

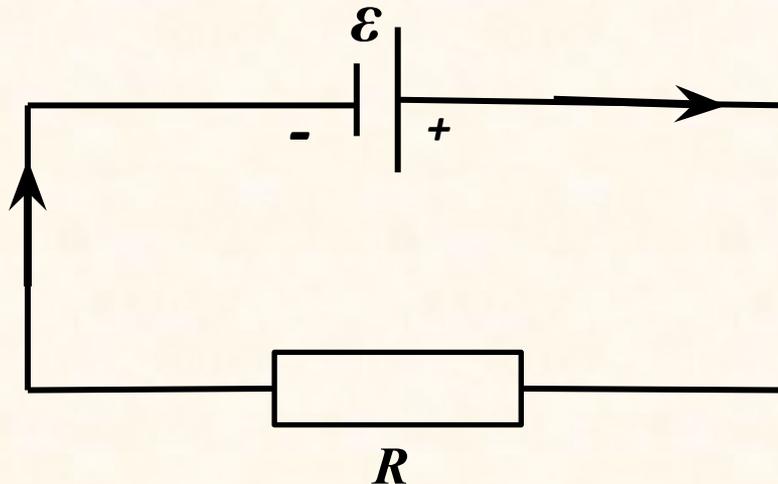


Электрический ТОК

Электрический ток. Его виды

Электрический ток – направленное движение свободных носителей заряда.

Носителями заряда служат электроны, значительно реже (в жидкостях и газах) ионы. За положительное направление тока принимается движение положительных зарядов. Движение электронов и направление тока противоположны.



Условия существования тока:

- наличие свободных носителей зарядов;
- наличие внешней силы, заставляющей заряды двигаться направленно;
- наличие замкнутой электрической цепи.

Признаки тока:

- оказывает тепловое действие (нагревает проводник);
- оказывает химическое действие (электролиз);
- оказывает магнитное действие (ориентация магнитной стрелки около проводника с током).

Основные характеристики тока:

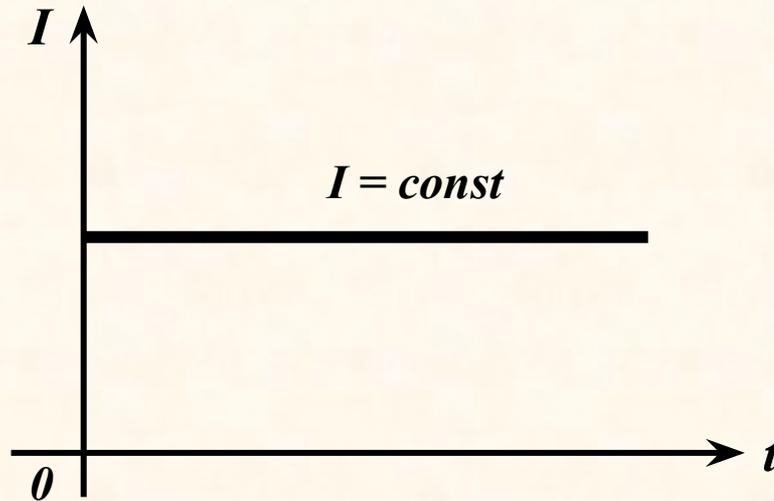
- ***Сила тока (I)*** – физическая скалярная величина, равная отношению заряда, протекающего через поперечное сечение проводника ко времени его протекания.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (\text{А}) \text{ ампер}$$

- ***Плотность тока (j)*** - это сила тока, приходящаяся на единицу площади, ориентированной перпендикулярно направлению тока:

$$j = \frac{I}{S} \quad (\text{А/м}^2)$$

Ток называется **постоянным**, если его направление и численное значение со временем не меняются.

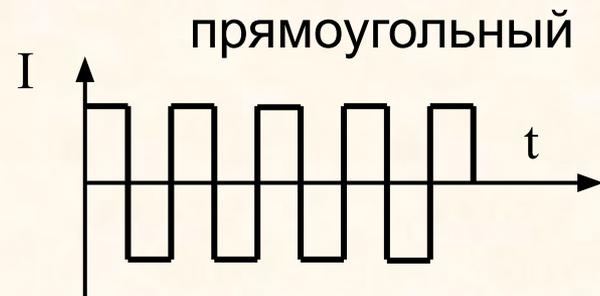
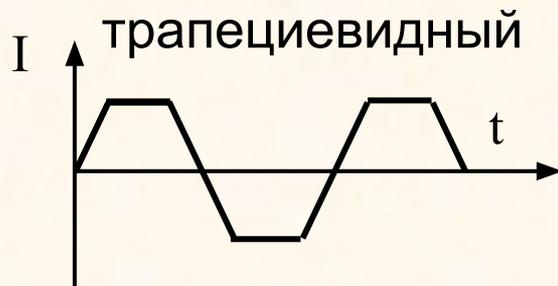


Ток является **переменным**, если с течением времени меняется по модулю и по направлению.

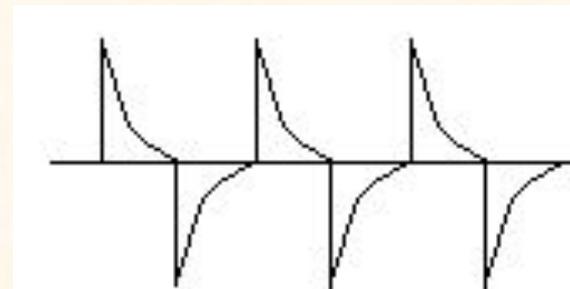
На практике чаще всего под переменным током подразумевают периодический переменный ток, где имеют место периодически повторяющиеся изменения электрических параметров: заряда, тока, напряжения и др.

Виды переменного тока по форме кривой:

- 1) синусоидальный ток;
- 2) прямоугольный ток;
- 3) треугольный ток;
- 4) трапециевидный ток;
- 5) игольчато-экспоненциальный



Игольчато - экспоненциальный



Основные характеристики синусоидального тока.

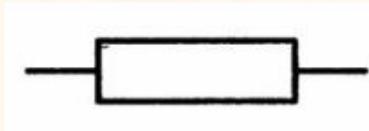
1. **Период T (с)** – время одного цикла изменения тока по направлению и величине.
2. **Частота ν (Гц)** – число циклов изменения тока в единицу времени.
$$\nu = 1/T \text{ [Гц]}$$
3. **Циклическая (круговая) частота ω (рад/с)** –
$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T \text{ [рад/с]}$$
4. **Амплитудное значение тока и напряжения I_{\max} и U_{\max}** – максимальное значение этих величин за полупериод.
5. **Фаза ϕ (рад)** – величина, определяющая во времени взаимоотношения тока и напряжения.
6. **Мгновенное значение тока и напряжения “ i ” и “ u ”** – значение этих величин в данный момент времени.
7. **Эффективные значения тока и напряжения $I_{\text{эфф}}$, $U_{\text{эфф}}$** – действующее значение силы переменного тока и переменного напряжения, равные значениям силы постоянного тока и постоянного напряжения, эквивалентных данному переменному току по своему тепловому действию.

$$I_{\text{эфф.}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\text{эфф.}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Основные элементы цепи переменного тока:

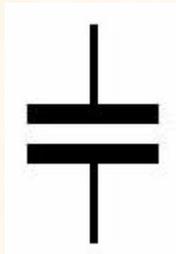
R



резисторы

Резисторы обладают активным сопротивлением « R », т. к. при прохождении по ним тока происходят существенные потери энергии в виде выделения тепла.

C



конденсаторы

Конденсаторы (емкости) и катушки (индуктивности) обладают реактивным сопротивлением, т. к. при прохождении через них тока на них не происходит существенных потерь энергии (конденсатор запасает электрическую энергию, катушка – магнитную).

L



катушки

1. Сопротивление резистора – активное.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ - удельное сопротивление [Ом·м]

l - длина проводника [м]

S - площадь поперечного сечения проводника [м]

2. Сопротивление катушки – индуктивное.

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi\nu \cdot L$$

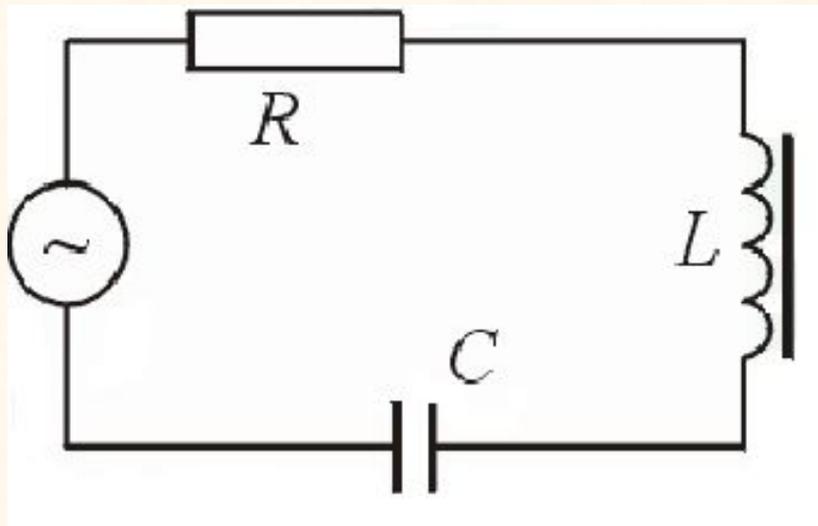
L – индуктивность [Гн] - генри.

3. Сопротивление конденсатора – емкостное.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi\nu \cdot C}$$

C – емкость конденсатора [Ф] - фарад.

Полная последовательная цепь переменного тока.



$$I = \frac{U}{Z}$$

Закон Ома

Z - импеданс (полное сопротивление в цепи «~» тока:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Закон Ома для цепи переменного тока.

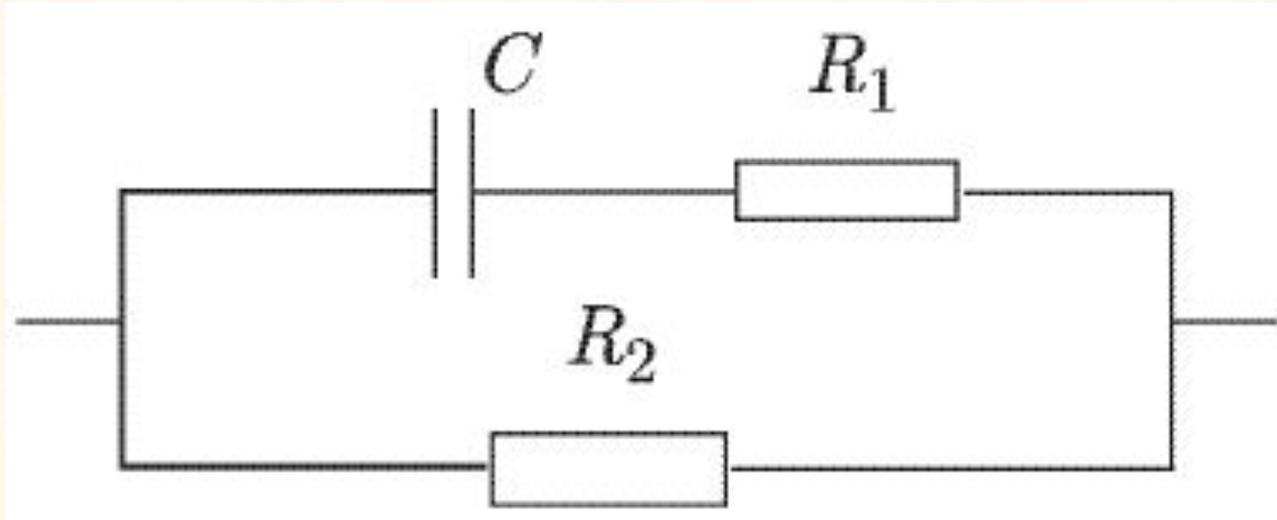
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Особенности импеданса живых тканей.

При пропускании электрического тока через живую ткань эту ткань можно представить как электрическую цепь, состоящую из активного и емкостного сопротивлений (выделение тепла и уменьшение Z живой ткани с увеличением частоты). Аналогов индуктивности в живой ткани не обнаружено ($X_L = 0$).

Следовательно, живая ткань представляет собой неполную электрическую цепь.

Для последовательной цепи:



$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Т.к. $X_C = 1 / 2\pi\nu C$, т. е. с увеличением частоты тока “ ν ” X_C – уменьшается \Rightarrow импеданс « Z » живой ткани уменьшается.

Эквивалентная электрическая схема живой ткани.

Это условная модель, которая характеризует ткань как проводник переменного тока.

В основе схемы лежат три положения:

1. Содержимое клетки и внеклеточная среда являются проводниками с ионной проводимостью. Они обладают активным сопротивлением клетки $R_{кл}$ и активным сопротивлением среды $R_{ср}$.
2. Клеточная мембрана – диэлектрик с небольшой ионной проводимостью, следовательно, имеется небольшое активное сопротивление мембраны R_m .
3. Содержимое клетки и внеклеточная среда, разделенные мембраной, являются конденсаторами определенной емкости C_M .

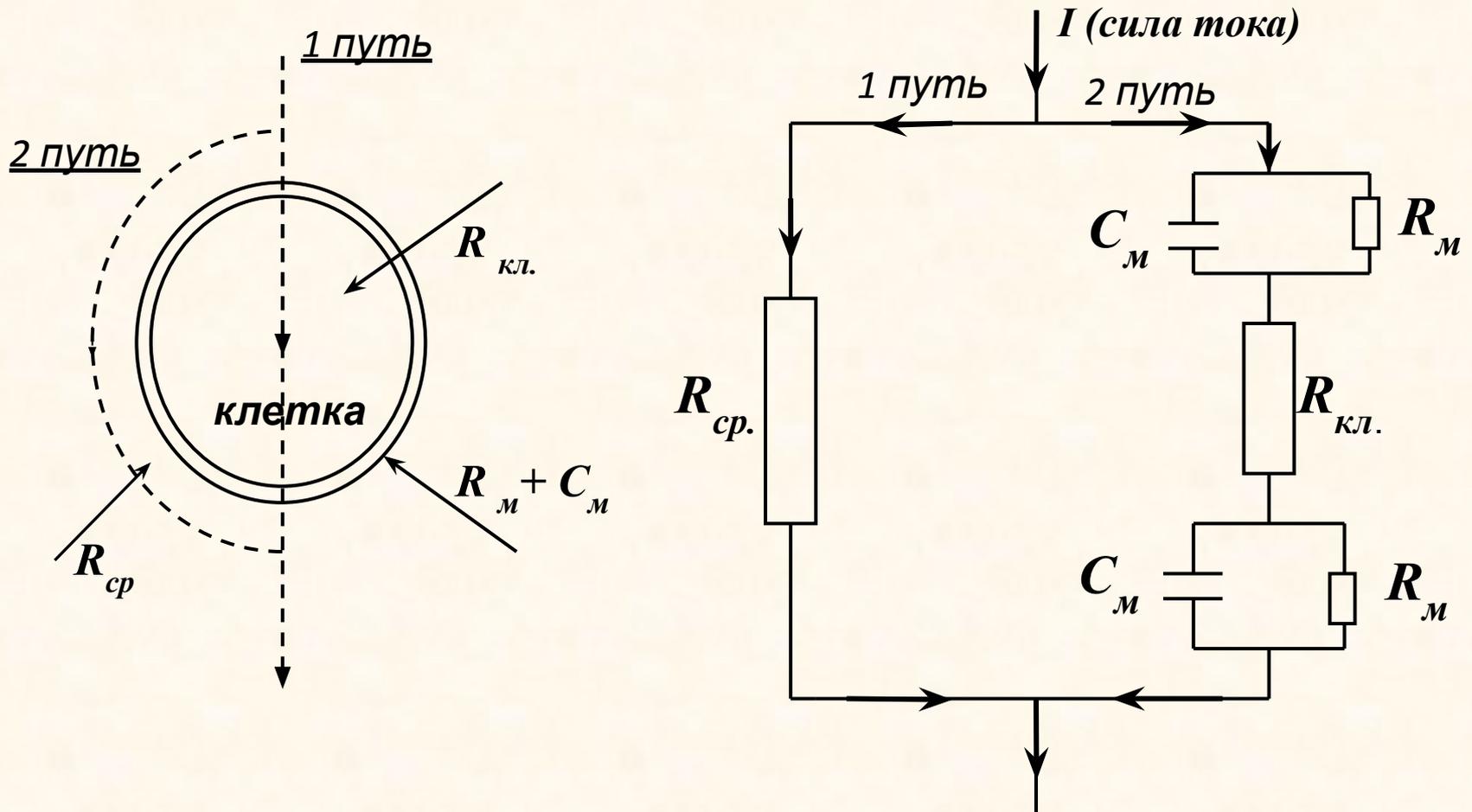
При построении эквивалентной схемы, например, крови, необходимо учитывать пути тока.

Их два:

а) Через клетку – путь представлен активным сопротивлением содержимого клетки ($R_{КЛ}$), а также сопротивлением и емкостью мембраны (R_M, C_M).

б) В обход клетки через клеточную среду – путь представлен только сопротивлением среды ($R_{ср}$).

Схема Швана (дана с учетом ионной проводимости мембраны).



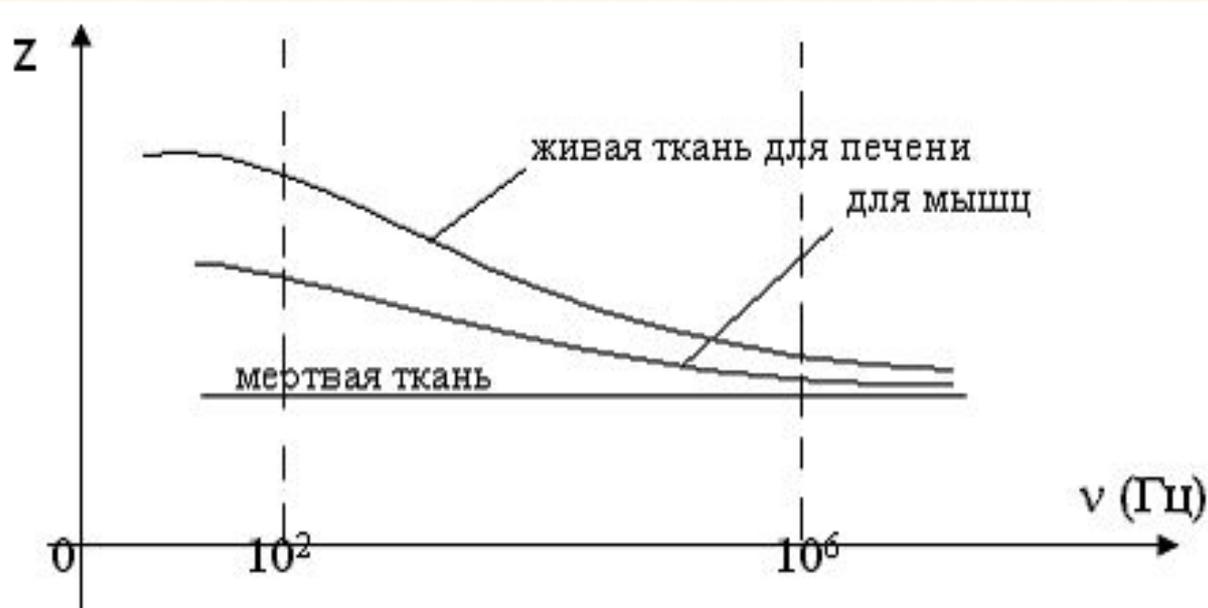
Анализ схемы показывает, что при увеличении частоты тока проводимость клеточной мембраны увеличивается (т. к. уменьшается X_C). Следовательно, полное сопротивление тканевой среды Z будет уменьшаться.

Живая ткань как проводник переменного тока имеет следующие особенности:

1. Полное сопротивление живой ткани Z зависит от ее вида, физиологического состояния (кровенаполнения) и от частоты тока.
2. Сопротивление живой ткани переменному току меньше чем постоянному.
3. С увеличением частоты импеданс живой ткани нелинейно уменьшается до определенного значения, а затем остается постоянным.

При прохождении переменного тока через живые ткани наблюдается **дисперсия электропроводности** – зависимости импеданса живой ткани от частоты переменного тока.

Дисперсионные кривые.



С увеличением частоты тока ёмкостное сопротивление уменьшается, поэтому уменьшается полное сопротивление ткани.

У мертвой ткани разрушены мембраны, поэтому ёмкостное сопротивление отсутствует, и импеданс не зависит от частоты.

На больших частотах ёмкостное сопротивление мало, им можно пренебречь, поэтому полное сопротивление (импеданс) практически не изменяется.

Интервал частот $\nu = 10^2 \div 10^6$ Гц – один из интервалов, на котором дисперсия ярко выражена. Таких интервалов существует несколько.

Особенности:

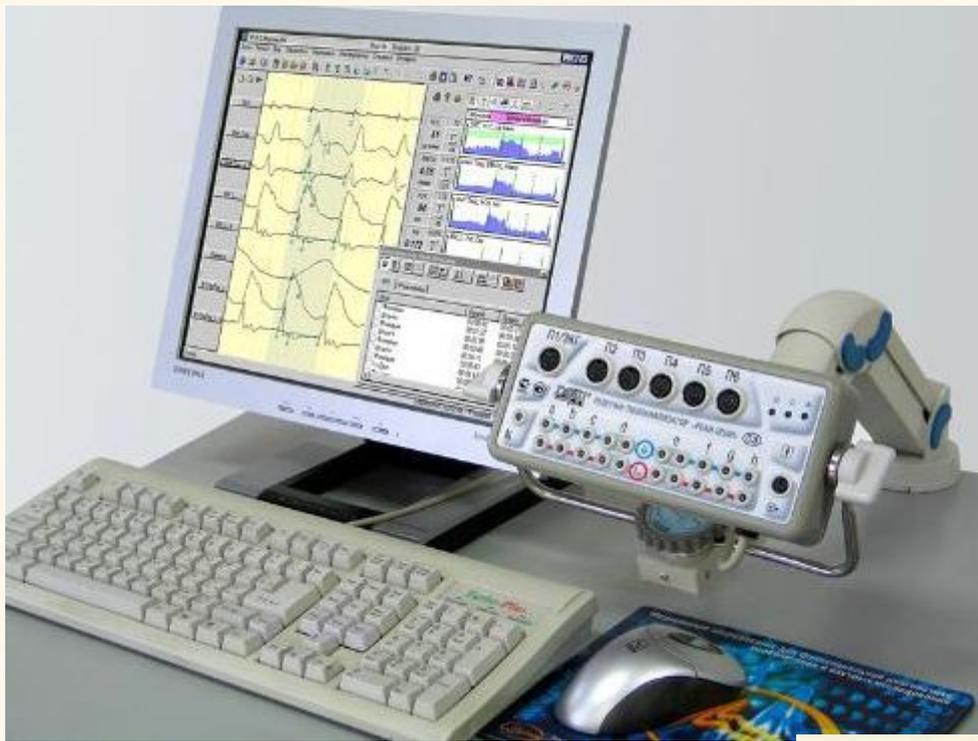
1. Дисперсия присуща только живым тканям и отсутствует у мертвых тканей.
2. Наиболее выражена на частотах до 1 МГц.
3. На практике используется для оценки физиологического состояния и жизнеспособности ткани.

Реография— диагностический метод, основанный на регистрации изменения импеданса тканей в процессе сердечной деятельности.

Применяют ток частотой 20-30 кГц, измеряют импеданс участка тканей в течение сердечного цикла.

При наполнении ткани кровью во время систолы импеданс уменьшается, во время диастолы увеличивается.

Реографию применяют при диагностике заболеваний периферических кровеносных сосудов. Получают реограммы головного мозга, сердца, лёгких, печени, конечностей.



Сущность теплового действия высокочастотного тока.

В медицине высокочастотными (в. ч.) считаются токи с частотой $\nu > 300 - 500$ тыс. Гц. Основная особенность действия в.ч. переменного тока состоит в том, что он не оказывает раздражающего действия на ткани. В отличие от токов низкой частоты в.ч. токи способны нагревать до высоких $t^{\circ}\text{C}$ не только проводники, но и диэлектрики. Токи низкой частоты с силой $I > 50$ мА уже опасны для человека. Это объясняется тем, что при прохождении через ткань токов низкой частоты амплитуда колебания ионов может превышать пределы прочности ткани. Возникают болевые ощущения, часть тканей разрушается.

Токи высокой частоты с силой $I > 3-4$ А могут быть безопасны. В медицине применяют токи $I = 1$ А. Причина: при прохождении через ткани токов высокой частоты смещение ионов незначительно, следовательно, эти токи не оказывают на организм разрушительного воздействия. При этом силу и плотность тока можно увеличивать, чтобы происходило нужное для лечебных целей тепловое воздействие без раздражения тканей.

Особенности теплового действия.

1. Выделение тепла зависит от свойств ткани, характеристик тока и времени его действия.
2. Выделение тепла происходит по всему объему ткани.

Общее тепловое действие в.ч. тока объясняется двумя причинами:

1 причина - **Джоулевы потери** - это тепловыделение в ткани за счет потерь энергии на активном сопротивлении ткани (R) при колебаниях ионов.

Их особенности:

- не зависят от частоты;
- подчиняются закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{\text{Дж}} = k \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$

Q - количество выделенной теплоты. (Дж)

I - сила тока (А)

R - активное сопротивление (Ом)

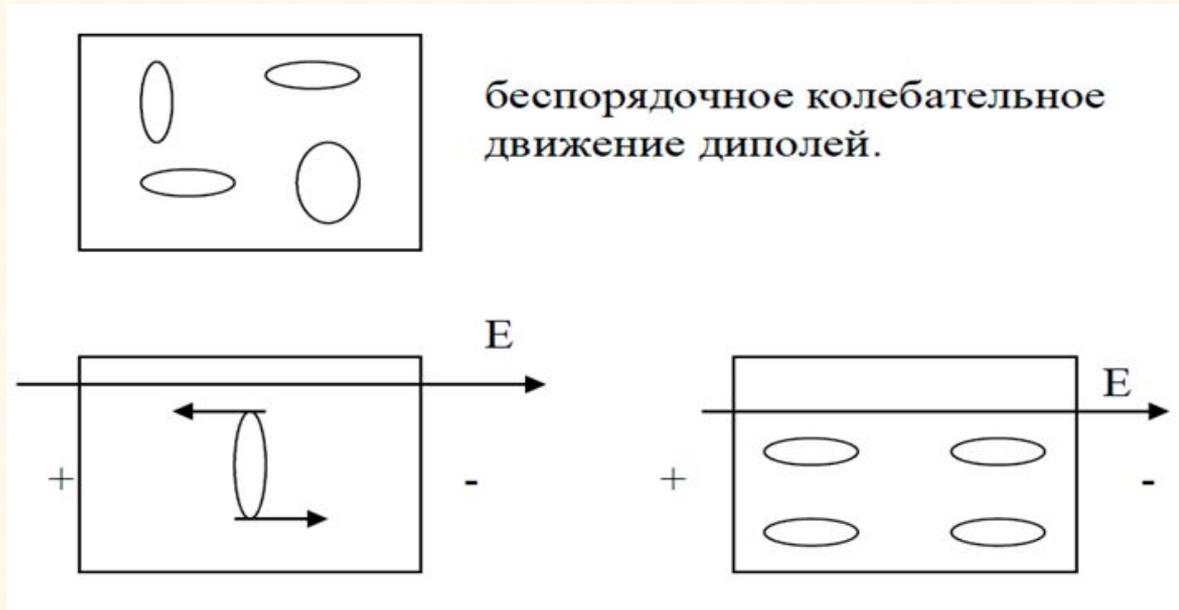
t - время действия тока (с)

k - коэффициент пропорциональности, зависит от выбора единиц в системе СИ (коэффициент пересчета от "Дж" к "калориям" = 0,24).

2 причина - Диэлектрические потери - это тепловыделение, связанное с колебательными, вращательными движениями молекул диэлектрика, а также их поворотом в высокочастотном электрическом поле.

Их особенности:

1. Зависят от частоты тока " ν " для каждого вида ткани. Существует частота, на которой эти потери максимальны (для мышц - 139 МГц., крови - 114 МГц., кожи - 61 МГц). Причиной существования этих частот является тот факт, что дипольные (полярные) молекулы диэлектрика успевают полностью повернуться в направлении вектора E напряженности электрического поля;



2. Подчиняются формуле диэлектрических потерь (формуле Дебая).

$$Q_{\text{диэл.}} t = k \cdot E^2 \cdot v \cdot \Phi_{\text{II}}$$

Q – количество теплоты, теряемое в единицу объема вещества (Дж/м³)

k – коэффициент пересчета джоулей в калории (0,24)

E - напряженность электрического поля (В/м)

t - время действия тока (с)

v - частота тока (Гц)

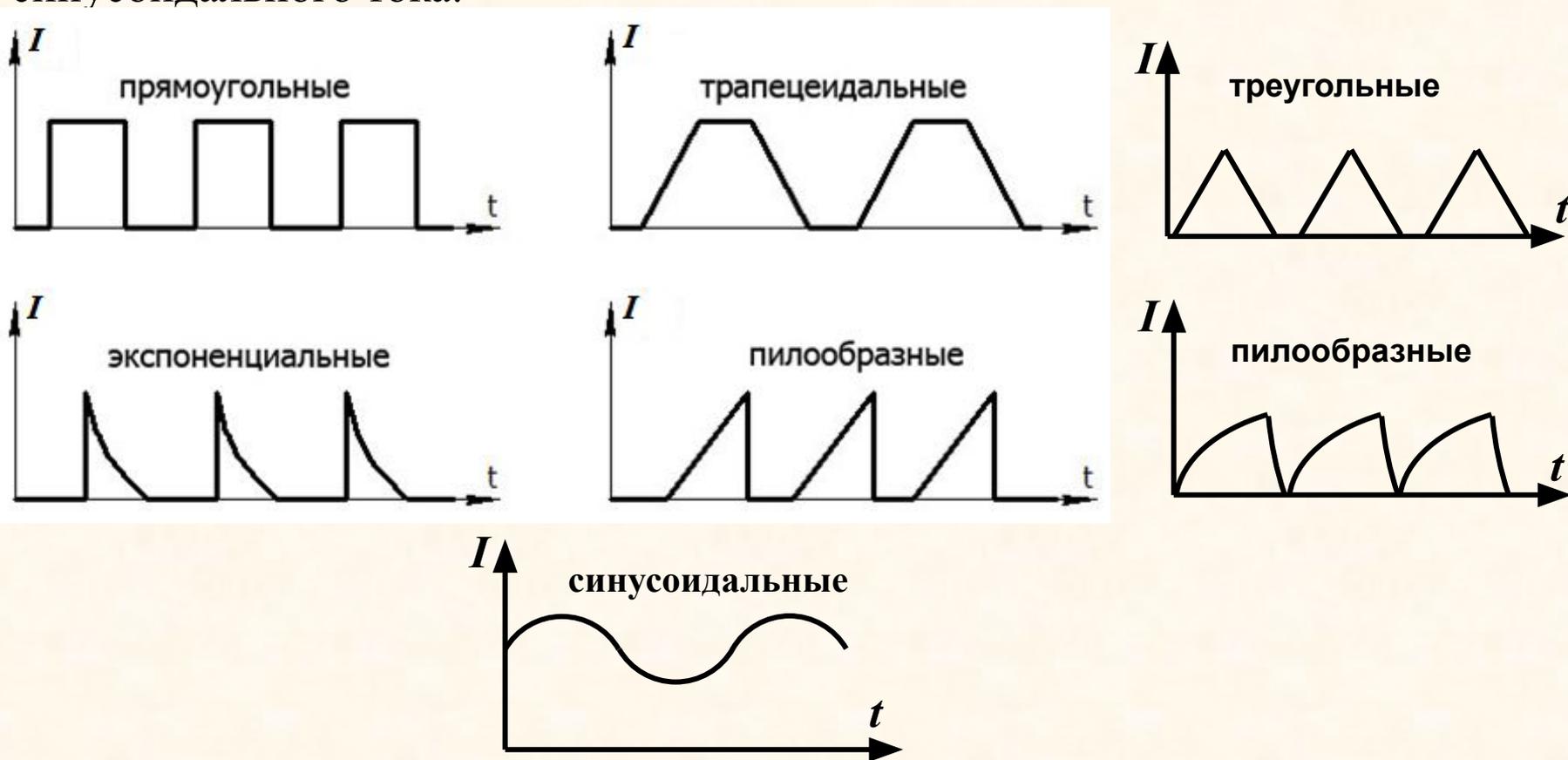
Φ_{II} - фактор потерь, учитывающий диэлектрические свойства конкретной ткани.

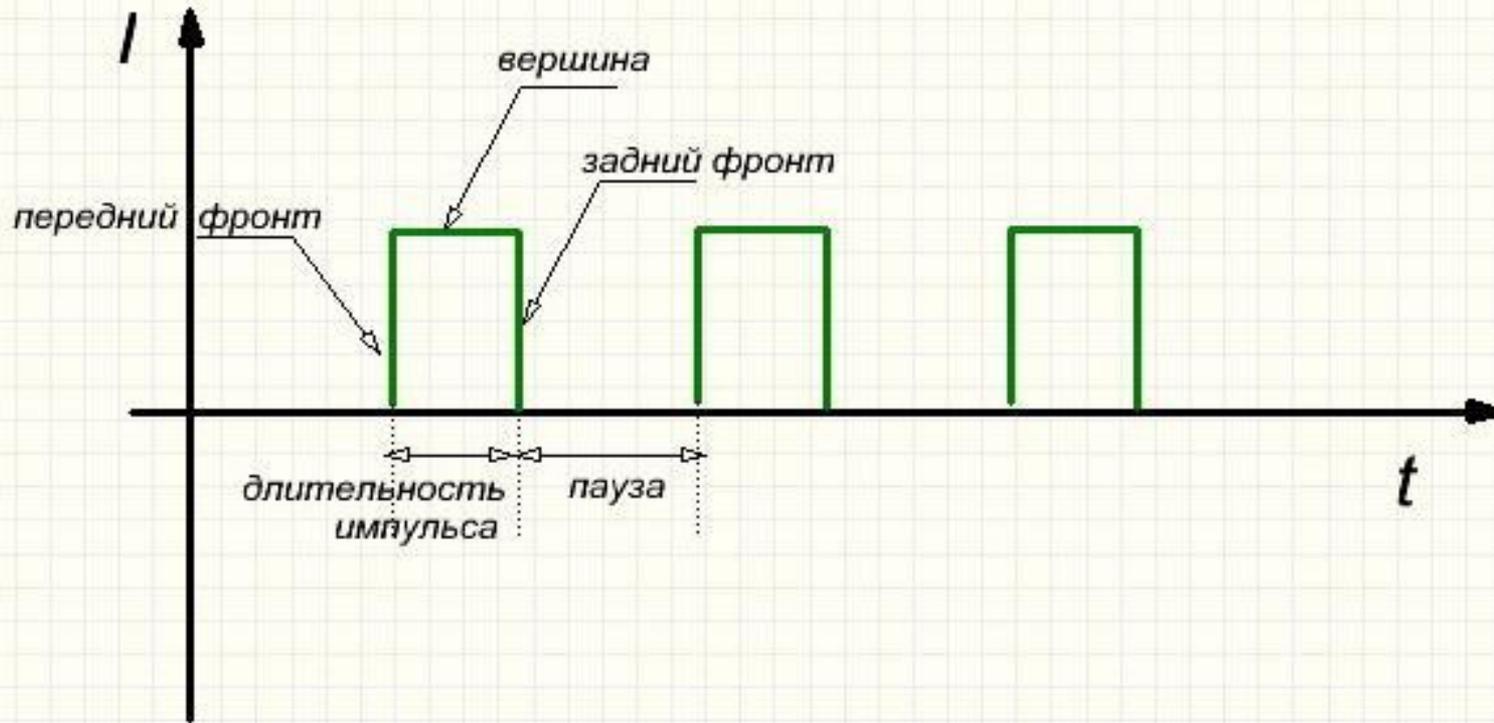
Недостаточно изученным является специфическое действие в.ч. тока, дающее болеутоляющий и успокаивающий эффект. Это действие начинает проявляться на частоте >40 МГц.

Импульсный ток.

Наиболее сильное раздражающее действие оказывает импульсный ток.

Импульсный ток — это электрический ток, периодически повторяющийся кратковременными порциями (импульсами). В медицине чаще используют **импульсный ток**, состоящий из ритмически повторяющихся импульсов тока постоянного направления и различной формы — прямоугольной, трапециевидной, треугольной, экспоненциальной (токи Лапика) или импульсов синусоидального тока.





Действие этих токов определяется следующими факторами:

- Видом ткани и ее физиологическим состоянием;
- Силой и плотностью тока;
- Временем его действия;
- Частотой;
- Скоростью изменения тока.

Виды действия:

1. **Тепловое** (определяется плотностью и временем действия).
Лежит в основе терапии.
2. **Специфическое физиологическое действие.**
Лежит в основе терапии.
3. **Раздражающее** – это действие проявляется только для возбудимых тканей (нервной, мышечной и железистой).
Виды этого действия зависят от физиологического состояния клетки, от характеристик тока. Раздражающее действие лежит в основе диагностического применения и подчиняется трем законам.

R_D – величина, характеризующая раздражающее действие.

1 закон раздражающего действия.

Закон – закон Дюбуа – Реймона.

« R_D » прямо пропорционально скорости изменения тока.

$$R_D \propto \frac{di}{dt} \quad \left(\frac{di}{dt} - \text{скорость изменения тока} \right)$$



$$R_D = k \cdot \frac{di}{dt}$$

k - коэффициент пропорциональности, характеризующий конкретную ткань.

Наибольшая скорость изменения тока у прямоугольных импульсов, Следовательно они обладают наибольшим R_D . Такие токи можно получить размыканием (замыканием) ключа электрического тока.

2. Закон раздражающего действия

Закон Вейса – Лапика.

В определенных пределах “ R_D ” возрастает пропорционально длительности раздражающих импульсов тока.

$$R_D \propto \Delta t \quad (\Delta t - \text{длительность действия импульсов}).$$

$$R_D = k \cdot \Delta t$$

k - коэффициент пропорциональности, характеризующий конкретную ткань.

3. Закон раздражающего действия

Закон Нернста.

Для одиночных раздражающих импульсов тока одно и то же раздражающее действие можно получить, увеличивая силу тока и уменьшая время раздражения и наоборот.

$$R_D = I \cdot \Delta t^n$$

«*n*» – может принимать дробные значения и зависит от вида ткани, ее физиологического состояния.

Этот закон справедлив для частот тока от 50 тыс. – 300 тыс. Гц.

Реобазы, хронаксия и кривая «ток-время»

Реобазы – характеризует пороговое раздражающее действие по силе тока.

Это “*min*” сила тока, которая при достаточном времени раздражения вызывает пороговый раздражающий эффект в виде сокращения мышц.

Хронаксия – характеризует пороговое раздражающее действие по времени раздражения.

Это такое “*min*” время раздражения, при котором ток удвоенной реобазы вызывает сокращение мышц.

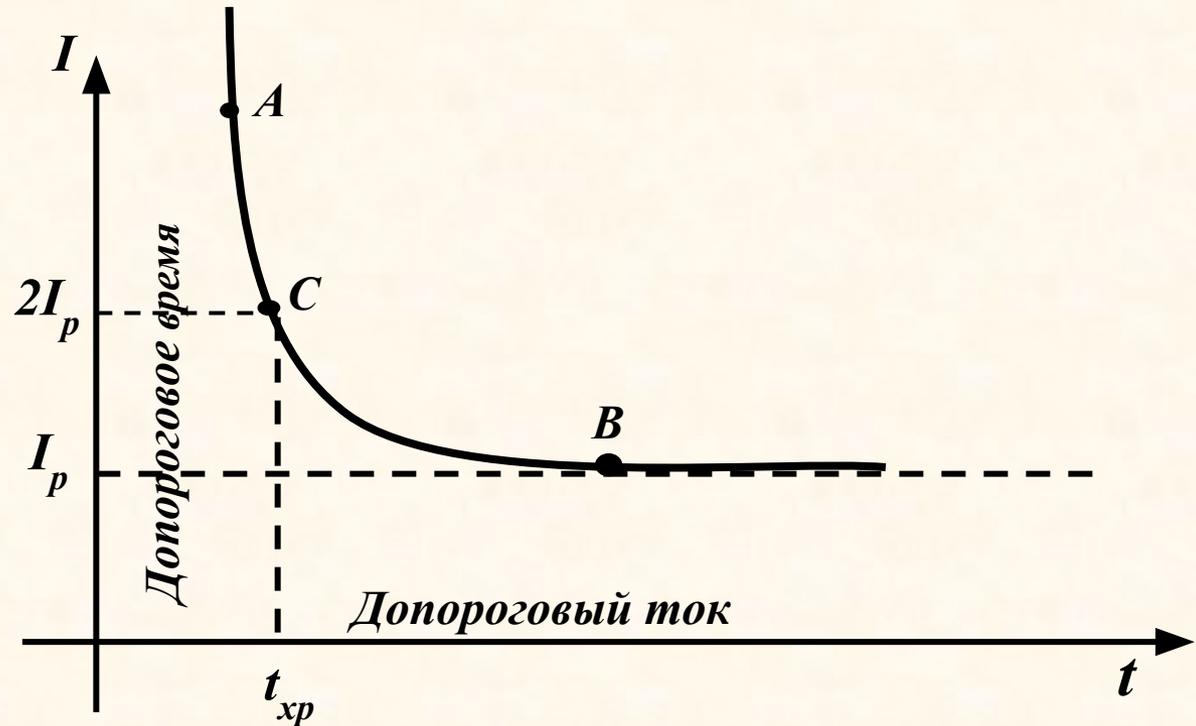
Кривая «ток – время» (пороговая кривая) – характеризует пороговый (раздражающий) эффект при изменении силы тока и времени раздражения.

Реобазис, хронаксия и кривая «ток-время»

Кривая «ток – время».

I - пороговая сила тока

t - время раздражения



Верхний участок графика (A) является вертикальным, нижний (B) – горизонтальным, средний (AB) подчиняется закону Нернста.

$$P_{Д} = I \cdot \Delta t^n$$

Реобаза, хронаксия и кривая «ток-время»

Для того, чтобы определить реобазу, необходимо при достаточно длительном времени раздражения увеличивать ток. Тот минимальный ток, при котором мышца начнет сокращаться, называется током реобазы I_r .

Для определения хронаксии берется ток удвоенной реобазы (« t_{xp} » соответствует « $2I_r$ » в точке «С»).

Время меньшее, чем время хронаксии, называется допороговым временем раздражения (оно не вызывает раздражения ткани при токе любой силы).

Токи меньшие тока реобазы, называются допороговыми токами (они не вызывают раздражение ткани при любом времени воздействия).