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций)/ Под ред. Бутырина П.А. – М.: ДМК-Пресс, 2005. 264 с.