

Метод электронно-гидравлических аналогий

КУРС ЛЕКЦИЙ

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

RAZUMDOM



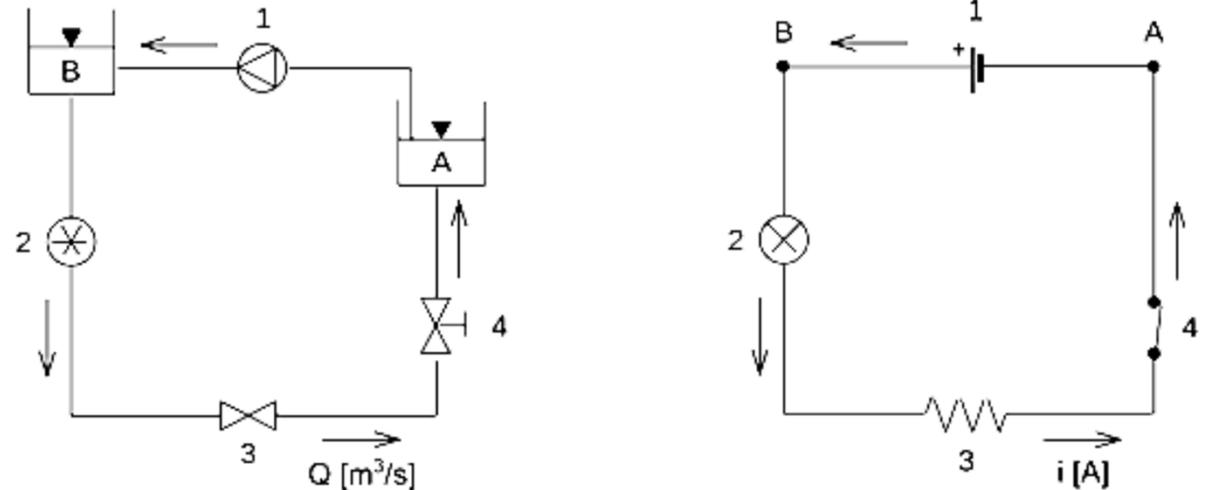
Метод электронно-гидравлических аналогий

1. Электронно-гидравлические аналогии
2. Модель тока, напряжения
3. Модель резистора, конденсатора, дросселя
4. Модель диода, транзистора
5. Модель трансформатора
6. Основные эквиваленты
7. Пределы аналогии

Электронно-гидравлические аналогии

Электронно-гидравлические аналогии - это представление электронных схем гидравлическими цепями. Поскольку электрический ток невидим, а процессы, происходящие в электронике, часто трудно продемонстрировать, различные электронные компоненты представлены гидравлическими эквивалентами. Первоначально под электричеством (а также теплом) понималась разновидность жидкости, и названия определенных электрических величин (таких как ток) происходят от гидравлических эквивалентов.

На основе этой аналогии Йохан ван Вин разработал примерно в 1937 году метод вычисления приливных течений с помощью электрического аналога.



Уравнения

Уравнения, связывающие электрические параметры, переходят в соотношения, на основе которых можно составлять гидродинамические цепи и анализировать их теми же методами, что и электрические цепи.

Дифференциальные уравнения, описывающие взаимозависимость электрических параметров в длинной линии с распределенными параметрами:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L \frac{\partial I}{\partial t} + RI$$

$$-\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{C} \frac{\partial I}{\partial x}$$

где
 U — напряжение;
 I — сила тока;
 L, R, C — индуктивность участка цепи, активное сопротивление и ёмкость;
 t — время;
 x — координата.

Система уравнений для потока жидкости в трубе имеет похожий вид:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\rho_0}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2a}{S} Q$$

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\rho_0 c^2}{S} \frac{\partial Q}{\partial x}$$

где
 Q — объёмный расход;
 S — площадь поперечного сечения трубы;
 P — давление;
 c — скорость звука;
 ρ — плотность жидкости;
 a — параметр трения.

Уравнения для длинной электрической линии и для трубы с потоком жидкости идентичны, а их физические величины подобны друг другу:

Трубопроводная линия	Давление p	Расход Q	$\frac{2a}{S}$	$\frac{S}{\rho_0 c^2}$	$\frac{\rho_0}{S}$
Электрическая линия	Напряжение U	Сила тока I	Активное сопротивление R	Ёмкость C	Индуктивность L

Модель тока и напряжения

- Напряжение U представляется как **давление жидкости p**
- Сила тока I представляется как **Расход Q** , т.е. как поток жидкости.

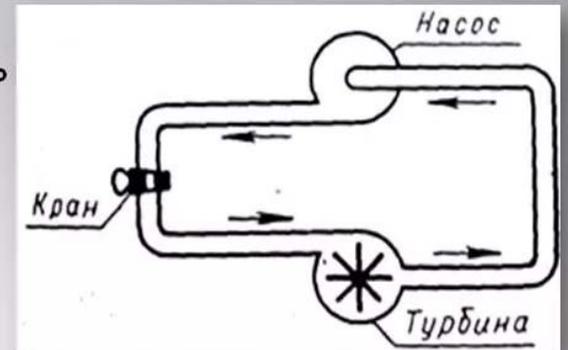
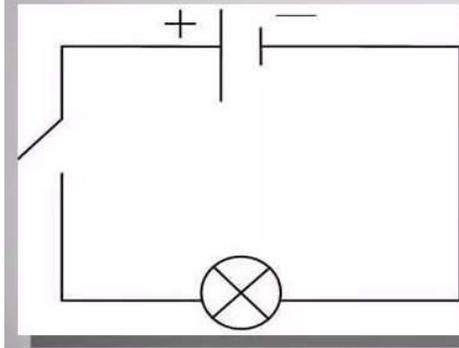
В общем, электрический потенциал эквивалентен гидравлическому напору. В этой модели предполагается, что вода течет горизонтально, так что силой тяжести можно пренебречь. В этом случае **электрический потенциал эквивалентен давлению. Напряжение** (или падение напряжения или разность потенциалов) - это разница в давлении между двумя точками. Электрический потенциал и напряжение обычно измеряются в вольтах.

- **Электрический ток** эквивалентен гидравлическому объемному **расходу**; то есть объемному количеству текущей воды с течением времени. Обычно измеряется в амперах.

Аналогия с гидродинамической системой

Турбина \Leftrightarrow потребитель

Насос \Leftrightarrow источник тока

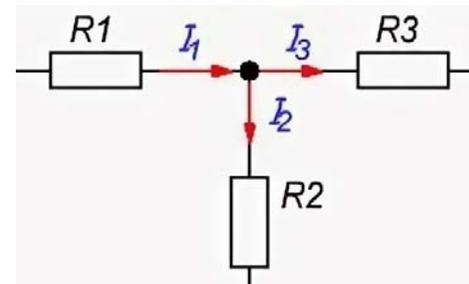
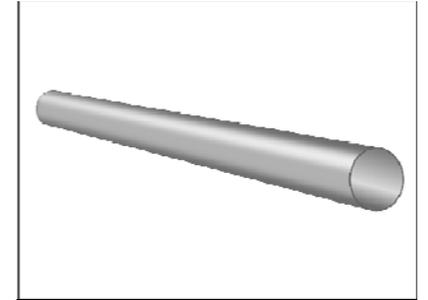


Трубки с водой \Leftrightarrow соединительные провода

Кран \Leftrightarrow выключатель

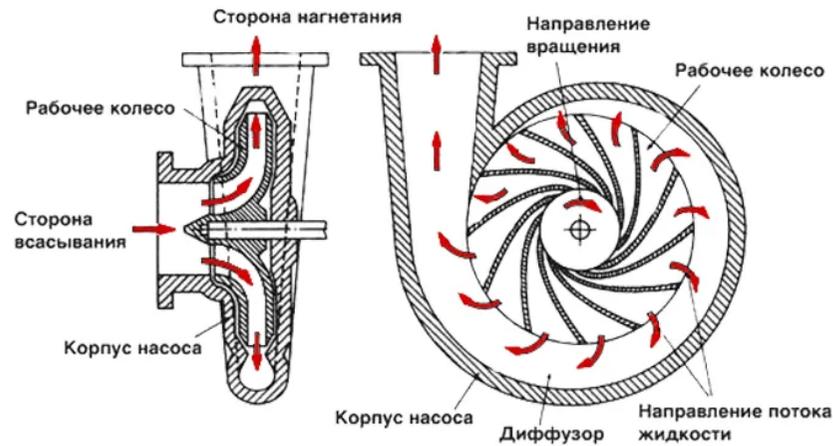
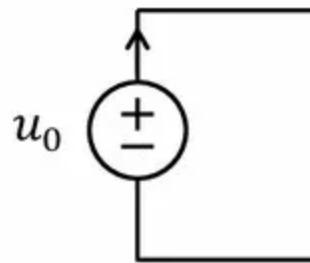
Модель тока и напряжения

- Единица **электрического заряда** аналогична единице **объема воды**.
- **Электрический провод** представляется как **труба или шланг**.
- Относительно широкий **шланг**, полностью заполненный водой, эквивалентен **токопроводящему проводу**.
- Жестко установленная **труба** эквивалентна **трассировке** на печатной плате.
- **Подключение** одного конца провода к электрической цепи эквивалентно **снятию крышки** с одного конца шланга и **присоединению** его к другому.
- **Электрический выключатель** представляется как **вентиль или кран**, закрывающий гидравлический поток.
- **Узел** в правиле соединения Кирхгофа - это **тройник** для трубы, заполненный текущей водой.



Модель источника напряжения и тока

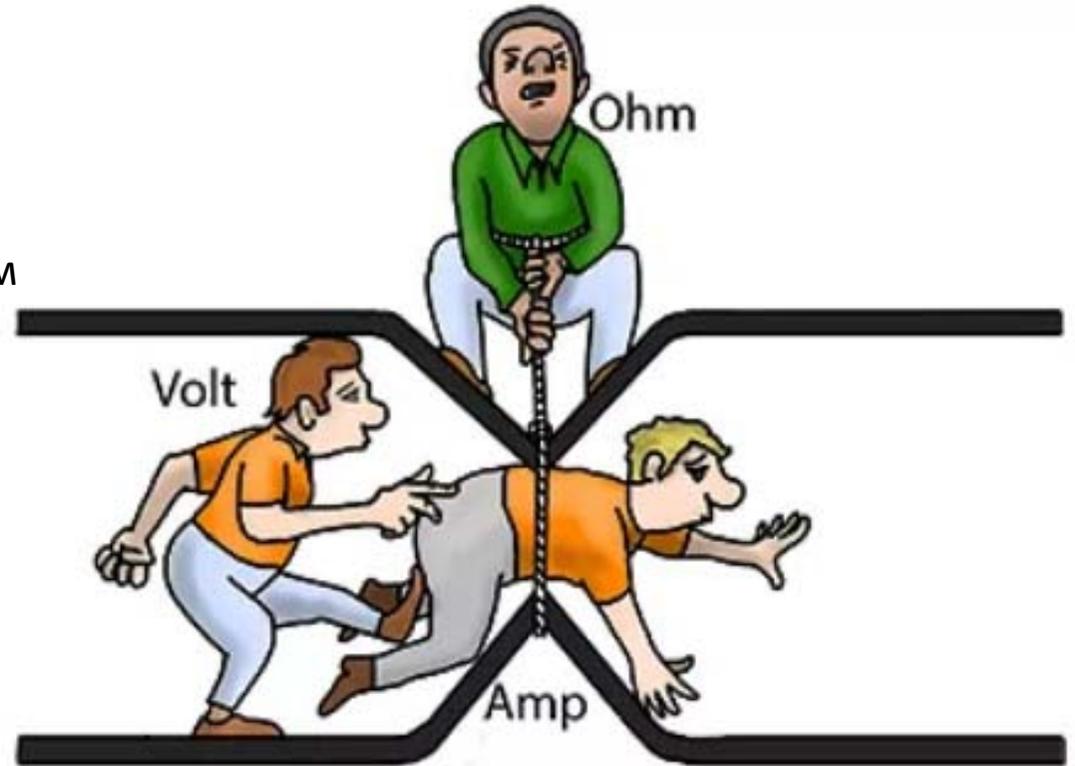
Идеальный **источник напряжения** (идеальная батарея) или идеальный **источник тока** - это **динамический насос** с обратной связью. Измеритель давления с обеих сторон показывает, что независимо от вырабатываемого тока этот тип насоса обеспечивает постоянную разницу давлений. Если один терминал закреплен на земле, другой аналогией является большой водоем на большой высоте, достаточно большой, чтобы забираемая вода не влияла на уровень воды. Чтобы создать аналог идеального источника тока, используйте объемный насос: измеритель тока (маленькое лопастное колесо) показывает, что когда насос такого типа приводится в действие с постоянной скоростью, он поддерживает постоянную скорость маленького лопастного колеса.



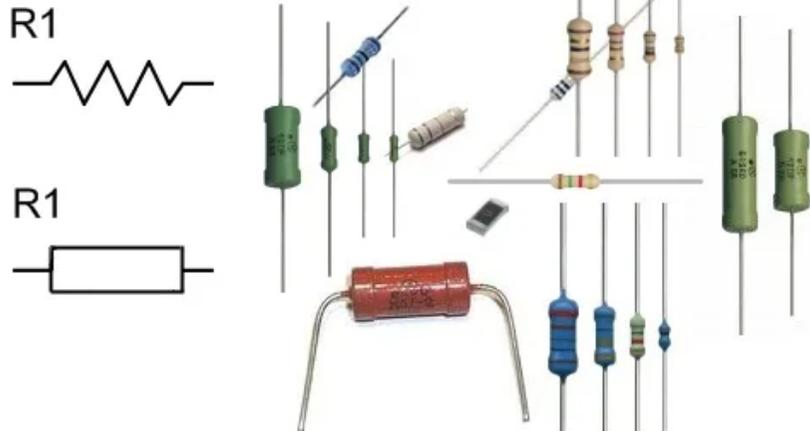
Модель резистора

Резистор (сопротивление) представляется в виде резкого сужения трубы или решетки, плотность ячеек которой аналогична сопротивлению.

Резистор эквивалентен сужению отверстия трубы, при котором требуется большее давление для пропуска того же количества воды. Все трубы обладают некоторым сопротивлением потоку, точно так же, как все провода и контакты обладают некоторым сопротивлением току.

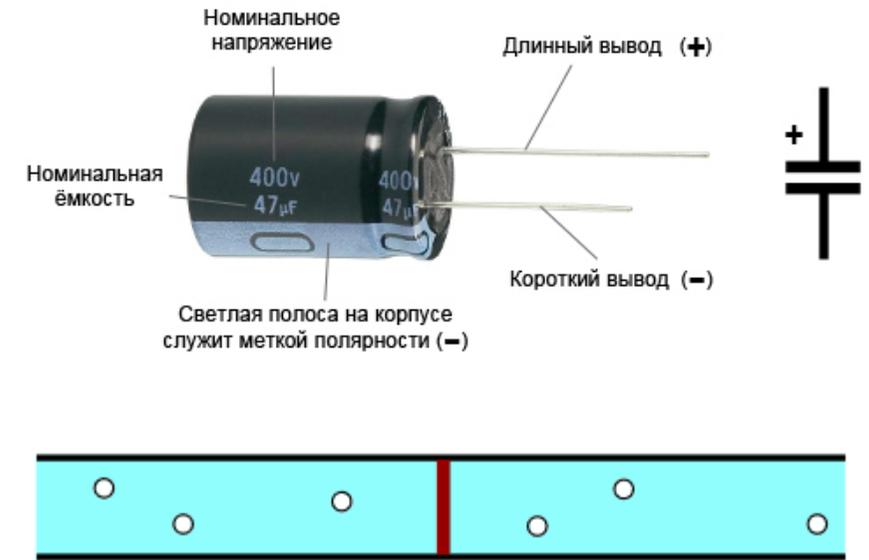


Постоянные резисторы



Модель конденсатора

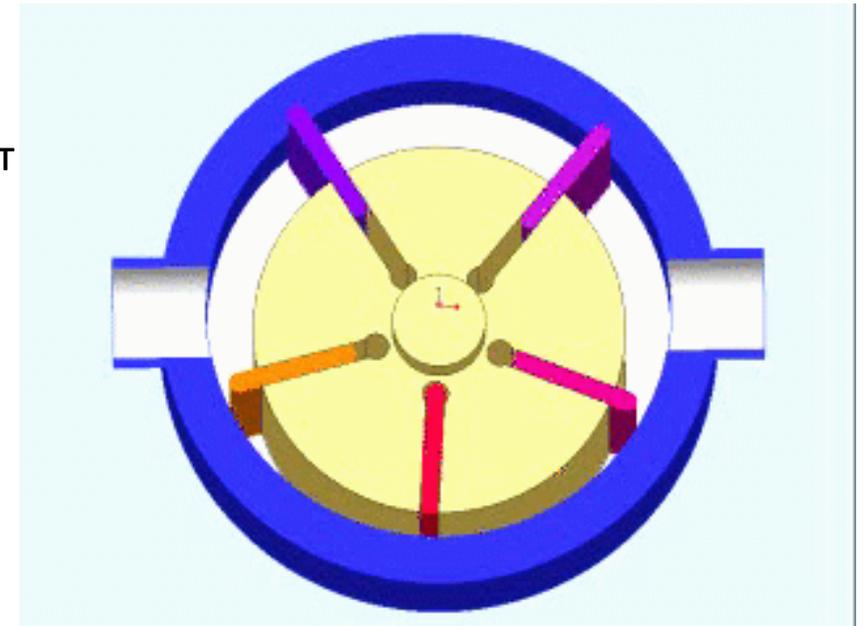
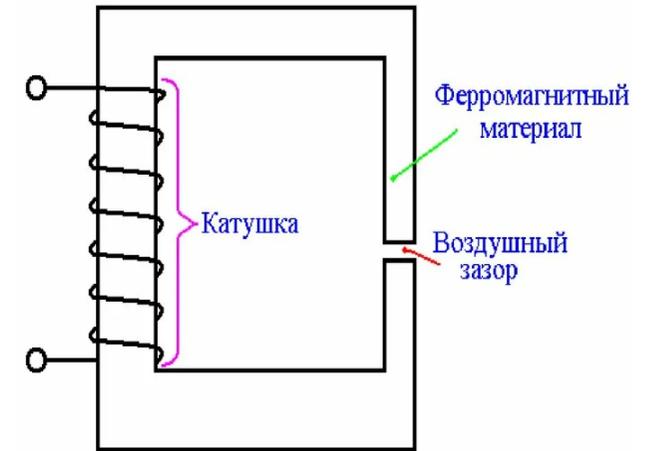
- **Конденсатор (емкость)** - это гибкая растяжимая упругая мембрана, вставленная и перекрывающая трубу. Энергия заряда, накопленная конденсатором - аналогична энергии, накопленной мембраной при растяжении. Анимация демонстрирует мембрану, которая растягивается и сокращается под действием потока воды, что аналогично заряду и разряду конденсатора под действием электрического тока.



- **Конденсатор** эквивалентен резервуару с одним соединением на каждом конце и резиновой перегородкой, разделяющей резервуар надвое по длине (гидравлический аккумулятор). Когда вода нагнетается в одну трубу, из другой трубы одновременно вытесняется столько же воды, но вода не может проникнуть через резиновую мембрану. Энергия накапливается за счет растяжения резины. По мере того, как больше тока протекает "через" конденсатор, противодействие (напряжение) становится больше, таким образом, ток "опережает" напряжение в конденсаторе. По мере того, как противодействие от растянутой резины приближается к приложенному давлению, ток становится все меньше и меньше. Таким образом, конденсаторы "отфильтровывают" постоянные перепады давления и медленно меняющиеся низкочастотные перепады давления, позволяя при этом пропускать быстрые изменения давления.

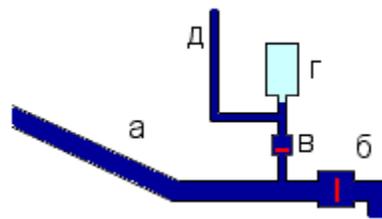
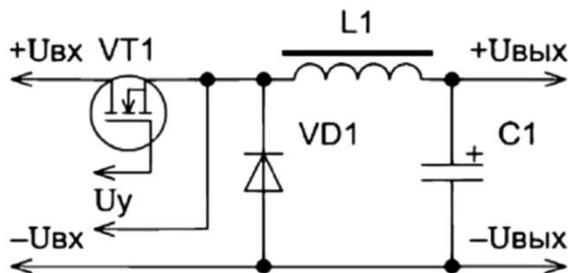
Модель дросселя

Катушка (индуктивность), Дроссель эквивалентен тяжелому барабану с лопастями, раскручиваемому потоком или роторно-лопастному насосу с тяжелым ротором, помещенным в поток. Масса ротора и площадь поверхности лопастей ограничивают способность воды быстро изменять скорость потока (тока) через насос из-за воздействия инерции, но со временем постоянный поток будет проходить в основном беспрепятственно через насос, поскольку ротор вращается с той же скоростью, что и поток воды. Масса ротора и площадь поверхности его лопастей аналогичны индуктивности, а трение между его осью и подшипниками оси соответствует сопротивлению, которое сопровождает любой не сверхпроводящий индуктивный элемент. Энергия магнитного поля катушки эквивалентна кинетической энергии, запасенной во вращении барабана.

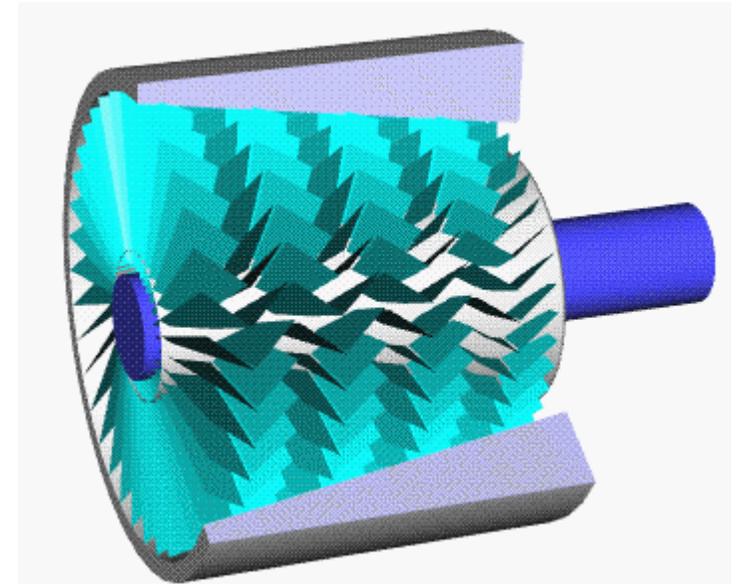
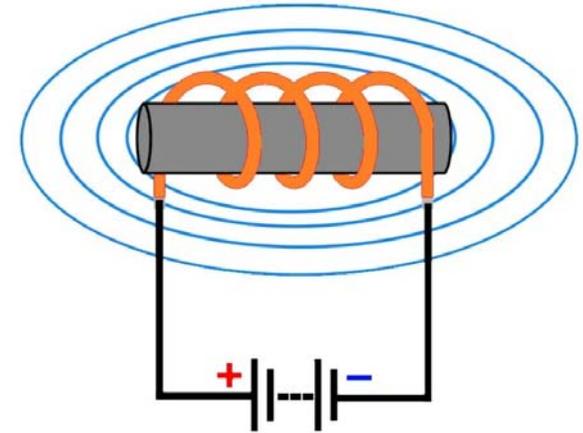


Модель индуктивной катушки

Альтернативная модель индуктора представляет собой просто длинную трубу, возможно, для удобства свернутую в спираль. Это устройство для инерции жидкости используется в реальной жизни как важный компонент гидравлического тарана (гидротаранный насос). Инерция воды, текущей по трубе, создает эффект индуктивности; катушки индуктивности "отфильтровывают" быстрые изменения расхода, позволяя пропускать медленные изменения тока. Сопротивление, создаваемое стенками трубы, в чем-то аналогично паразитному сопротивлению. В любой модели разница давлений (напряжение) на устройстве должна присутствовать до того, как ток начнет двигаться, таким образом, в катушках индуктивности напряжение "опережает" ток. По мере увеличения тока, приближающегося к пределам, налагаемым собственным внутренним трением и током, который может обеспечить остальная часть контура, падение давления в устройстве становится все ниже и ниже.



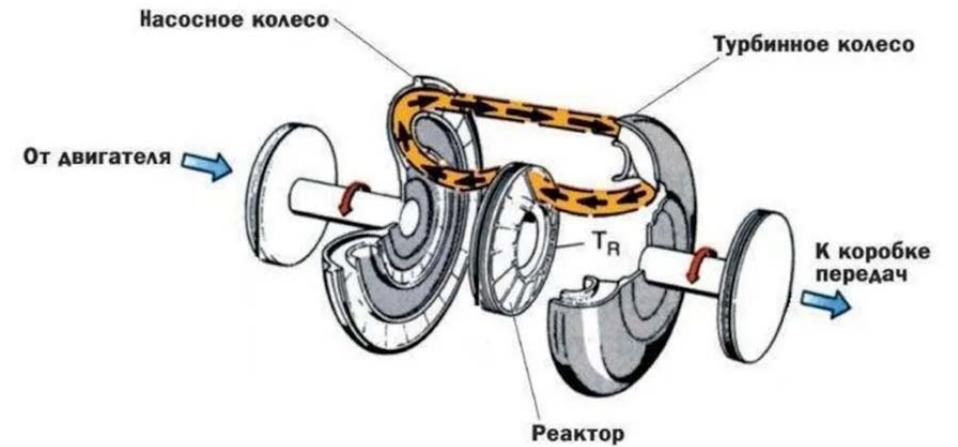
Гидротаранный насос состоит из: питающей трубы (а); отбойного клапана (б); возвратного клапана (в); воздушного колпака (г); отводящей трубы (д)



Модель трансформатора

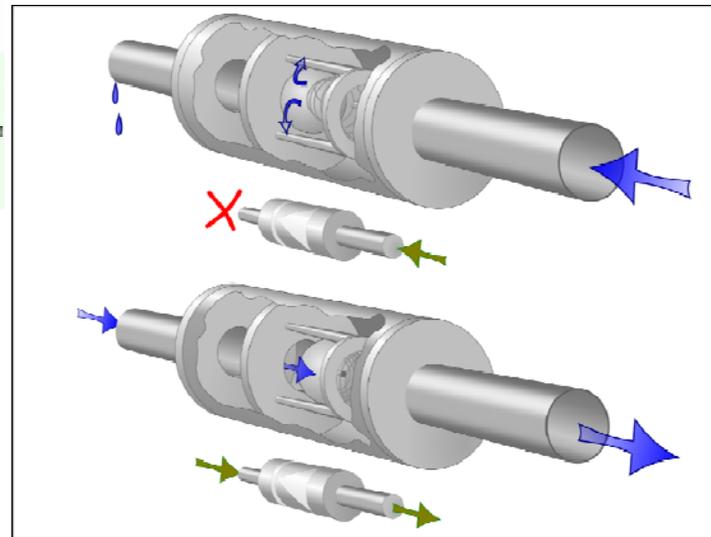
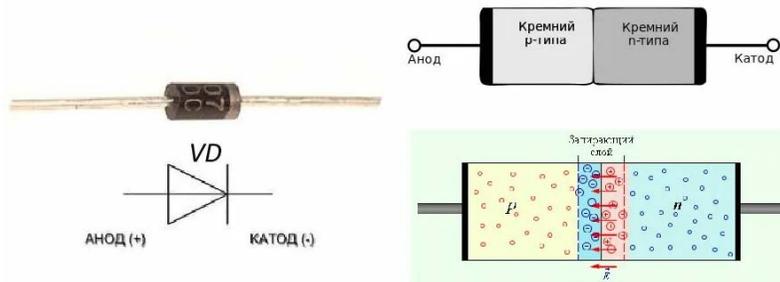
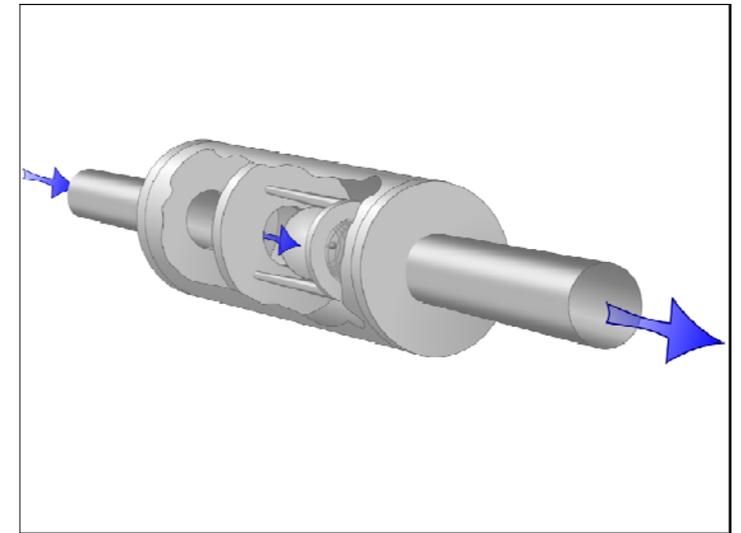
Трансформатор. Переменный ток в первой катушке создаёт в стальном сердечнике переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле пронизывает другую катушку, называемую вторичной, и создаёт в ней переменный индукционный ток.

Аналогом может являться **гидравлический трансформатор** - гидродинамическая передача, преобразующая передаваемый крутящий момент по величине, а иногда по направлению.

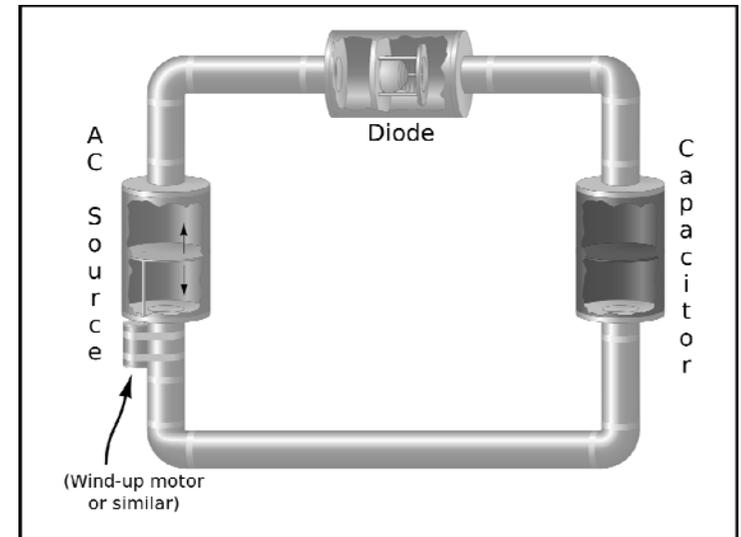


Модель выпрямительного диода

Выпрямительный диод пропускает электрический ток в одном направлении – т.е. открывается. В обратном направлении диод не пропускает электрический ток – т.е. запирается. Диод эквивалентен одностороннему обратному клапану со слегка протекающим седлом клапана. Как и в случае с диодом, перед открытием клапана необходим небольшой перепад давления.



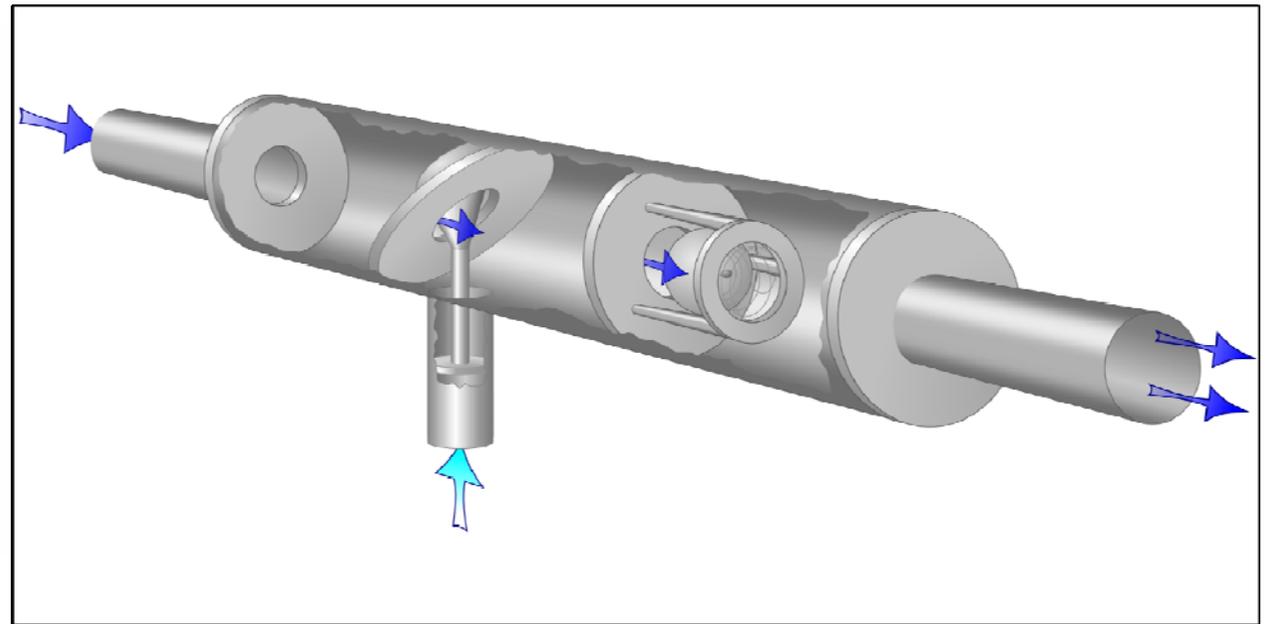
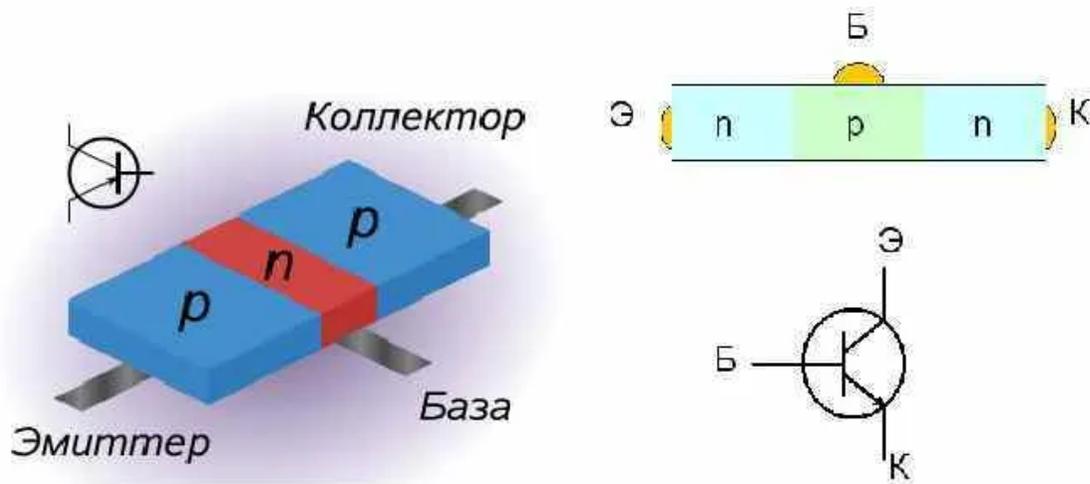
И, как и в случае с диодом, слишком сильное обратное смещение может повредить или разрушить узел клапана.



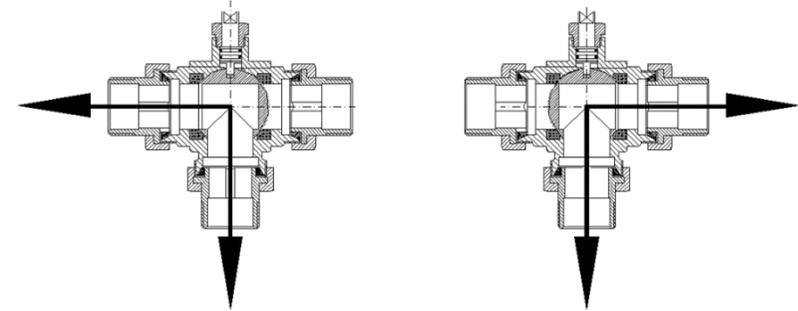
Модель транзистора

Биполярный транзистор пропускает электрический ток в одном направлении при подаче управляющего тока на базу – т.е. открывается. И перестает пропускать электрический ток при отключении управляющего тока на базу – т.е. закрывается или запирается.

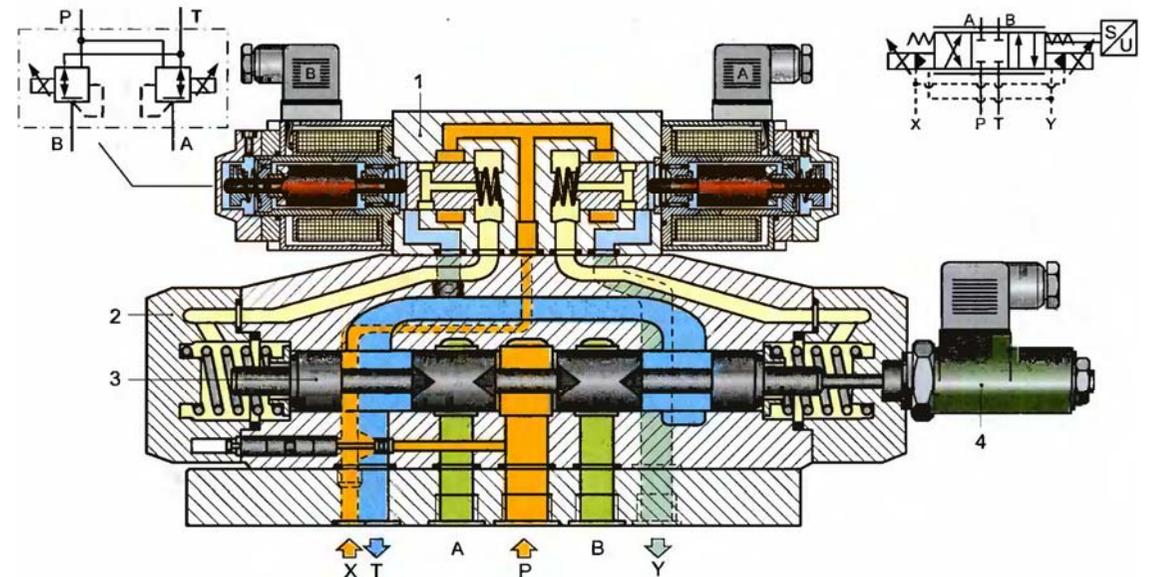
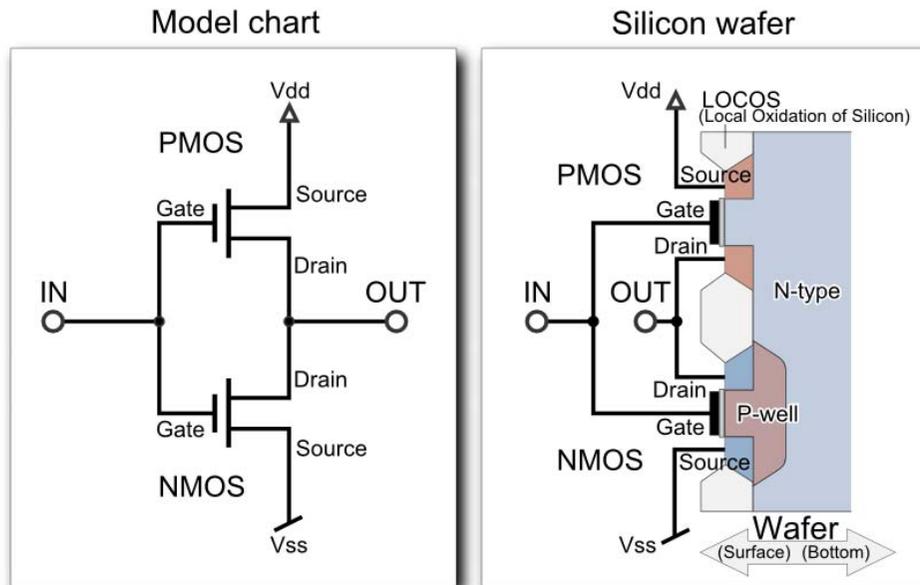
Транзистор - это клапан или вентиль, в котором диафрагма, управляемая слаботоковым сигналом (либо постоянным током для ВТ, либо постоянным давлением для FET), перемещает плунжер, который влияет на ток через другой участок трубы.



CMOS представляет собой комбинацию **двух MOSFET** транзисторов. При изменении входного давления поршни позволяют выходному подключаться либо к нулевому, либо к положительному давлению.



CMOS inverter



Мемристор - это игольчатый клапан, приводимый в действие расходомером. Когда вода течет в прямом направлении, игольчатый клапан сильнее ограничивает поток; когда вода течет в другом направлении, игольчатый клапан открывается дальше, оказывая меньшее сопротивление.

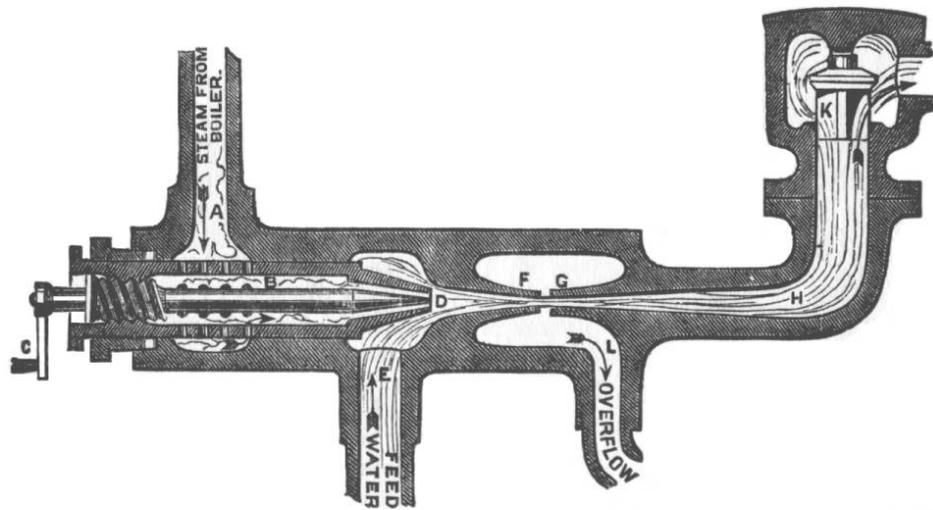
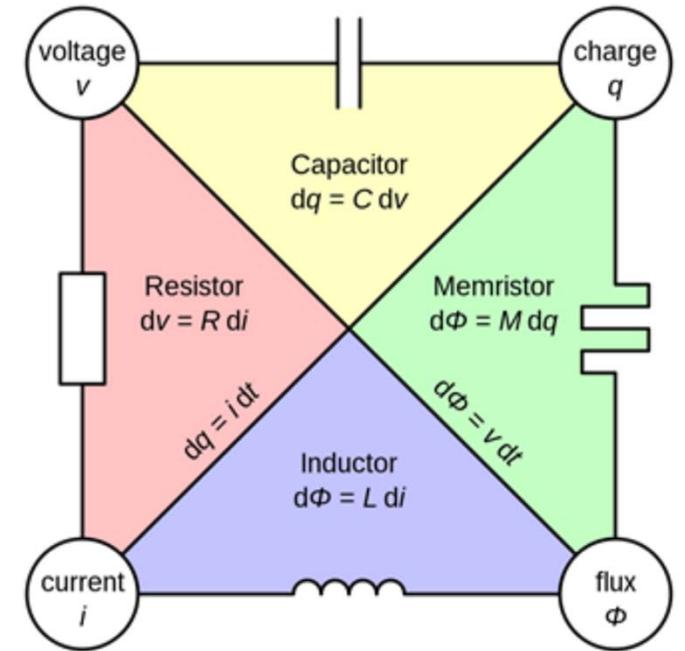
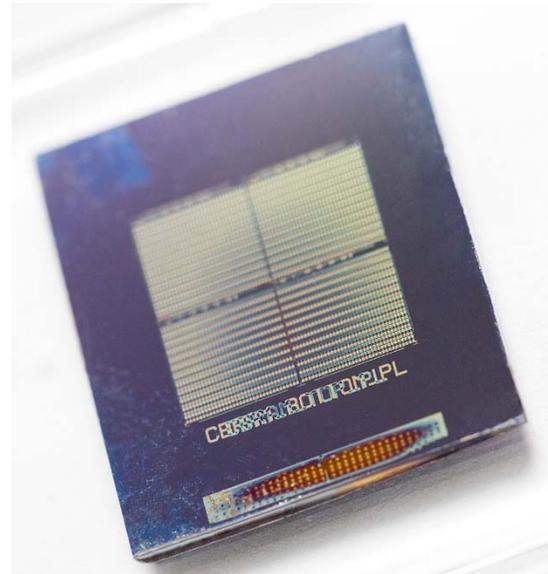


FIG. 6.— Section of Giffard's Injector.



Основные эквиваленты

- **Скорость электромагнитной волны (скорость распространения)** эквивалентна скорости звука в воде. При щелчке выключателя электрическая волна очень быстро распространяется по проводам.
- **Скорость потока заряда (скорость дрейфа)** эквивалентна скорости частиц воды. Сами движущиеся заряды движутся довольно медленно.
- **Постоянный ток** эквивалентен постоянному потоку воды в контуре труб.
- **Переменный ток низкой частоты** эквивалентен колебаниям воды взад-вперед в трубе.
- **Высокочастотные линии переменного тока** и передачи в некоторой степени эквивалентны звуку, передаваемому по водопроводным трубам, хотя это должным образом не отражает циклическое изменение направления переменного электрического тока. Как описано, поток жидкости передает колебания давления, но жидкости не меняются местами с высокой скоростью в гидравлических системах, что точно описано в приведенной выше записи о "низкой частоте". Лучшей концепцией (если рассматривать звуковые волны как явление) является концепция постоянного тока с наложением высокочастотных "пульсаций".
- **Индуктивная искра**, используемая в индукционных катушках, похожа на гидравлический удар, вызванный инерцией воды.



Примеры уравнений

Тип	гидравлическая	электрическая	тепловая	механическая
Количество	объем V [м^3]	заряд q [C]	тепло Q [Дж]	импульс P [Нс]
поток количества	Объемный расход Φ_V [$\text{м}^3 / \text{с}$]	Ток I [$\text{А} = \text{C} / \text{с}$]	скорость теплопередачи Q [Дж / с]	скорость v [$\text{м} / \text{с} = \text{Дж} / \text{Нс}$]
плотность потока	скорость v [$\text{м} / \text{с}$]	плотность тока i [$\text{C} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}) = \text{А} / \text{м}^2$]	тепловой поток Q'' [$\text{Вт} / \text{м}^2$]	напряжение σ [$\text{Н} / \text{м}^2 = \text{Па}$]
потенциал	давление P [$\text{Па} = \text{Дж} / \text{м}^3 = \text{Н} / \text{м}^2$]	потенциал ϕ [$\text{В} = \text{J} / \text{C} = \text{W} / \text{A}$]	температура T [K]	сила F [N]
линейная модель	Закон Пуазейля $\Phi_V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta p^*}{\ell}$	Закон Ома $j = -\sigma \nabla \phi$	Закон Фурье $\dot{Q}'' = \kappa \nabla T$	Демпфер $\sigma = c \Delta v$

Пределы аналогии

- Если зайти слишком далеко, аналогия с водой может создать неправильные представления.
- **Поля** (уравнения Максвелла, индуктивность): Электроны могут толкать или притягивать другие удаленные электроны с помощью своих полей, в то время как молекулы воды испытывают силы только при непосредственном контакте с другими молекулами. По этой причине волны в воде распространяются со скоростью звука, но волны в электронах будут распространяться намного быстрее, поскольку силы от одного электрона действуют на множество удаленных электронов, а не только на соседей, находящихся в непосредственном контакте. В гидравлической линии передачи энергия течет по воде в виде механических волн, но в линии электропередачи энергия течет в виде полей в пространстве, окружающем провода, и не течет внутри металла. Кроме того, ускоряющийся электрон будет тащить за собой своих соседей, одновременно притягивая их за счет магнитных сил.
- **Заряд**: В отличие от воды, подвижные носители заряда могут быть положительными или отрицательными, а проводники могут обладать общим положительным или отрицательным суммарным зарядом. Подвижными носителями в электрических токах обычно являются электроны, но иногда они заряжены положительно, например, положительные ионы в электролите, H^+ ионы в протонных проводниках или дырки в полупроводниках p-типа.
- **Квантовая механика**: Твердые проводники и изоляторы содержат заряды более чем на одном дискретном уровне энергии атомной орбиты, в то время как вода в одной области трубы может иметь только одно значение давления. По этой причине нет гидравлического объяснения таких вещей, как способность аккумулятора заряжаться и разряжаться, работа солнечного элемента, эффект Пельтье и т.д.

Пределы аналогии

- **Проточные трубы и провода:** Электрический заряд электрической цепи и ее элементов обычно почти равен нулю, следовательно, он (почти) постоянен. Это формализовано в действующем законе Кирхгофа, который не имеет аналогии с гидравлическими системами, где количество жидкости обычно не является постоянным. Даже с несжимаемой жидкостью система может содержать такие элементы, как поршни и открытые баки, поэтому объем жидкости, содержащейся в той или иной части системы, может изменяться. По этой причине для постоянного электрического тока требуются замкнутые контуры, а не открытый источник / слив гидравлики, напоминающий краны и ковши.
- **Скорость жидкости и сопротивление металлов:** Как и в случае с водяными шлангами, скорость дрейфа несущей в проводниках прямо пропорциональна току. Однако вода испытывает сопротивление только по внутренней поверхности труб, в то время как расход замедляется во всех точках металла, как при пропускании воды через фильтр. Кроме того, типичная скорость носителей заряда внутри проводника составляет менее сантиметров в минуту, а "электрическое трение" очень велико. Если бы заряды когда-либо текли так быстро, как может течь вода в трубах, электрический ток был бы огромным, а проводники раскалились бы добела. Для моделирования сопротивления и скорости заряда металлов, возможно, лучшей аналогией была бы труба, набитая губкой, или узкая соломинка, наполненная сиропом, чем водопроводная труба большого диаметра.

Таким образом аналогии электрической и гидравлической систем не являются полностью аналогичными.

Спасибо за внимание

Список источников.

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_электрогидравлических_аналогий
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_analogy

ЧУ ПО «Социально-технологический колледж» г Тула

Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович