

Физические основы ЭКГ

П Л А Н

1. Основные функции сердца (автоматизма, возбудимости, проводимости, сократимости, тоничности)
 - a) Мембранная теория возникновения биопотенциалов.
 - b) Проводящая система сердца
2. Электрический диполь
 - a) поведение диполя во внешнем электрическом поле: однородном и неоднородном.
 - b) Электрический диполь как источник электрического поля. Потенциал и разность потенциал поля диполя.
5. Токовый диполь
 - a) электрическая модель токового диполя
 - б) Потенциал электрического поля токового диполя в однородной неограниченной среде
 - в) Потенциал электрического поля, создаваемого токовым диполем
6. Дипольный эквивалентный электрический генератор сердца.
7. Генез электрокардиограмм в рамках модели дипольного эквивалентного электрического генератора сердца
 - a) теория Эйтховена, её основные положения
 - б) распределение эквипотенциальных линий на поверхности тела человека
 - в) треугольник Эйтховена. Стандартные отведения.
 - г) ЭКГ здорового сердца
 - д) природа зубцов, интервалов и сегментов.
8. Блок - схема ЭКГ. Виды ЭКГ.
9. Усилитель. Принцип работы. Коэффициент усиления усилителя.
10. Искажения (амплитудные, сеточные, частотные)
11. Дифференциальный усилитель. Устройство. Принцип работы.
12. Векторэлектрокардиография.

При функционировании тканей и органов, как и отдельных клеток, сопровождающихся электрической активностью, в организме создаётся электрическое поле.

Зависимость от времени разности потенциалов, возникающей при функционировании данного органа или ткани, называется **электрограммой**.

Название электрограмм указывают на органы (ткани), функционирование которых приводит к появлению регистрируемой разности потенциалов:

1. ЭКГ-электрокардиограмма
2. ЭРГ-электроретинограмма
3. ЭЭГ-электроэнцефалограмма
4. ЭМГ-электромиограмма.

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ СЕРДЦА :

1. Автоматизма
2. Возбудимости
3. Проводимости
4. Сократимости
5. Тоничности

Все эти функции играют колоссальную роль в работе сердца, тесно между собой взаимосвязаны и при нарушении одной из них изменяются другие функции.

Сердце человека является сложной гетерогенной структурой, состоящей из сократимых и несократимых элементов. К сократимым элементам, на которых приходится примерно 50% общей массы сердца, относятся клетки миокарда (миоциты), а к несократимым элементам - прежде всего клетки и волокна автоматической и проводниковой системы сердца, фиброзный остов, сосудистые и нервные сплетения и жировая ткань. На несократимые элементы сердца приходится вторая половина его массы. Только определенным элементам проводниковой системы сердца присущи автоматические свойства.

I. Автоматизм - способность сердца безо всяких внешних воздействий выполнять ритмические, следующие одно за другим сокращения. Это функция осуществляется проводниковой системой сердца.

Автоматическая система сердца образована синусовым узлом, специализированными проводниковыми путями предсердий, атриовентрикулярным соединением, нижней частью пучка Гиса, обоими его ножками и волокнами сети Пуркинье.

Зона доминантного (главного, первичного) водителя ритма сердца - синусовый узел - общей длиной 15 - 25 мм, шириной 4 - 7 мм. В средней части С.У. находятся большие звездчатые клетки с крупными круглыми ядрами Р - клетки (Pale). В хвостовой части С.У. лежат переходные Т - клетки, осуществляющие синоабриальную передачу возбуждения. Р - клетки генерируют импульсы возбуждения. Т - клетки преимущественно проводят возбуждения.

С.У. является доминантным водителем сердечного ритма, автоматическим центром первого порядка. В нем, в Р - клетках, через одинаковые промежутки времени генерируются электрические импульсы эквивалентной мощности, возбуждающие миокард предсердий и желудочков и вызывающие сокращение всего сердца. Эти импульсы проводятся Т - клетками в близко расположенные клетки (волокна) Пуркинье, которыми активируется миокард правого предсердия.

Нормальный автоматизм составляет 60 - 80 импульсов в 1 минуту. Возбуждение синусового узла не отражается на обычной ЭКГ.

Таким образом, в сердце имеется множество клеток, обладающих функцией автоматизма.

Обычно ритмом сердца управляет синусовый узел - автоматический центр первого порядка.

При поражении синусового узла функция автоматизма исполняется атриовентрикулярным узлом - центром второго порядка. Если связь между предсердием и желудочками не нарушена, этот узел управляет ритмом всего сердца. Наконец, если поражены синусовый и атриовентрикулярный узлы, то функция автоматизма смещается к ножкам пучка Гиса, т.е. к центрам третьего порядка. Загадка автоматизма сердца до сих пор не раскрыта.

1. Автоматизм сердца связан с синтезом ацетилхолина, потому что в венозном синусе ацетилхолина содержится значительно больше, чем в мышце предсердий и желудочков.

2. Существование специфического гормона автоматизма.

3. Чазов "...объяснение функции автоматизма следует искать в особенностях изменения мембранного потенциала волокон проводящей системы сердца.

II. Возбудимость - возникновение потенциала действия и сокращения сердца. Возбудимостью обладают как клетки проводниковой системы, так и клетки сократительного миокарда.

Мышечная клетка сердца в невозбужденном состоянии имеет начальную (потенциал покоя).

Ее потенциал колеблется в пределах $\Delta\phi = -(80 - 90)$ мВ.

МЕМБРАННАЯ ТЕОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БИОПОТЕНЦИАЛОВ.

В основе возникновения электрических явлений в сердце лежит, как известно, проникновение ионов K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Cl^- и др. через клеточную мембрану.

$$K_i = 30 K_e$$

$$Na_i = 20 Na_e$$

$$Ca_i = 25 Ca_e$$

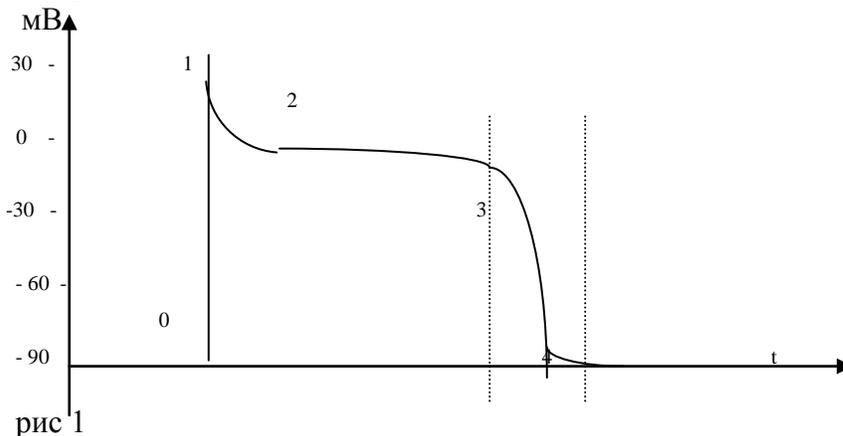
$$Cl_i = 13 Cl_e$$

Такие высокие градиенты концентрации ионов по обе стороны мембраны поддерживаются благодаря функционированию в ней ионных насосов. Этот процесс осуществляется против концентрационных градиентов этих ионов и требует затраты энергии.

В невозбуждённой клетке мембрана более проницаема для K^+ , Cl^- . Ионы K^+ стремятся выйти из клетки, ионы Cl^- входят внутрь клетки. Это перемещение ионов и приводит к поляризации клеточной мембраны: наружная поверхность становится положительной, а внутренняя - отрицательной. Между внутренней и внешней сторонами мембраны устанавливается разность потенциалов - трансмембранный потенциал покоя (ТМПП) - $\Delta\phi = -90$ мВ.

При возбуждении клетки резко изменяется проницаемость её стенки по отношению к ионам различных типов. Это приводит к изменению ионных потоков, и к изменению величины ТМПП.

Кривая изменения ТМПП во время возбуждения получила название -(ТМПД)- трансмембранного потенциала действия.



Различают несколько фаз ТМПД миокардиальной клетки (рис 1).

1. 0 –фаза деполяризации.

В этой фазе резко увеличивается проницаемость мембраны клетки для ионов Na^+ , Na^+ идёт внутрь клетки, внутренняя поверхность клетки становится положительной. Величина $\Delta\phi$ изменяется от -90 мВ до 20 мВ за время $\tau = 10$ мс. Происходит реверсия – перезарядка мембраны.

2. Фаза 1- начальная быстрая реполяризация.

Проницаемость для Na^+ уменьшается, а для Cl^- увеличивается, что ведёт к падению $\Delta\phi$ до нуля или ниже.

3. Фаза 2-реполяризация.

$\Delta\phi = \text{const}$ – формируется плато на кривой. Постоянный уровень ТМПД поддерживается за счёт медленно входящего тока ионов Ca^{++} и Na^+ , направленного внутрь клетки и K^+ из клетки. ($\tau = 200$ мс). В течении этой фазы клетка остаётся в возбуждённом состоянии.

4. **Фаза 3** –фаза конечной быстрой реполяризации.

Уменьшается проницаемость для Ca^{++} и Na^{+} и значительно возрастает проницаемость её для K^{+} . K^{+} идёт из клетки, что приводит к восстановлению ТМПД.

5. **Фаза 4** –фаза диастолы.

Происходит восстановление исходной концентрации K^{+} , Na^{+} , Ca^{++} , Cl^{-} соответственно внутри и вне клетки благодаря действию “**Na –K**” насоса. При этом уровень ТМПД=-90мВ.

Клетки проводящей системы сердца и клетки синусового узла обладают способностью к спонтанному медленному увеличению ТМПД- уменьшению отрицательного заряда внутренней поверхности мембраны. Этот процесс получил название спонтанной диастолической деполяризации и лежит в основе автоматической активности клеток синусового узла и проводящей системы сердца.

Проводящей системе сердца присуща способность проводить импульсы не только в обычном направлении, но и в противоположном.

Кроме этого по специфическим путям импульсы проводятся в левое предсердие и атриовентрикулярную систему. Далее начинается а-в-система, состоящая из

1. а-в-узла
2. пучка Гиса
3. ножек пучка Гиса с волокнами Пуркинье.

А-в узел находится справа от межпредсердной перегородки над местом прикрепления трехстворчатого клапана (длиной 5 -6 мм, шириной 2 - 3 мм) играет большую роль в осуществлении физиологических функций сердца как в обычных, так и в патологических условиях. А-в узел содержит 4 типа клеток

1. небольшое число Р - подобных клеток
2. промежуточные клетки между Р - клетками и обычными рабочими клетками миокарда
3. клетки, напоминающие обычные клетки миокарда
4. типичные клетки Пуркинье вокруг атриовентрикулярного узла

А-в узлу присуща способность к управлению ритмом (автоматизм), задержке проведения импульсов и сортировке (фильтрации) поступающих в узел синусовых импульсов.

При выключении синусового узла управлять деятельностью сердца начинает атриовентрикулярный узел, который считают автоматическим центром второго порядка.

Общий ствол пучка Гиса как бы продолжается из атриовентрикулярного узла, общая длина пучка Гиса около 20 мм, толщиной 1 - 4 мм

Пучок Гиса лежит на правой части фиброзного кольца между предсердиями и желудочками. Он состоит из клеток Пуркинье, которые образуют параллельные ряды. К пучку Гиса приближаются нервные волокна блуждающего нерва.

В своей нижней части пучок Гиса разветвляется на 2 ножки - левую и правую. Обе ножки состоят из клеток двух видов - клеток Пуркинье и клеток, очень похожих на клетки сократительного миокарда. Конечные разветвления левой и правой ножек пучка Гиса соединяются с большой сетью клеток (волокон Пуркинье), под эндокардом обоих желудочков. Клетки Пуркинье являются видоизмененными клетками миокарда, которые непосредственно связываются с сократительным миокардом. Автоматические импульсы по

внутрижелудочковым проводящим путям поступают к клеткам Пуркинью и отсюда - непосредственно к сократительным клеткам желудочков, вызывая активацию и сокращение желудочков.

Скорость в ветвях и ножках пучка Гиса равна 3 - 4 м/с. Это автоматические центры третьего порядка. Их автоматизм составляет 15 - 40 импульсов в 1 минуту.

III. Проводимость –это способность к проведению возбуждения, возникшего в каком –либо участке сердца, к другим отделам сердечной мышцы.

Проводимость свойственна всем клеткам миокарда. Трансмембранный потенциал действия возникает в процессе автоматического раздражения клеток миокарда. Это раздражение снижает потенциал покоя до критической пороговой величины, которая для большинства сердечных клеток равна 60 мВ.

Проведение импульсов заключается в последовательном распространении потенциала действия, который возникает под влиянием импульсов, генерируемых синусовым узлом. Импульсы из синусового узла, воздействуя на мембрану клеток, перемещают ионы. После достижения порогового потенциала соседних клеток ионы Na быстро движутся внутрь их. Это движение выражается потенциалом действия, деполяризуя влияющем на соседние клетки в виде цепной реакции. Цитоплазма автоматических клеток, миофибрилы, а так же межклеточная жидкость обладает небольшим электрическим сопротивлением и хорошо проводят электрические (автоматические) импульсы. Между возбужденным (электроотрицательным) и находящимся в покое (электроположительным) участками возникает разность потенциалов. Через клетку проходит ток, который воздействуя на соседние клетки, способствует дальнейшему распространению или проведению биоэлектрического возбуждения. Скорость проведения импульсов зависит от амплитуды потенциала действия, скорости деполяризации, от разницы между диастолическим и пороговым потенциалом.

Чем выше пороговый потенциал и больше разница между диастолическим и пороговым потенциалом в момент возбуждения клеток, тем ниже скорость проведения импульсов.

Скорость проведения импульсов по проводниковой системе и миокарду различна и зависит от структурных и функциональных особенностей различных участков сердца:

1. предсердия - (0.8 - 1) м/с
2. атриовентрикулярный узел - 0.2 м/с
3. пучок Гиса - (0.8 - 1) м/с
4. ножки пучка Гиса - (2 - 4) м/с
5. волокна сократительного миокарда - 0.4 м/с
6. волокна Пуркинью - (2 - 4) м/с

Возбуждение предсердий через проводящие тракты распространяются в 2 - 3 раза быстрее, чем по миокарду предсердий.

IV. Сократимость реализуются функции автоматизма, возбудимости и проводимости. По сути, это интегральная функция сердца.

Сердечная мышца (миокард предсердий и желудочков) образована мышечными клетками, или волокнами (фибриллами). Согласно данным световой микроскопии, эти волокна состоят из множества поперечно исчерченных полосок, называемых миофибриллами, которые прослеживаются по всей длине волокна. Миофибриллы в свою очередь, образованы последовательно повторяющимися структурами - саркомерами. Миофибриллы занимают около половины всей клеточной массы сердца.

Они расположены так, что концы саркомеров примыкают один к другому. Поэтому все волокно под микроскопом выглядит исчерченным. Саркомеры состоят из нитей сократительных белков, взаимно ориентированных.

Из миофибрилл сердечной мышцы выделено три основных сократительных белка: миозин, актин и тропомиозин.

Миозин образует толстые нити, которые состоят из 200 - 300 молекул миозина, лежащих рядом и зигзагосплетенных. При этом шаровидные части молекул находятся латерально, а стержневидные части в центре толстой нити. Полагают, что шаровидные части молекул вдоль нитей образуют участки тянущих "мостиков". Предполагается, что в этих "мостиках" локализуется АТФ-озная активность, а так же механизм взаимодействия миозиновых нитей с актиновыми. Здесь при сокращении генерируется и укорачивается саркомер.

На сокращение и расслабление сердечной мышцы влияет один и тот же фактор – концентрация ионов кальция.

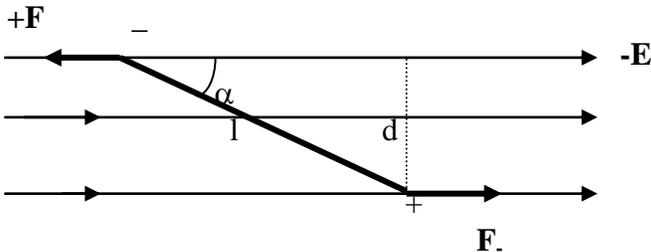
Согласно представлению о механизме скользящей нити, актиновые и миозиновые нити взаимодействуют между собой, не изменяя своей длины, АТФ расщепляется, и между нитями этих белков возникает направленная сила, в результате укорачивается саркомер.

V. Под функцией **тоничности** следует понимать его способность к продолжительной (около 100 лет) функциональной деятельности.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ.

Электрический диполь - это система, состоящая из двух равных, но противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Дипольный момент - вектор, равный произведению заряда на плечо диполя, направленный от отрицательного заряда к положительному. $\mathbf{P} = ql$
Рассмотрим поведение диполя во внешнем электрическом поле.

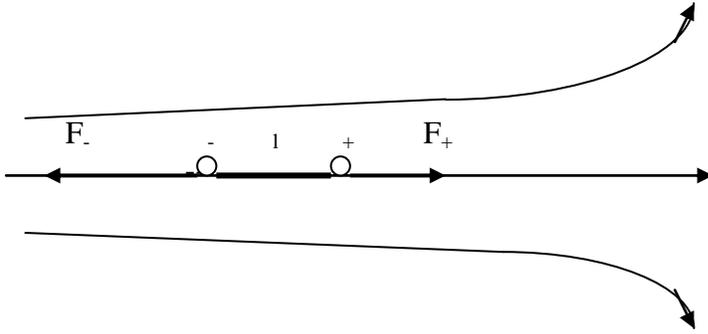


На заряды действуют силы: $\mathbf{F}_- = -q\mathbf{E}$ и $\mathbf{F}_+ = q\mathbf{E}$

Эти силы противоположны и создают момент пары сил: $\mathbf{M} = qlE\sin\alpha$ $\mathbf{M} = PE\sin\alpha$

Вывод: На диполь в однородном электрическом поле действует вращающий момент, зависящий от электрического момента, ориентации диполя в поле и напряженности поля.

II. Диполь в неоднородном электрическом поле.



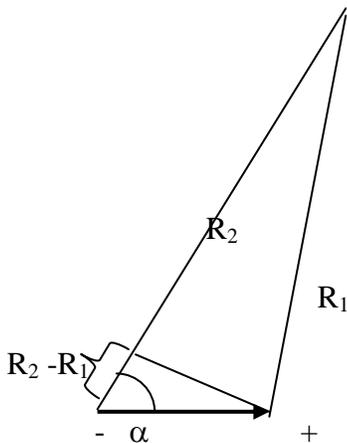
Силы, действующие на диполь: $F_- = qE_-$, $F_+ = qE_+$. Результирующая сила $F = qE_- - qE_+$
Или $F = q(E_- - E_+)$, где $E_- - E_+$ - изменение напряженности вдоль длины диполя.

Тогда $\frac{E_- - E_+}{l} = \frac{dE}{dx}$ $E_- - E_+ = l \cdot \frac{dE}{dx}$ и сила, действующая на диполь $F = P \frac{dE}{dx}$

Вывод: на диполь действует сила, зависящая от его электрического момента и степени неоднородности поля.

Потенциал поля диполя.

Диполь - является источником поля. Рассчитаем потенциал, создаваемый диполем в некоторой точке А.



$$\varphi_A = \varphi_+ - \varphi_-$$

$$\varphi_A = \frac{kq}{\varepsilon R_1} - \frac{kq}{\varepsilon R_2} = \frac{kq(R_2 - R_1)}{\varepsilon R_1 R_2} = \frac{kql \cdot \cos \alpha}{\varepsilon R^2} = \frac{kP \cdot \cos \alpha}{\varepsilon R^2}$$

$$R_2 - R_1 = l \cdot \cos \alpha, \text{ а } R_2 \cdot R_1 = R^2$$

Вывод: потенциал, создаваемый диполем, прямопропорционален $P \cos \alpha$ и обратнопропорционален R^2 .

ТОКОВЫЙ ДИПОЛЬ.

В вакууме или в идеальном изоляторе электрический диполь может сохраняться сколь угодно долго. Однако в реальной ситуации (электропроводная среда) под воздействием электрического поля возникает движение свободных зарядов и диполь либо экранируется, либо нейтрализуется. Можно к диполью подключить источник напряжения, или клеммы

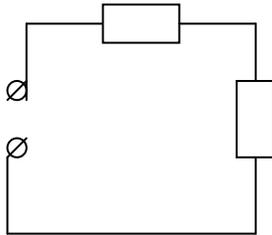
источника напряжения представить как диполь. В этом случае, не смотря на наличие тока в проводящей среде, диполь будет сохраняться.

Двухполюсная система, состоящая из истока и стока тока, называется **дипольным электрическим генератором или токовым диполем**.

При изучении механизма возникновения электрограмм ткани и органы как источники электрического поля представляют в виде эквивалентного электрического генератора. Под ним подразумевается физическая модель, которая должна удовлетворять двум требованиям:

1. расчетные потенциалы электрического поля эквивалентного генератора в разных точках организма должна быть равна реальным, регистрируемым потенциалам.
2. при варьировании параметров эквивалентного генератора должны происходить также изменения его поля, как в реальных электрограммах при соответствующем сдвиге функционирования органа.

Почти во всех существующих моделях электрическую активность органов сводят к действию определенной совокупности токовых электрических генераторов, находящихся в объемной электропроводящей среде. Изобразим эквивалентную схему токового генератора



R - сопротивление среды
r - сопротивление источника

Для токовых генераторов выполняется правило суперпозиции электрических полей:
 " Потенциал поля совокупности генераторов равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых отдельными генераторами."

В этой модели будем считать, что окружающая токовые диполи среда однородна в электрическом отношении, ее удельная электропроводность по всем направлениям одна и та же. В организме окружающая токопроводящая среда имеет конечную протяженность. так как ограничена по поверхности тела изолятором (воздухом).

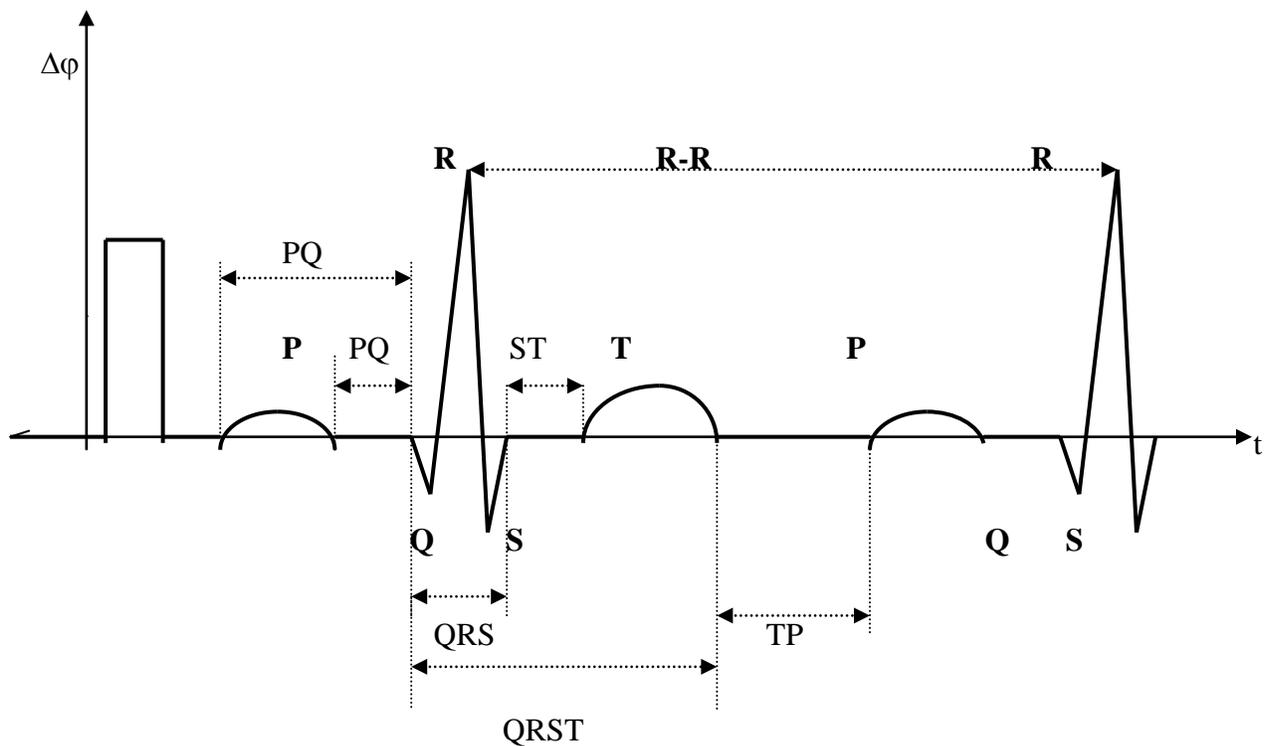
Найдем потенциал электрического поля, создаваемого диполем.

Электрокардиографией называется физический метод регистрации электрической деятельности сердца с помощью усилителя биопотенциалов электрокардиографа (электронного вольтметра).

Теоретическое обоснование метода сводится к идее голландского учёного Эйнтховена о сердце, как электрическом диполе, помещённом в слабопроводящую среду.

Происхождение отдельных элементов электрокардиограммы.

Нормальная ЭКГ имеет 6 зубцов (P, Q, R, S, T, u), три сегмента (PQ, ST, TP) четыре интервала (P-Q, Q-T, R-R, P-P).



1. **Зубец P**- Электрическая активность (деполяризация) предсердий. В норме положительный, регистрирует алгебраическую сумму возбуждений правого (восходящая часть) и левого (нисходящая часть) предсердий.
2. **Интервал P-Q** – отражает состояние сердца в период от начала возбуждения предсердий до начала возбуждения желудочков (от начала P до начала Q). Интервал P-Q – складывается из электрических потенциалов в период деполяризации предсердий и периода распространения возбуждения от предсердий к желудочкам по атриовентрикулярному узлу, пучку Гиса и его ветвям (сегмент PQ). В норме интервал P-Q находится на изоэлектрической линии.
3. **Зубец Q**- отражает деполяризацию межжелудочковой перегородки, направлен вниз.

4. **Зубец R**- соответствует почти полному охвату возбуждением обоих желудочков, это самый высокий зубец ЭКГ- направлен вверх.
5. **Зубец S**- конечный элемент желудочкового комплекса, когда оба желудочка охвачены возбуждением.
Комплекс QRS начальная часть желудочкового комплекса, адекватна фазе полной деполяризации желудочков.
6. **Сегмент S-T** –приходится на период восстановления исходного состояния миокарда после его полной деполяризации, когда нет разности потенциалов.
Сегмент S-T –находится на изоэлектрической линии, хотя желудочки возбуждены.
7. **Зубец T**- зубцом T заканчивается желудочковый комплекс, когда прекращается деполяризация, то есть наступает реполяризация обоих желудочков.
8. **Комплекс QRST (Интервал Q- T)** характеризует электрическую систолу (возбуждение) желудочков и соответствует периоду от начала деполяризации до окончания реполяризации желудочков. Длина (Q- T) зависит от пола человека и числа сердечных сокращений.

Интервал Q- T определяют по формуле **Базетта**:

$$Q-T = k \cdot \sqrt{R-R} \pm 0.04 \quad k=0.39 \pm 0.04 \text{ с}$$

Для суждения об электрической систоле сердца используется систолический показатель:

$СП = \frac{QT}{R-R} \cdot 100\%$ процентное отношение длительности электрической систолы и сердечного цикла.

В норме СП=37-43%- у мужчин

СП=40-46%- у женщин.

СП<50%

По СП можно косвенно судить о сократительной активности миокарда.

9. **Интервал T-P** – отражает фазу покоя сердечной мышцы, в которую не бывает её электрической активности.

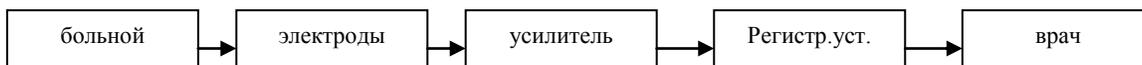
Интервал P-Q лежит на изолинии.

10. **Интервал R-R** определяется между пиками двух следующих друг за другом зубцов R.

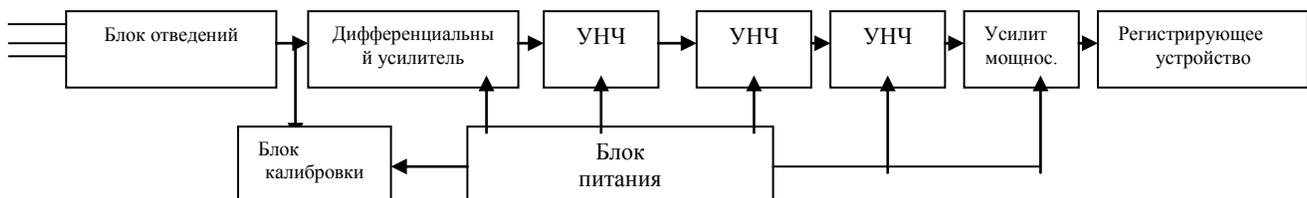
Гармонический спектр от 1 до 80-100Гц.

Электрокардиография- регистрация разности потенциалов меняющейся во времени, обусловленная электрической деятельностью сердца.

Направление движения информации в приборах для регистрации электрических параметров показано на схеме:



Блок-схема ЭКГ.



$$K=10^3-10^4$$

$$R_{вх}=5 \text{ МОм}$$

Уоллер в 1887г впервые зарегистрировал ЭДС сердца человека. Современная форма ЭКГ была получена с помощью чувствительного струнного гальванометра в 1903г Эйтховеном.

Виды ЭКГ.

1. **По числу отведений, регистрируемых одновременно:** (одно- двух –четырёх, шестиканальные).
2. **По виду регистрирующего устройства.**
 - Оптические
 - Чернильно-перьевые
 - Тепловые
 - Электронно-оптические (электрокардиоскоп)
3. **По типу питания:**
 - стационарные
 - Переносные

Основные различия между регистрируемыми биопотенциалами каждого метода:

Биопотенциалы	Диапазон частот в спектре (Гц)	Амплитуда мВ	Коэффициент усиления
ЭКГ	0.5-120(400)	0.1-5	$10^3 - 10^4$
ЭЭГ	1-300(1000)	0.01-0.05	$10^5 - 10^6$
ЭМГ	1-1000(10000)	0.01-50	10^3
ЭГГ	0.01-10	0.1-1	10^3

Из приведённой таблицы видно, что усилители применяемые в каждом методе должны иметь различную полосу пропускания и коэффициент усиления т. е. различное число каскадов усиления.