4. Фазовая структура сердечного цикла

4.1 Фазовая структура ЭКГ

4.1.1. Что такое электрокардиограмма?

Электрокардиограмма отражает энергетические процессы в мышцах сердца, которые определяют их сокращение.

ЭКГ содержит информацию о:

1. Биохимических процессах, определяющих качество сокращения мышц сердца.
2. Временных моментах начала генерации импульсов действия СА и АВ узлов.
3. Длительности во времени фаз сердечного цикла.
4. Амплитуде сокращения мышц сердца.
5. Анатомических изменениях в мышечно-клапанном комплексе.
6. Системных процессах, регулирующих ритм сердечных сокращений.

Энергия сокращения мышц сердца соответствует синусоидальному колебательному изменению во времени. В каждом сердечном цикле количество таких изменений равно 10. Эти изменения называются фазами сердечного цикла. В каждой фазе полное колебание энергии имеет свой максимум и минимум, а также переход изменения энергии от нарастания к затуханию. Эти точки называются «особыми точками». Они определяются с помощью математических правил, основанных на анализе изменения во времени графика колебательного процесса. Особые токи определяются с помощью первой производной (рис. 13):

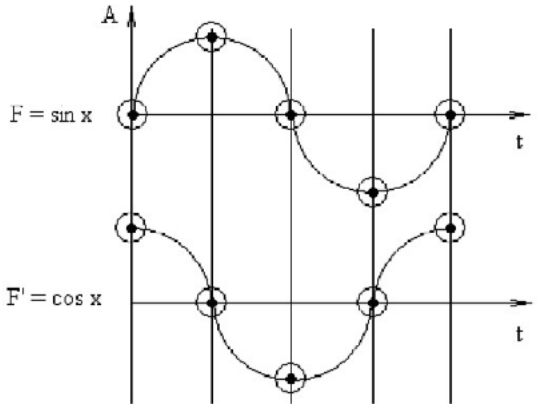


Рис. 13. График синусоидального колебания и его производная

Переходу от нарастания к затуханию энергии соответствует максимум производной, от затухания к нарастанию – минимум производной.

Рис. 14. ЭКГ и ее первая производная. Экстремумы производной соответствуют энергетическим изменениям при сокращении мышц, что соответствует границам фаз на ЭКГ

Максимум и минимум энергии соответствуют моментам перехода графика через «0» графика колебательного процесса.

Границы изменения энергии сокращения соответствуют максимумам или минимумам первой производной. Эти критерии одинаковы для всех десяти фаз сердечного цикла.

4.1.2. Производная функции. Геометрический смысл производной

Определение:

Производная – это скорость изменения функции. На рисунке 15 показаны графики трех функций. Как вы думаете, какая из них быстрее растет?

Ответ очевиден – третья. У нее самая большая скорость изменения, то есть самая большая производная.

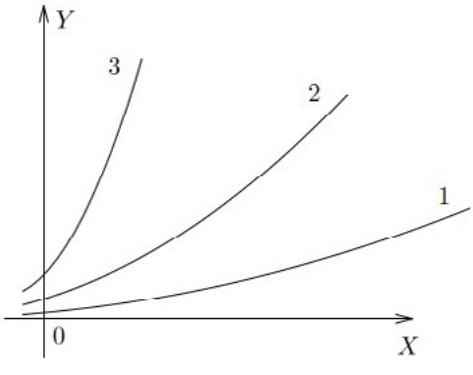


Рис. 15. Графики трех функций 1,2 и 3

На самом деле мы смотрим, насколько круто идет вверх (или вниз) график функции. Другими словами – насколько быстро меняется y с изменением x. Очевидно, что одна и та же функция в разных точках может иметь разное значение производной – то есть может меняться быстрее или медленнее. Это видно из рисунка 14, на котором скорость изменения графика ЭКГ тем больше, чем больше соответствующий экстремум ее производной. Видно, что самая большая скорость изменения в точке S. Амплитуда производной в этой точке максимальная. На ЭКГ это будет соответствовать точке перегиба. Определить «на глазок», без производной, точки перегиба не возможно.

4.1.3. Графическое дифференцирование.

Точки перегиба ЭКГ – критерий нахождения энергетического изменения сокращения мышц.

Математическое дифференцирование используют для анализа любых процессов. Можно получать последовательно несколько производных. В случае анализа ЭКГ достаточно только первой производной, так как именно ее максимумы и минимумы точно соответствуют изменениям энергии сокращения мышц.

4.1.4 ЭКГ как последовательность простых гармонических колебаний.

Рис. 16. ЭКГ как последовательность простых гармонических колебаний

ЭКГ также можно представить в виде последовательно соединенных простых гармонических колебаний (рис. 16). Каждое такое колебание соответствует одной фазе. Границы соединений этих колебаний на ЭКГ соответствуют границам фаз. Именно их определяют с помощью производной.

4.1.5. Расположение фаз сердечного цикла на ЭКГ. Структура сердечного цикла.

Каждый сердечный цикл содержит 10 фаз (рис. 17). В каждой фазе происходит сокращение строго определенных мышц сердца.

Максимальная или минимальная энергия соответствует переходу через «0» производной. Изменение внутри фазы наростания или убывания будет в точке перегиба функции, что на производной соответствует точке максимума или минимума (рис. 18).

Работой сердца управляют два барорецептора, СА и АВ-узлы. «Включение» обоих барорецепторов производится плавным повышением давления на них со стороны камер сердца. На рис. 19 показана условная форма ЭКГ и соответствующие фазам управляющие давления, в том числе и в аорте.

Отмеченное позволяет установить функциональную связь фаз сердечного цикла ЭКГ с сегментами сердечно-сосудистой системы (рис. 20). Из рисунка видно, что фаза j – $T_н$ в диагностическом плане ни к сердцу, ни к аорте не относится.

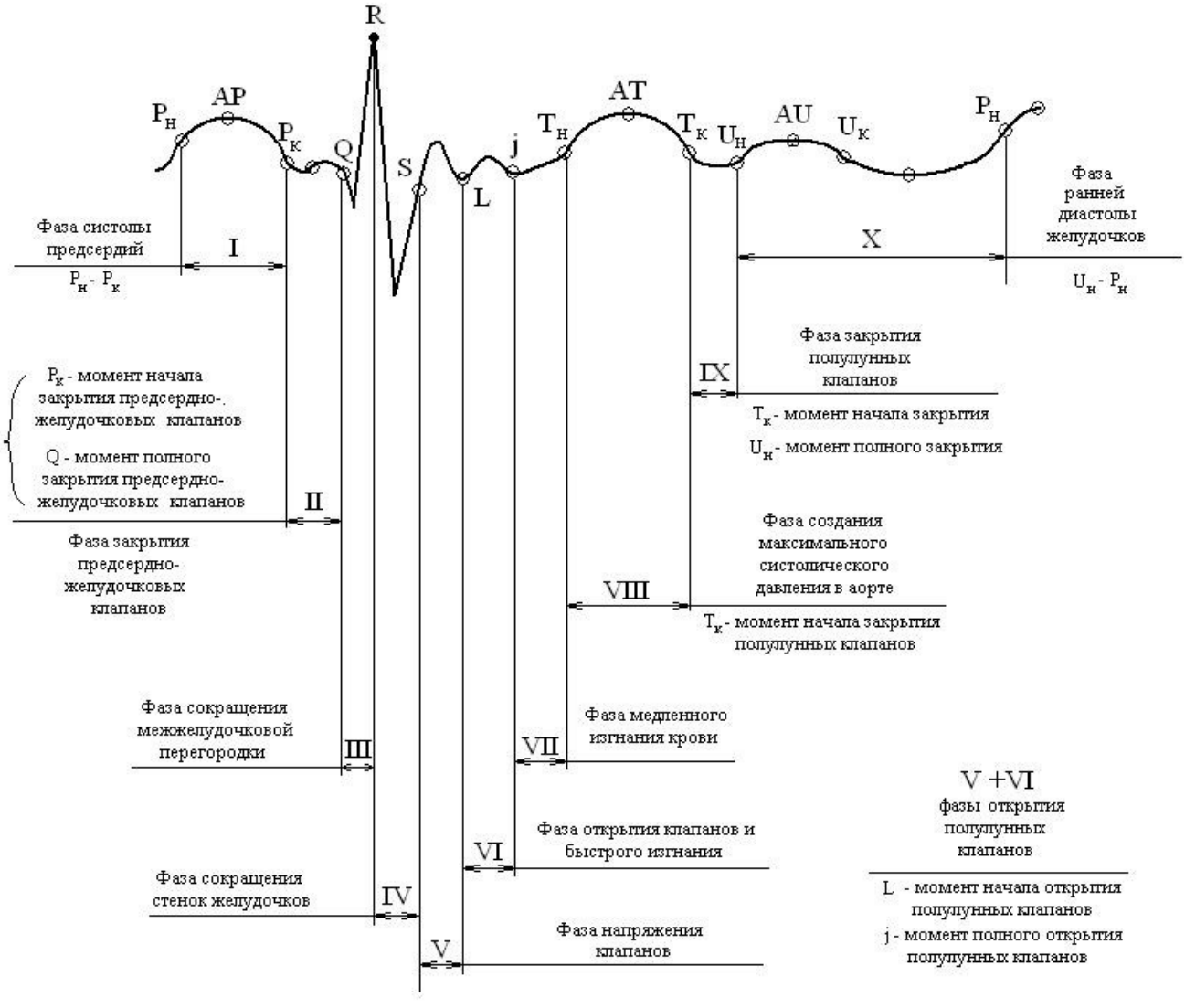


Рис. 17. Структура сердечного цикла на ЭКГ

Рис. 18. ЭКГ и ее первая производная. Экстремумы производной соответствуют границам фаз сердечного цикла (кроме точки R). Точка Z 1 соответствует точки изолинии ЭКГ

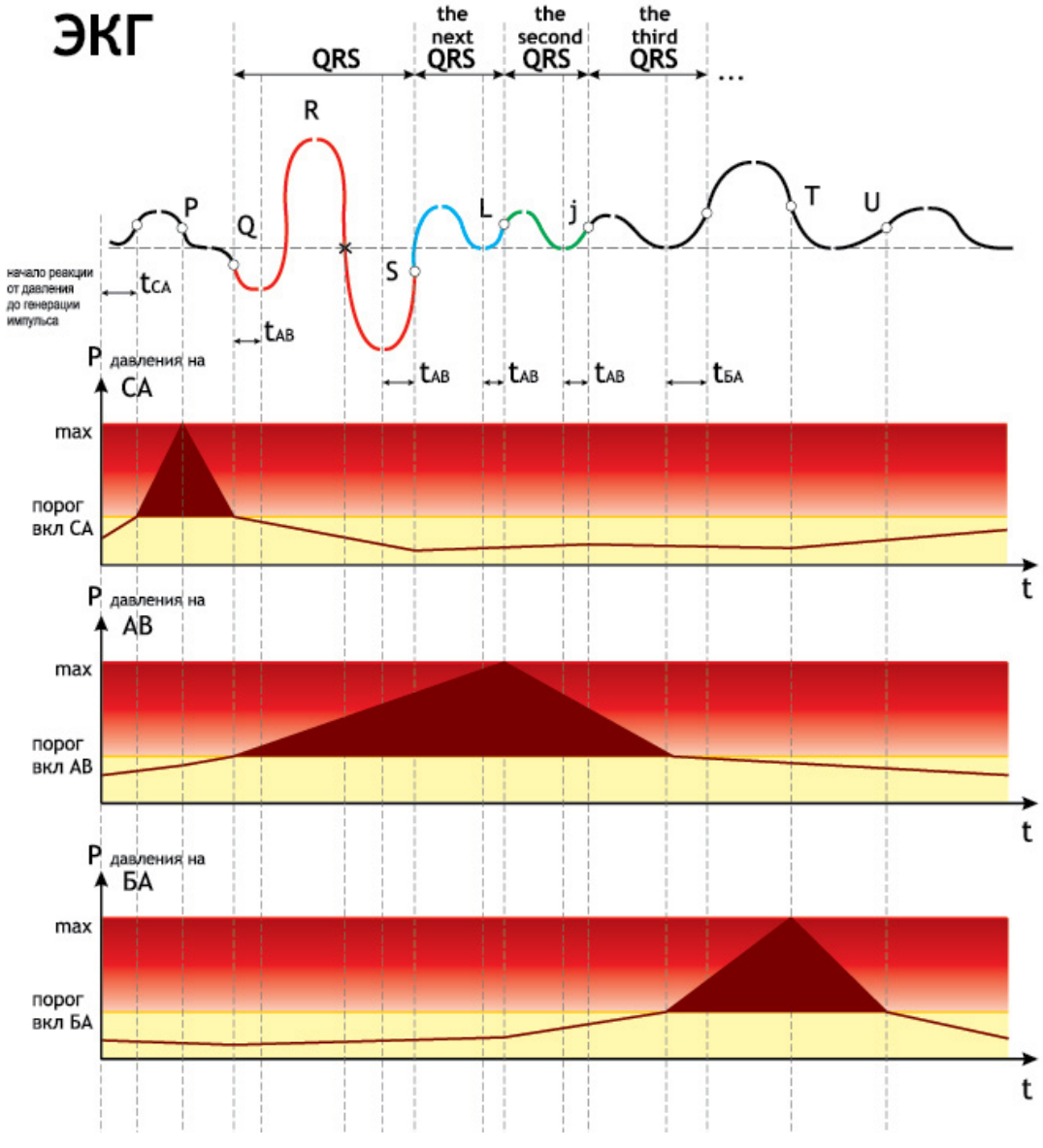


Рис. 19. Связь фаз сердечного цикла ЭКГ с управляющими давлениями на СА и АВ узлы

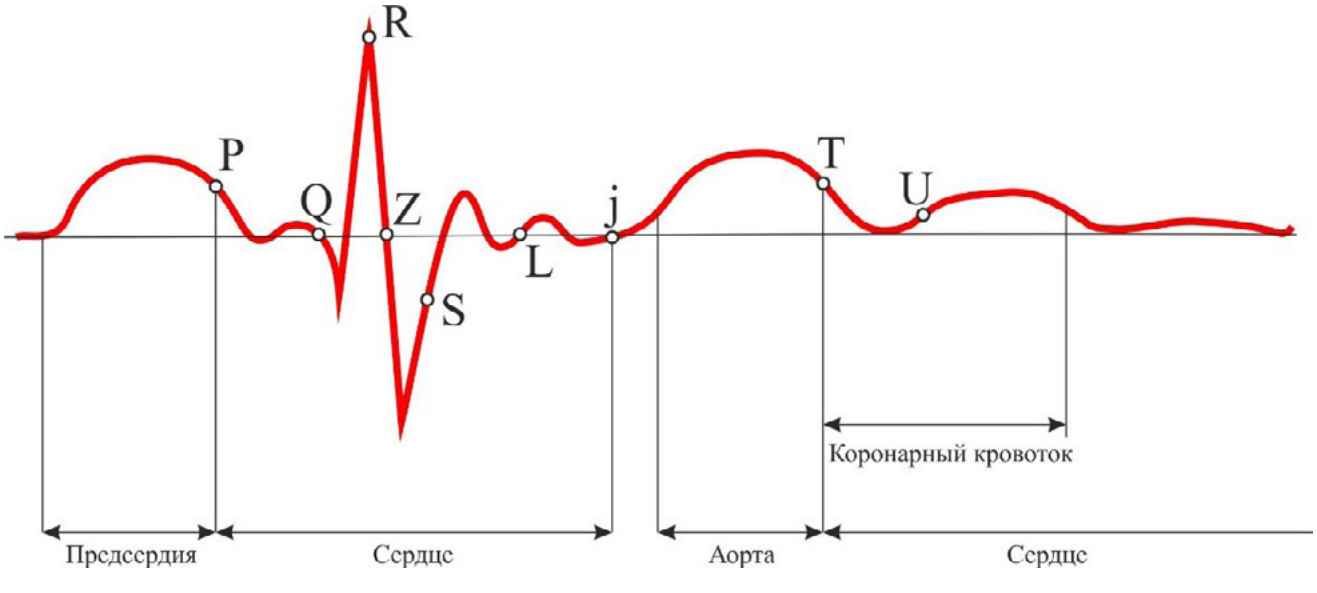


Рис. 20. Связь фаз сердечного цикла ЭКГ с компонентами сердечно-сосудистой системы

4.2 Критерии оценки границ фаз сердечного цикла

4.2.1 Определение точки P

Рис. 21. Точка P соответствует точке перегиба заднего фронта волны P на графике ЭКГ, что соответствует локальному минимуму на графике первой производной от ЭКГ. На производной показаны точки R1 – соответствует точке перегиба на ЭКГ фазы Q – R, и точка Z1 – соответствует точке на ЭКГ через которую проходит изолиния ЭКГ

Точка P на графике ЭКГ соответствует локальному минимуму производной. Или как его еще называют математики – экстремуму производной. На рис. 21 это отчетливо показано. Если это экстремум производной, то на ЭКГ это будет соответствовать точке перегиба.

Точно установить точку перегиба на ЭКГ без графика производной невозможно. Это относится к любым частям ЭКГ. В момент точки P начинают свое закрытие предсердно-желудочковые клапаны. Количество крови, поступаемое в желудочки, снижается. И в момент, соответствующий точке Q, клапаны полностью закрыты. Желудочки наполнены необходимым объемом крови и только теперь давление достаточно, чтобы от него возбудился барорецептор – узел AB, который сгенерирует импульс действия.

Предсердие – это крупный сосуд. Его расширение выполняет функцию насоса, который эффективно создает разность давлений между периферией и сердцем. Эффективность его работы настолько велика, что при любых положениях тела и утере эластичности сосудов, насосная функция гарантировано обеспечивает циркуляцию крови во всем организме.

Необходимо отметить, что точка P достаточно легко определяется как в норме, так и в патологии.

4.2.2 Определение точки Q

Рис. 22. Точка Q определяет начало сокращения межжелудочковой перегородки. На графике первой производной от ЭКГ это соответствует локальному минимуму

Точно также, как и точка P, точка Q соответствует другому локальному минимуму производной. Из рисунка 22 видно, что точка Q располагается перед комплексом QRS.

В отличии от точки P, точка Q не всегда четко проявляется на графике производной. Если на производной экстремум в точке Q не явно проявляется, то его фиксируют по моменту резкого нарастания графика производной в данной фазе.

В точке Q давление на АВ-узел становится достаточным и он начинает генерировать потенциал действия и натрий начинает поступать в клетку. Этот процесс является аэробным и длится до точки S.

4.2.3 Определение точки R

Рис. 23. Точка R определяется по ЭКГ как вершина комплекса QRS, аналогично описанным ранее в различной литературе. Это единственная точка не соответствует критериям фиксации фаз по экстремумам производной

Точка R определяется без производной, как максимум сердечного цикла ЭКГ в норме (рис. 23). Это соответствует классическим понятия кардиологии и не требует каких-либо уточнений. Здесь лишь отметим, что в точке R заканчивается процесс сокращения межжелудочковой перегородки и начинается сокращение мышц миокарда.

Зубец R при потологиях может иметь не очень большую амплитуду, близкую к амплитуде волны T. Может показаться, что увелиена амплитуда T и P волн.

В ряде случаев зубец R вообще может отсутствовать. В этом случае необходимо точку R установить на точке перегиба ЭКГ, на спадающей ее части.

На производной точка R будет соответствовать точке перегиба (рис. 23). Это соответствует правилам графического дифференцирования.

При раздвоении R зубца, правильным будет считаться второй зубец, поскольку в этом случае выполняются правила нормальной гемодинамики.

В точке R заканчивается сокращение МЖП, которое остается до конца систолы до точки $T_к$.

4.2.4. Определение точки S

Рис. 24. Точка S определяется по первому максимуму производной, после минимума Z 1

Точное определение точки S очень важно при расчетах гемодинамики. Нужно заметить, что она точно определяется в 99 % из числа зарегистрированных графиков. Это обстоятельство обеспечивает высокую достоверность и надежность метода. Точка S соответствует максимуму производной, как показано на рисунке 24. В этот момент заканчивается сокращение мышц миокарда. Этот процесс соответствует окончанию вхождения Na^+ в клетку. Также отметим, что сокращение в фазах Q – R – S является аэробным процессом.

Точка S очень важна для определения длительности фазы R – S. В математических уравнениях гемодинамики Г. Поединцева – О. Вороновой

она влияет на величину ударного объема крови. И эта зависимость очень существенна.

Иногда зубец S может иметь небольшие амплитудные колебания. Здесь местоположение точки S определяется по первой волне.

Точка S служит важным элементом согласования ЭКГ и РЕОграммы. Реограмма должна иметь изолинию. Важно, чтобы она соответствовала точке S на ЭКГ (рис. 26). При этом считается, что ранее точки S на РЕОграмме не должно быть отрицательных значений. Если они есть, то это указывает на пропускание аортальным клапаном крови в аорту. Следствием этого будет повышенное диастолическое давление.

4.2.5 Определение точки L

Рис. 25. Точка L определяется по максимуму производной, следующему за максимумом точки S

Точка L соответствует следующему максимуму за точкой S (рис. 25). С этого момента в клетку начинает поступать Ca^{++}, и начинается вторичное сокращение мышц сердца, аналогичное комплексу Q – R – S. Отличие лишь в том, что с этого момента потенциал действия становится равен 0, и сокращение вызвано действием макроэргических фосфатов (электромеханическое сопряжение). Этот процесс анаэробный. В точке L начинается открытие клапана аорты (рис. 26).

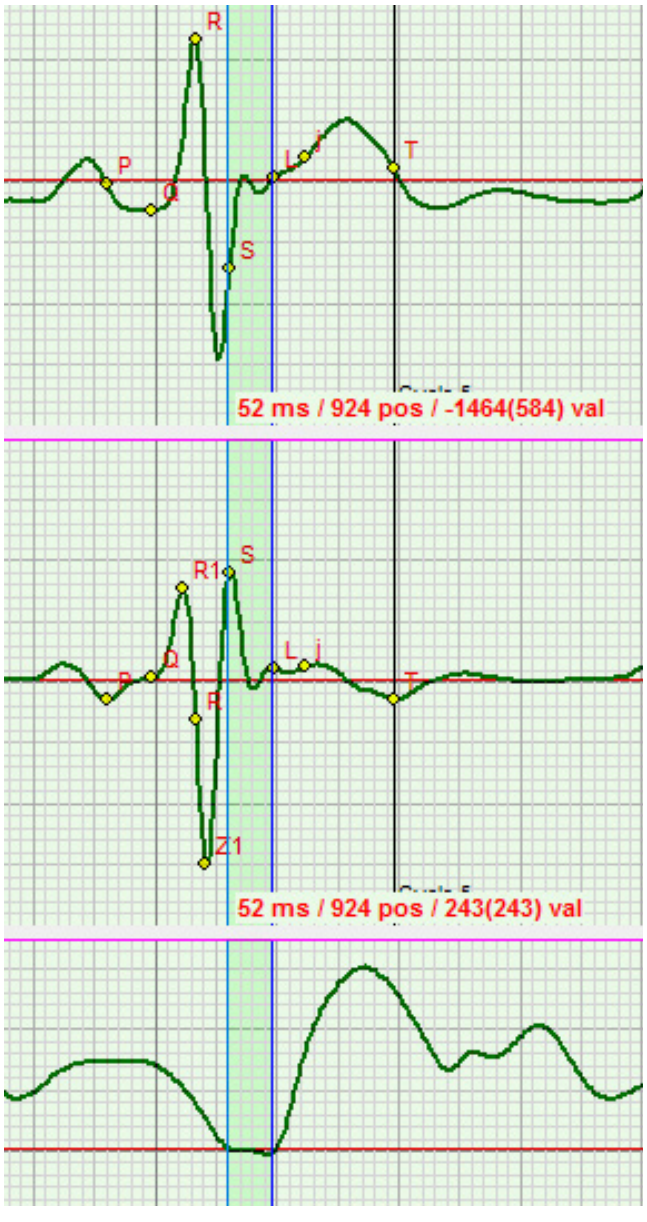


Рис. 26. Точка L соответствует началу открытия клапана аорты. Это фиксируется синхронной записью ЭКГ и РЕОграммы

На практической ЭКГ точку L возможно определить только с помощью производной.

Точка L – начало фазы быстрого изгнания, которая заканчивается в точке j. РЕОграмма в норме начинает свой рост именно в точке L.

В зависимости от разности давлений в аорте и желудочке может наблюдаться более ранний подъем или его задержка. На РЕО в первом случае будет рост до точки L ниже изолинии или будет «ступенька».

Ранее точка L не была введена в рассмотрение. Учитывая важность оценки момента открытия клапана аорты, авторы были вынуждены ввести его обозначение.

Споров в выборе точки не возникло. Было решено назвать точку в честь имени Ларисы Руденко. Она много сделала для практической реализации научных исследований и принимала активное участие во всех этапах развития проекта. На практике рассмотрение каждого конкретного случая начинается с анализа процессов в точке L, до и после нее.

Это указывает на необходимость синхронного рассмотрения ЭКГ и РЕОграммы в точке L.

Расширение аорты и качество сокращения мышц сердца функционально отражается на РЕОграмме. Так, на практике важно анализировать форму S – L волны, т.к. она связана с количеством кальция в сердечных мышцах.

4.2.6. Определение точки j

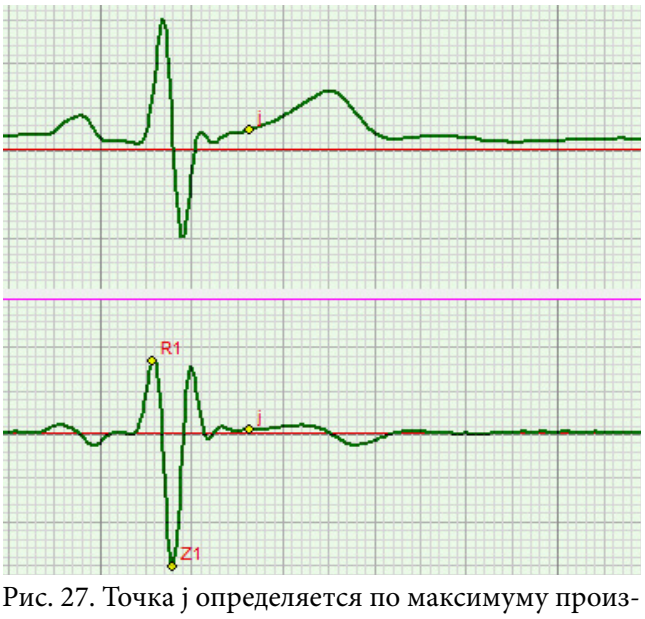


Рис. 27. Точка j определяется по максимуму производной, следующему за максимумом точки L

Точка j соответствует следующему максимуму за точкой L (рис. 27). С этого момента из клетки начинает выходить K^+, и начинается третье сокращение мышц сердца, аналогичное комплексу Q – R – S. При этом потенциал действия продолжает оставаться равен 0. Как и в предыдущей фазе, сокращение вызвано действием макроэргических фосфатов (электромеханическое сопряжение). Этот процесс анаэробный.

В период от точки j до начала волны $T_н$ объем крови распределяется по восходящей аорте.

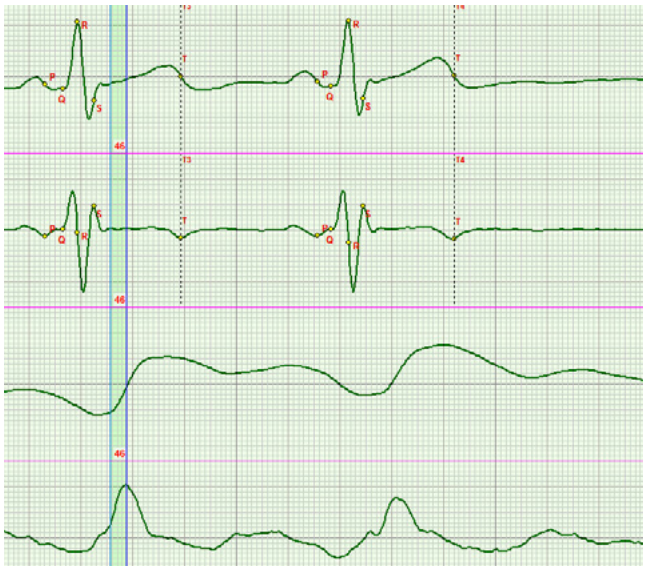


Рис. 28. Точка j соответствует точке перегиба переднего фронта РЕОграммы. Производная РЕОграммы в этот момент максимальна

4.2.7. Определение точки T

Рис. 29. Волна T относится только к оценке работы аорты и никак не связана с работой миокарда

Волна T относится только к оценке работы аорты и никак не связана с работой миокарда. От точки j до точки T располагается фаза медленного изгнания. Она имеет свою структуру. Нужно время, чтобы объем распределился по длине аорты. Только после того, как давление на барорецепторы аорты становится достаточным, начинается генерация волны T. По ее амплитуде на ЭКГ оценивают ее растяжение

Рис. 30. Инверсия волны Т при малых объемах крови в аорте

в диаметре, которое необходимо для поддержания структуры кровотока и его транспортировки на периферию. Давление на барорецепторы аорты может регулироваться как ее эластичностью, так и объемами крови. Это будет приводить к меньшей амплитуде волны Т, вплоть до ее инверсии и задержке генерации (рис. 30).

4.2.8. Волна U и соответствующая ей точка U

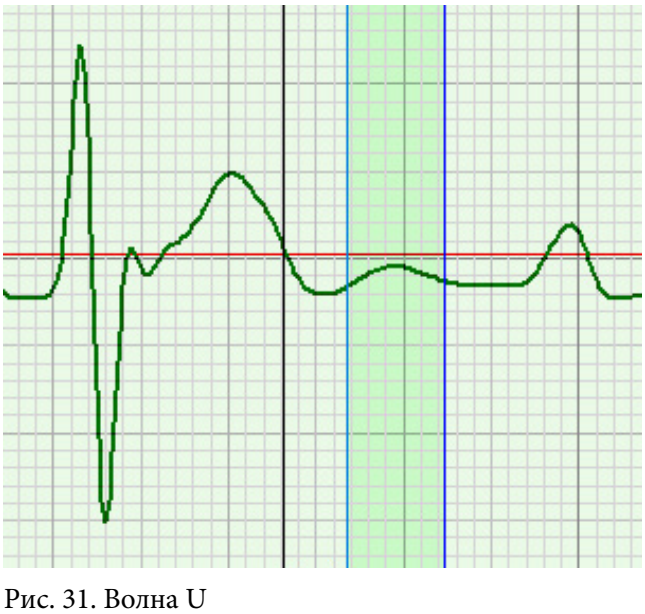


Рис. 31. Волна U

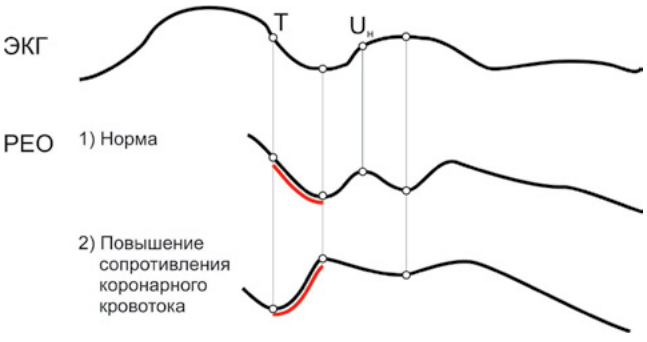


Рис. 32. Различные формы РЕО в периоде наполнения коронарных артерий Т – $U_н$. В зависимости от сопротивления коронарных артерий изменяется угол наклона РЕО в данном периоде

Волна U располагается в фазе ранней диастолы. В кардиометрии ее не принято выделять в отдельную фазу. Однако, с ней связано наполнение коронарного кровотока. На рисунке 32 участок закрытия клапана аорты подчеркнут.

Волна U входит в фазу Т – Р ранней диастолы.

Очень важна форма РЕОграммы в интервале $T_к$ – $U_н$ (рис. 32). Это время закрытия клапана аорты и открытия устья коронарных артерий. Здесь РЕОграмма должна иметь равномерный спад, что будет указывать на нормальное заполнение кровью коронарных артерий. При увеличении частоты сердечных сокращений наблюдается сближение волн Т и Р. При этом волна U все равно прослеживается на спаде волны Т.

4.2.9 Расположение всех точек на ЭКГ

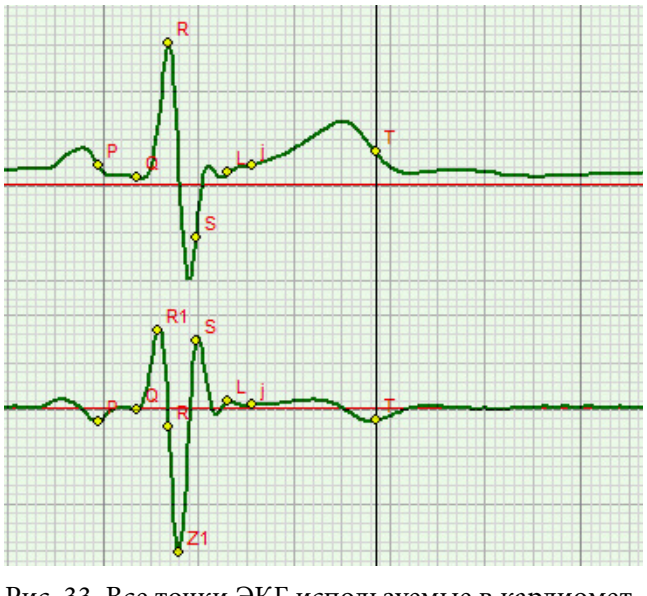


Рис. 33. Все точки ЭКГ используемые в кардиометрии при расчетах гемодинамических параметров

Общее обозначение всех точек ЭКГ, используемых в кардиометрии представлено на рисунке 33.

Представленная ЭКГ относится к типовой для нормального состояния сердечно-сосудистой системы. Важно знать критерии нахождения особых точек и практически находить их на любой ЭКГ. Отметим их еще раз: P, Q, R, S, L, j, T. Точное определение точек возможно только с помощью производной. На ЭКГ они располагаются в точках перегиба, что на производной соответствует ее экстремумам (рис. 33). Это правило не распространяется на точку R.

На практике, пользуясь прибором «Кардиокод», после записи ЭКГ, необходимо проверить правильность их автоматического определения.

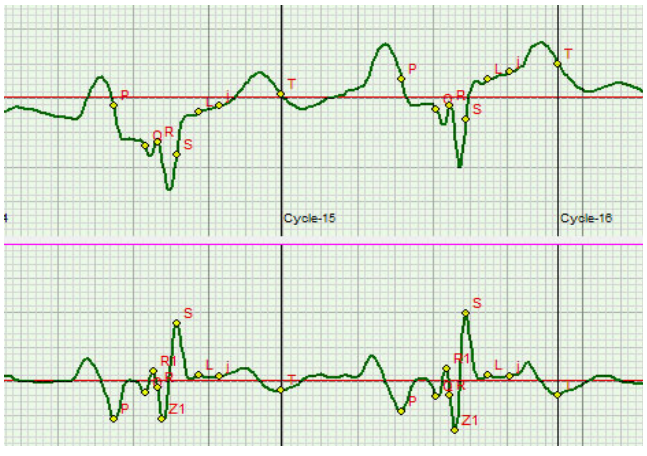
При выявлении ошибок, следует их устранить и сохранить проверенный вариант в базе данных компьютерной программы.

Встречаются ЭКГ с отсутствием P волны. Здесь необходимо точку P расположить рядом с точкой Q. Это бывает при экстрасистолии и при перенапряжении предсердий. В последнем случае можно определить точку P, но она будет неявно выражена.

4.2.10 Примеры оценки границ фаз на ЭКГ

а) Относительно нормальная форма ЭКГ

Разнообразие форм ЭКГ велико. Выделить эталонную не представляется возможным. Далее представлены формы, наиболее часто встречающиеся на практике (рис. 34).



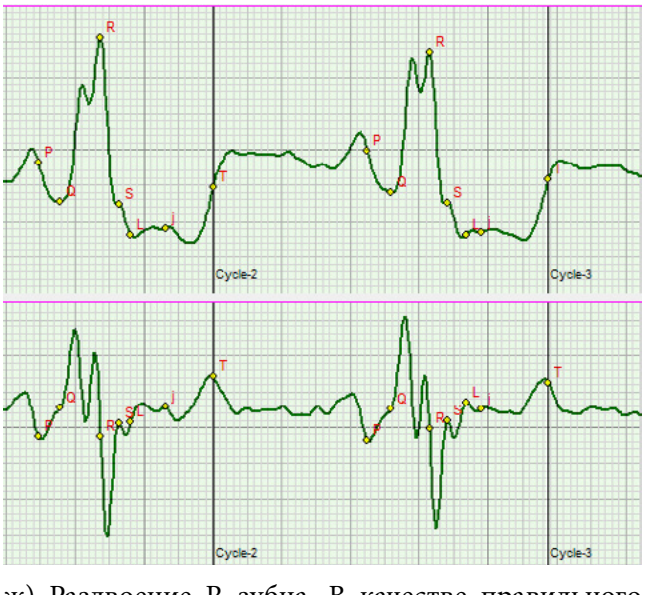
б) Форма ЭКГ при малых амплитудных сокращениях МЖП

в) Форма ЭКГ при малых амплитудных сокращениях миокрада и при М-образной производной фазы P–Q

г) Форма ЭКГ при неявно выраженном зубце Q

д) Форма ЭКГ при наиболее выраженной волне T

е) отсутствие P волны при экстрасистолии



ж) Раздвоение R зубца. В качестве правильного критерия выбирают второй зубец

з) Отсутствует R зубец. Выбирают минимум производной

и) Модуляция R зубца дыханием

Рис. 34. Примеры практического определения критериев границ фаз сердечного цикла с помощью первой производной от ЭКГ

4.3 Фазовая структура РЕОграммы

4.3.1 Физические основы регистрации РЕОграмм

Если ЭКГ отражает подготовительные процессы формирования гемодинамики, то реография отражает результат работы сердечно – сосудистой системы. В диагностическом плане это очень информативно. Синхронно записанные ЭКГ и РЕО позволяют оценить физиологические процессы всей гемодинамики. Поэтому в кардиометричеком фазовом анализе эти два сигнала рассматриваются всегда вместе.

РЕОграмма такой же кардиосигнал, как и ЭКГ. Отличие в том, что он отражает кровенаполнение зон тела, находящихся между электродами. Кровь, как и любая жидкость, обладает электрическим сопротивлением. Электроды прибора невозможно расположить в непосредственном контакте с кровью. Да и в этом нет смысла. Важно регистрировать ее движение в теле, не влияя на это. Поэтому, удобно использовать не постоянный измерительный ток, а переменный. Для этого используют генератор частоты на уровне 100 кГц. Электроды располагают на теле таким образом, чтобы исследуемая часть тела располагалась между ними. Сигнал с генератора проникает глубоко в ткани, в том числе и в кровь. Кровь, изменяя свою проводимость от изменения объема пульсирующей части крови, будет влиять на сигнал генератора. Генератор сконструирован по принципу генератора тока. Это значит, что он будет поддерживать в цепи нагрузки постоянный так. Изменение проводимости при постоянном токе будет отражаться в амплитуде сигнала, а она будет соответствовать форме пульсовой волны. В физике это отражает закон Ома:

$$I=U/R$$

где: I – ток;

U – напряжение;

R – сопротивление.

Для переменного тока R является комплексным сопротивление $Z = Re^{-i\delta}$ или электрическим импедансом.

Если между электродами ток постоянный, то для удобства регистрации изменения импеданса располагают еще два электрода, с которых снимают модулированный кровотоком сигнал. Далее его детектируют, выделяя низкочастотную огибающую, соответствующую форме пульсовых колебаний крови.

В кардиометрии, синхронно с РЕОграммой, регистрируют ЭКГ. Такая схема представлена на рис. 35.

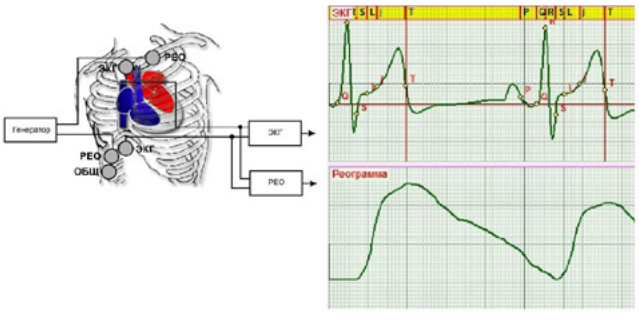


Рис. 35. Синхронная регистрация ЭКГ и РЕОграммы, используемая в кардиометрии

Синхронная запись ЭКГ и РЕОграммы несет всю необходимую информацию о гемодинамике. Это следует из того, что ЭКГ отражает все подготовительные процессы формирования структуры кровотока и его поддержания в сосудах, а РЕОграмма является результатом подготовительных процессов. Более образно можно сказать: имеем информацию о том, «что и как делали и что получилось».

В фазовом анализе важно синхронизировать ЭКГ и РЕОграмму. Здесь «синхронизация» понимается как определение изолинии РЕОграммы. Это связано с тем, что способ регистрации РЕОграммы с использованием переменного тока не фиксирует постоянную составляющую, которая несет информацию об исходном артериальном давлении. Поэтому, есть смысл более подробно рассмотреть принцип синхронизации.

4.3.2 Синхронизация изолинии РЕОграммы в точке S ЭКГ.

Работа сердечно-сосудистой системы делиться на две части: систолу и диастолу. Систола делится также на две части: до открытия клапана аорты и после него. Важно фиксировать начало открытия клапана. Учитывая, что РЕОграмма

является результатом работы сердца, важно точно знать, в какой момент кровь начинает поступать в аорту.

В классической кардиологии этому моменту уделяется особое внимание. Используют аускультативный метод определения. Достаточно, отметить, что символом врача является фонендоскоп, прибор для выслушивания тонов сердца, возникающих при движении крови. Однако, для фазового анализа такой метод обладает большой погрешностью.

В кардиометрии точно определен момент открытия клапана аорты, который соответствует точке L на ЭКГ. Точку L авторам кардиометрии пришлось вводить самим, так как ее нет на классической ЭКГ. В этот момент РЕО грамма должна начать свой подъем, что говорит о начале выхода крови в аорту. Это начало фазы быстрого изгнания. На этот процесс могут повлиять много факторов, которые позволят ранее попасть крови в аорту, или, наоборот, позже открыть клапан. Поэтому, целесообразно иметь изолинию РЕОграммы в точке S ЭКГ, так как в идеале, в фазе S – L, кровь вообще не должна двигаться. Любые ее изменения, как естественного, так и патологического характера, будут отмечены до и после открытия клапана аорты.

Рис. 36. Синхронная запись ЭКГ и РЕОграммы. Изолиния РЕО соответствует точке S ЭКГ

На рис. 36 показана синхронная запись ЭКГ и РЕОграммы. Такой способ выбора изолинии РЕОграммы не позволяет измерять абсолютное значение артериального давления, но он очень информативен для оценки его динамического изменения. С его помощью фиксируется диапазон нормального изменения давления в аорте и выход за его пределы.

4.3.3 Фазовые характеристики РЕОграммы

Фазовые изменения РЕОграммы аорты

№	Фаза РЕО	Предназначение	Возможные изменения формы РЕО	Причина изменений	Последствия изменений
1.	Фаза L – j быстрого изгнания	Формирование структуры кровотока в виде концентрических колец из элементов крови в скоростных слоях	1.Задержка роста АД. 2.Малая амплитуда АД в конце фазы (рис. 37)	1. Слабость сокращения мышц сердца. 2. Нарушение целостности МЖП. 3. Увеличенное расширение аорты	Уменьшение числа колец из элементов крови в кольцеобразной структуре кровотока, в следствии чего, не попавшие элементы оказываются в слоях плазмы, имеющих меньшую скорость смещения вдоль сосудов, и в результате оседают на их стенках (причина тромбообразования)

№	Фаза РЕО	Предназначение	Возможные изменения формы РЕО	Причина изменений	Последствия изменений
2.	Фаза j – $T_к$ медленного изгнания. SV, мл., Ps АД	1. Создание величины систолического давления. 2. Обеспечение объемов крови в аорте для нормального заполнения коронарных артерий	Снижение угла наклона графика РЕО (рис. 38)	1. Снижение объемов углекислого газа в крови. 2. Расширение аорты, и как следствие, ранний рост диастолического давления, приводящий к его значительному повышению. 3. Малая разность давления между желудочком и аортой	1. Снижение систолического давления 2. Снижение объемов крови в начальной стадии заполнения коронарного кровотока
3.	Наполнение коронарного кровотока в период $T_к$ – $U_н$ в фазе ранней диастолы	Заполнение кровью коронарных артерий	Изменение угла наклона графика РЕО в диапазоне от отрицательного до положительного (рис. 39)	Сужение коронарных артерий на различных уровнях	1. Причина инфаркта миокарда. 2. Снижение сократительной функции МЖП и миокарда
4.	Фаза $T_к$ – $P_н$ ранней диастолы. PV1, мл.	Наполнение кровью желудочков. Обеспечение гемодинамики венозного кровотока	Изменение угла наклона графика РЕО в диапазоне от отрицательного до положительного (рис. 40)	1. Слабое расслабление мышц сердца. 2. Высокое сопротивление течению венозного кровотока.	Дополнительная нагрузка на предсердия, необходимая для закрытия предсердно-желудочкового клапана
5.	Фаза $P_н$ – $P_к$ – Q систолы предсердия PV2, мл.	Закрытие предсердно-желудочковых клапанов	Существенных изменений формы РЕО не наблюдается (рис. 41)		
6.	Период регулировки диастолического АД R – S – L	Нормализация минимального АД в каждом сердечном цикле	Начало подъема графика ранее, точки L (рис. 42)	1. Расширение аорты, и как следствие, ранний рост диастолического давление, приводящий к его значительному повышению	Повышение минимального АД

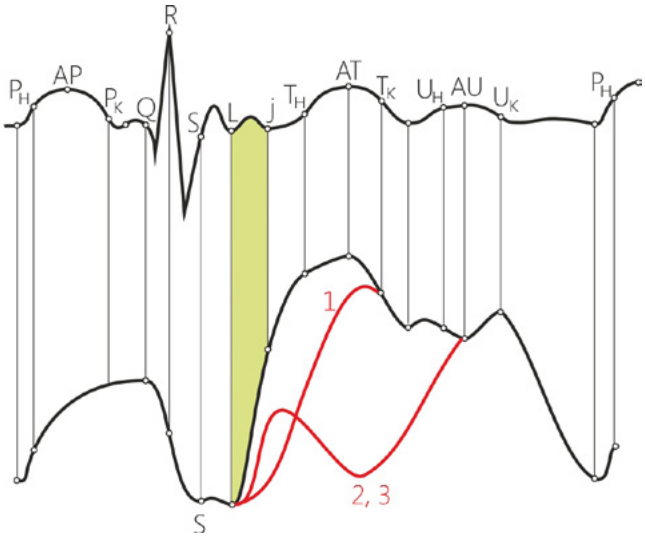


Рис. 37. Фаза быстрого изгнания L – j

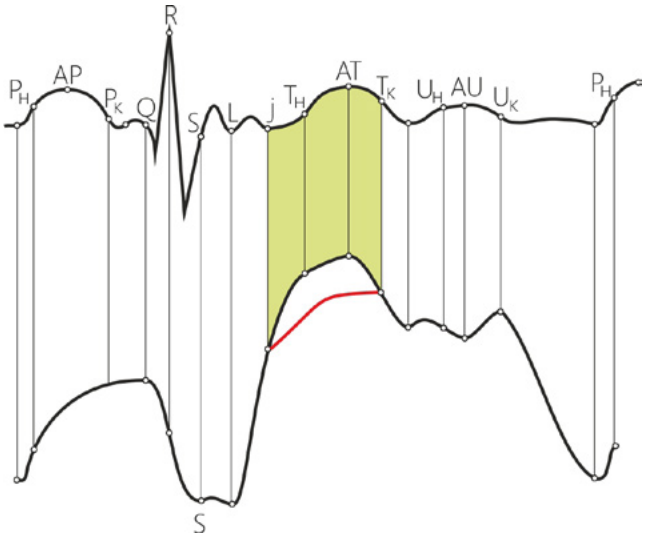


Рис. 38. Фаза медленного изгнания j – $T_к$

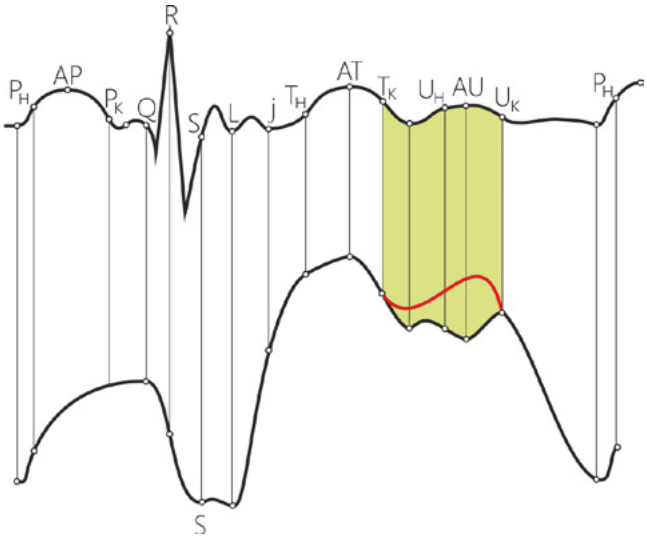


Рис. 39. Наполнение коронарного кровотока в период $T_к$ – $U_к$ в фазе ранней диастолы

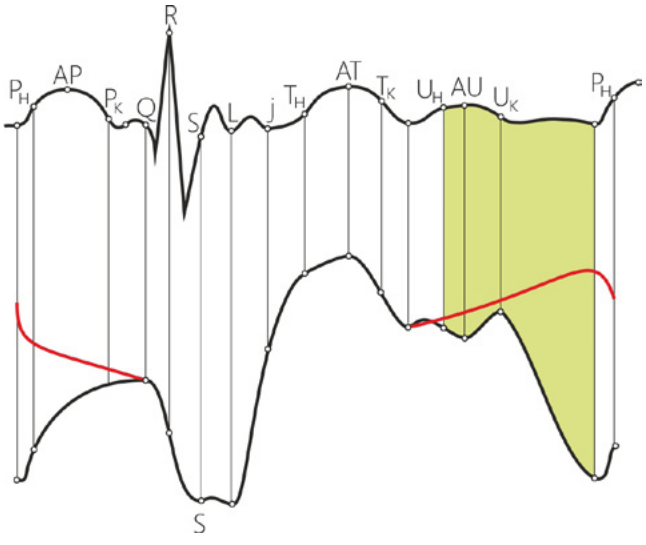


Рис. 40. Фаза ранней диастолы $T_к$ – $P_н$

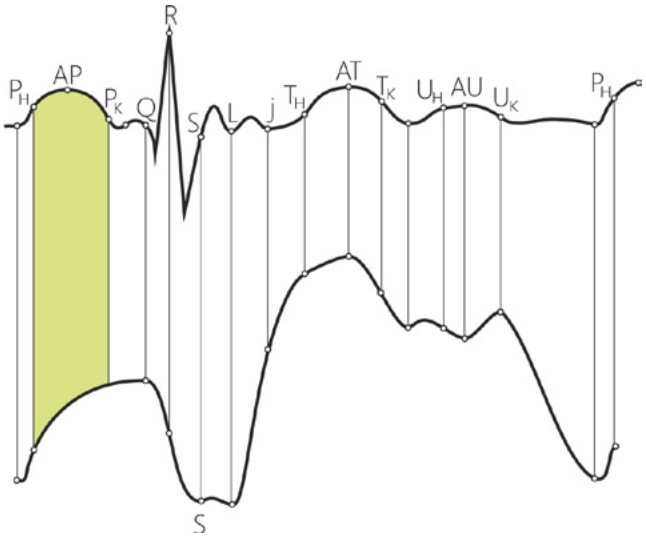


Рис. 41. Фаза систолы предсердия $P_н$ – $P_к$

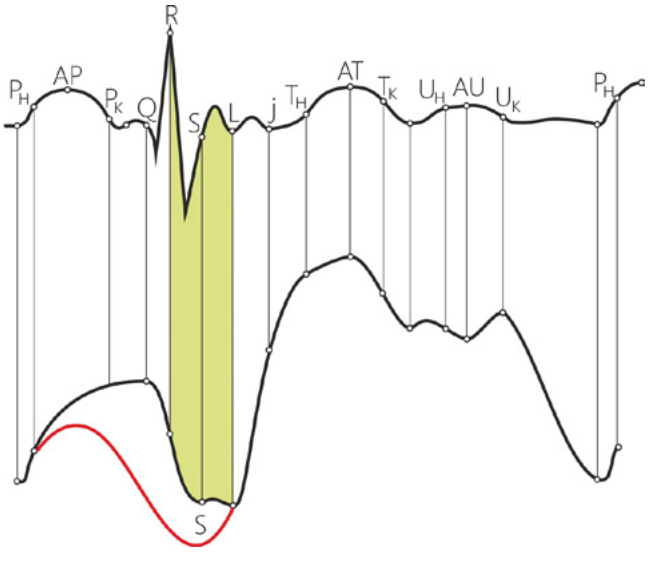


Рис.42. Период регулировки диастолического АД, R – S – L