

3.4. Нелинейна филтрация за премахване на мрежови смущения в ЕКС

Ще разгледаме по-подробно една много ефективна нелинейна цифрова процедура (филтър) за премахване на мрежови смущения от ЕКС. Тя е предложена от автора съвместно с Г. Михов, Р. Иванов и Ив. Даскалов. Два възможни алгоритъма на процедури от този клас са описани по-подробно в работата на Г. Михов, 1981. Възможностите на процедурата са демонстрирани на Фиг. 3.26, където тя е приложена върху ЕКС на 8-те първични стандартни ЕКГ отвеждания във втората половина на епохата. Смущенията практически се премахват напълно, без да се влияе на основния ЕКС.

3.4.1 Основен алгоритъм.

В основата на нелинейната процедура стоят две линейни операции.

1) Пълзящо усредняване по $N = (2k+1)$ или $2k$ точки. Това е НЧ филтър от типа КИХ, описан подробно в параграф 3.3.1., който има гребенчата характеристика с нули в предавателната функция на честоти, кратни на $1/NT$, където T е периодът на дискретизация. Ако нулите на $H(j\omega)$ съвпадат с хармоничните на мрежата, то този филтър ще елиминира ефективно и мрежовите смущения. Това условие е изпълнено, когато честотата на дискретизация на ЕКС е кратна на мрежовата честота. Честотната характеристика на филтъра се дава с формулата (3.21). В зависимост от това, дали N е четно или нечетно, формулите за предавателната функция леко се различават, но общо амплитудната характеристика има вида, показан на Фиг. 3.20а.

2) Търсене на разлика от втори порядък (еквивалентна на втора производна), като критерий за нелинейност на участък в околността на точка $X(n)$ от ЕКС.

$$D = [X(n+k+1) - X(n-k)] - [X(n+k) - X(n-k-1)] \quad (3.38)$$

където $N = 2k+1$ е броят на точките, по които се прави пълзящо усредняване (3.21). z - предавателната характеристика на 3.38 е:

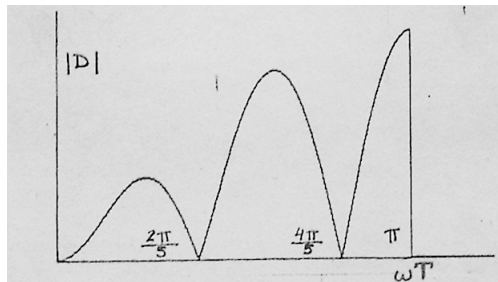
$$D(z) = z^{-(k+1)} - z^k - z^{-k} + z^{k+1} \quad (3.39)$$

Поради симетричността на импулсната характеристика, честотната

характеристика се намира по метода описан в п.3.3.1 :

$$D(\omega) = 2\cos(k+1)\omega T - 2\cos k\omega T \quad (3.40)$$

Амплитудно-честотната характеристика $D(\omega)$ за случай на $N=2k+1=5$ е показана на Фиг. 3.27. Важно свойство на този критерий е, че той има нули на честоти, кратни на $1/(2k+1)T$.



Фиг. 3.27

Основната идея при реализацията на нелинейния филтър е следната. В ЕКС се търсят участъци, които да удовлетворяват някакво евристично условие за линейност на базата на втората разлика D . В тези участъци текущото усредняване не променя ЕКС, но премахва периодичните мрежови смущения. Благодарение на това става възможно определянето на стойностите на N точки от мрежовото смущение, които напълно го определят. Информацията, получена от тези N точки е достатъчна, за да бъде премахнато периодичното смущение от всяка друга точка на ЕКС, която не отговаря на условието за линейност.

Ценно качество на тази процедура е, че тя предлага един еднотипен алгоритъм, който не зависи от свойствата на сигнала. Сигналът може да е ЕКС, но може да бъде и всякакъв друг сигнал, стига в него да има участъци, които да удовлетворяват условието за линейност.

Процедурата ще оказва минимално влияние върху ЕКС благодарение на нелинейния алгоритъм – точките, в които е разрешено усредняване и изчисляване на стойностите на смущението, са съобразени с параметрите на сигнала.

По-надолу даваме един възможен алгоритъм за реализация на процедурата.

1. Всяка дискрета $X(n)$ от ЕКС принадлежи към някоя от фазите от 0 до $N-1$. Фазата на произволна дискрета $X(n)$ се определя от остатъка (n/N) .

2. Започвайки от началото, в ЕКС се намират най-близките N

дискрети с фази от 0 до $N-1$, за които е изпълнено условието за линейност D .

3. В тези дискрети се изчисляват N стойности от периодичното смущение с последователни фази от 0 до $N-1$ и се запомнят в регистър с дължина N (амплитудата на смущението в дискрета n е равна на разликата между $X(n)$ и нейната средна стойност по N околни точки).

4. Започвайки от началото на епохата на ЕКС, за всяко $X(n)$ се проверява условието за линейност D .

5. Ако условието е изпълнено, $X(n)$ се заменя със средната стойност от N съседни точки. Изчислява се амплитудата на смущението в тази точка и се записва като нова стойност в съответната фаза на регистъра.

6. Ако условието за линейност не е изпълнено, то от $X(n)$ се изважда стойността на смущението със съответната фаза, взета от регистъра и резултатът се записва на мястото на $X(n)$ като нова филтрирана стойност.

3.4.2 Избор на оптимален критерий за линейност.

Първоначално ще изследваме два евристични критерия за линейност в околността на точка $X(n)$ от ЕКС.

Критерий (а): $D_a < k$, където D_a се изчислява като абсолютна стойност на (3.38).

Критерий (b): $D_b < k$, където:

$$D_b = |\max[dX(n-2k-1), \dots, dX(n)] - \min[dX(n-2k-1), \dots, dX(n)]| \quad (3.41)$$

тук $dXn = [X(n) - X(n+2k+1)]$ и k е емпирично определена константа.

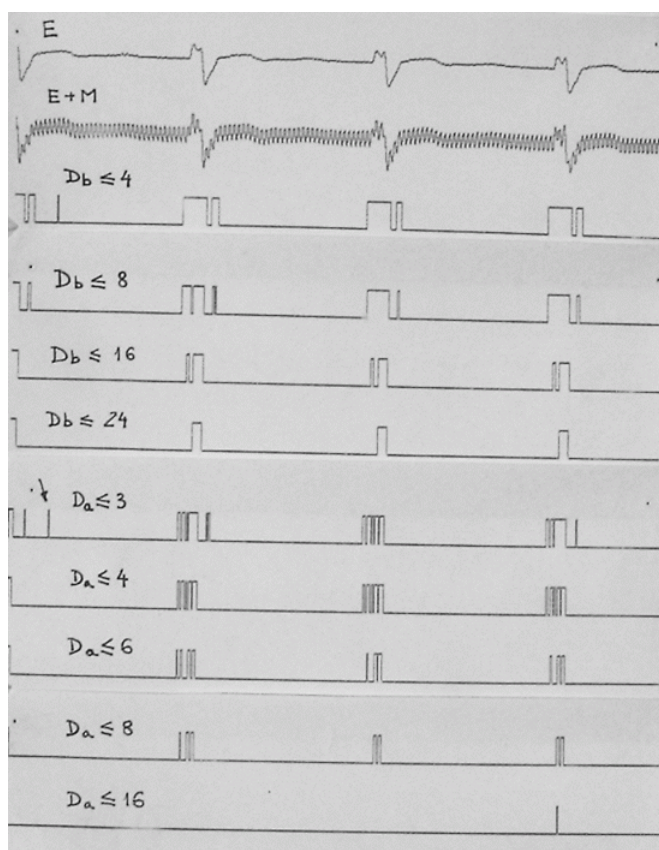
Теоретично е трудно да се оцени ефективността на предложените условия за линейност, но някои общи съображения ни сочат, че условието D_b е по-силно. Смисълът на условието D_b е да гарантира линейност не само в околността на една точка от ЕКС, а в околността на цяла област с ширина $N = 2k+1$, равна на цял период на смущението.

Изследването на критериите D_a и D_b е извършено върху реални ЕКС от цифровата база електрокардиографски данни. Честотата на дискретизация е 250 Hz и теглото на най-младшия разряд е 20 μV приведено към входа.

Експерименталното изследване трябва да отговори на два въпроса: доколко критериите за линейност са адекватни на

поставената задача и какви са оптималните стойности на константата k при зададените параметри на дискретизация. Трябва да се направи уговорка, че стойността на избраната оптимална константа k зависи от честотата на дискретизация и теглото на най-младшия разряд на АЦП. Би трябвало стойността на константата k да се дава в дименсия $[\mu\text{V}/\text{ms}^2]$, доколкото критерия за линейност D е до известна степен втора производна на ЕКС по времето.

На Фиг. 3.28 е даден представителен запис на процедурите, извършени върху едно отвеждане. На най-горния ред е оригиналният ЕКС E . На втория ред същият сигнал е сумиран с умерено периодично



Фиг. 3.28

мрежово смущение M . Върху втория сигнал $E + M$, за всяка точка е извършена проверка за линейност. Резултатите от проверката са дадени на долните графики. Ако критерият за линейност е изпълнен, състоянието е 0 (ниско ниво), иначе състоянието е 1 (високо ниво). По този начин ясно се маркират с 1 участъците, в които критерият за линейност не е изпълнен. Двата критерия - $D_a < k$ и $D_b < k$ - са изпробвани при различни стойности на константата k (дадена в брой дискрети).

Изводи от експеримента за определяне на оптимален критерий

върху база данни (1400 различни ЕКС).

1. Двата критерия не са изпълнени главно в областта на QRS комплекса.

2. Критериите за $D_b < k$, при $k = 16$ и 24 са твърде слаби. Те се удовлетворяват в областта на началните и крайни фази на QRS комплекса, което означава, че могат да се загладят Q и S вълните, което е съвсем неприемливо от диагностична гледна точка.

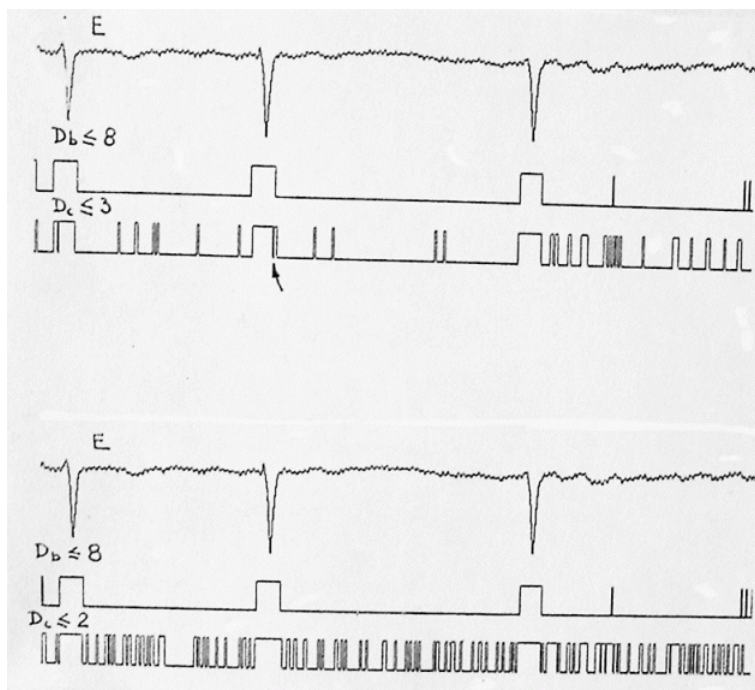
3. Критерият $D_a < k$ е твърде чувствителен към локални флукутации на сигнала (например на фиг. 3.28, критерият $D_a < 16$ е удовлетворен в различни точки на два последователни QRS комплекса).

4. Критериите $D_a < 8$ и $D_a < 16$ са неприемливи. От друга страна, $D_a < 3$ е твърде строг, тъй като не се удовлетворява за някои съвсем равнинни участъци (маркирани са на фиг. 3.28 със стрелка).

При оценка на резултатите от експеримента, трябва да се вземе предвид обстоятелството, че критерият D_a е по-прост от D_b и значително по-бърз при машинна реализация. Това не е маловажен момент, от гледна точка филтрация в реално време. Имайки тези съображения, изпробвахме още един критерий за линейност, който не е строг, но е много прост и следователно, бърз.

$$\text{Критерий (c): } D_c = |X(n+k+1) - X(n-k)| < k \quad (3.42)$$

Идеята е следната: да се раздели алгоритъма за търсене на линеен участък на две части – първо да се прилага някой прост и бърз критерий и само когато той не е удовлетворен, да се приложи строгият, но бавен критерий D_b . Основното изискване е, когато критерият D_b е изпълнен, абсолютно винаги да е изпълнен и критерият D_c . На фиг. 3.29 е показан пример на изпробване на критерия $D_c < k$ върху ЕКС. Едновременно с него са показани и моментите, за които е изпълнено условието $D_b < 8$. Изпробвани са две стойности на критерия – $D_c < 3$ и $D_c < 2$.



Фиг. 3.29

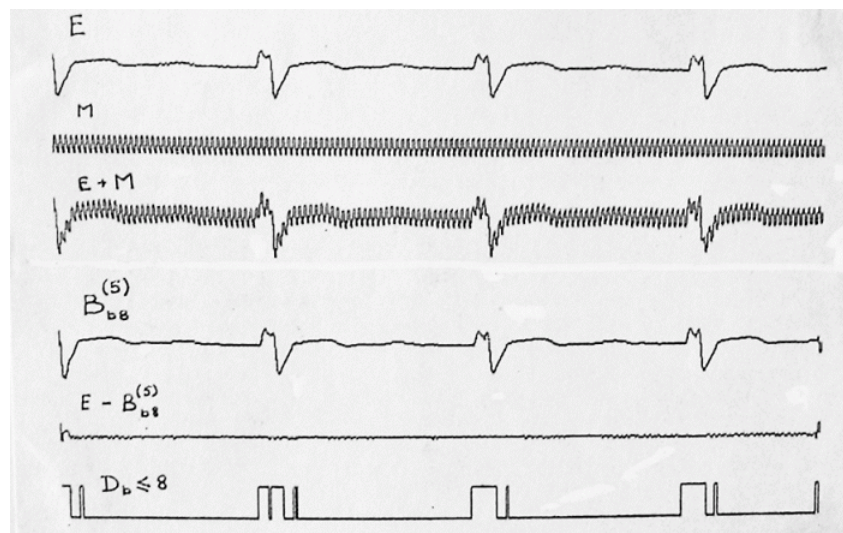
Резултатите от експеримента са противоречиви. Критерият $D_c < 3$ изглежда удачен, но понякога показва несъвпадение при изпълнение критерий $D_b < 8$, което ще доведе до неприлагането на строгия критерий, когато това е необходимо. Със стрелка на фиг 3.28 е отбелязан такъв момент. Понижаването на прага за D_c до 2 не е особено удачно, тъй като се увеличава броя на дискретите, при които се проверяват и двата критерия, което ще направи алгоритъма бавен.

Резюмирайки изследванията, можем да изтъкнем, че засега като оптимален критерий се очертава критерият $D_b < 8$ (при тегло на младшия разряд на АЦП = $20 \mu V$ приведено към входа и 250 Hz честота на дискретизация). Това е един добър компромис, осигуряващ стабилно действие на филтриращата процедура при болшинството от случаите. Критериите D_a и комбинацията D_c и D_b засега не могат да осигурят сигурно действие на процедурата при голямото разнообразие на сигнали и смущения, срещани в реалния ЕКС. Въпреки това, те са много перспективни от гледна точка на бързина на изпълнение и бъдещ прогрес в тази област не е изключен (напоследък Christov, Dotsinsky, 1987 предложиха един удачен алгоритъм в основата на който лежи критерия D_a).

3.4.3 Изследване на филтриращата процедура върху реални ЕКС.

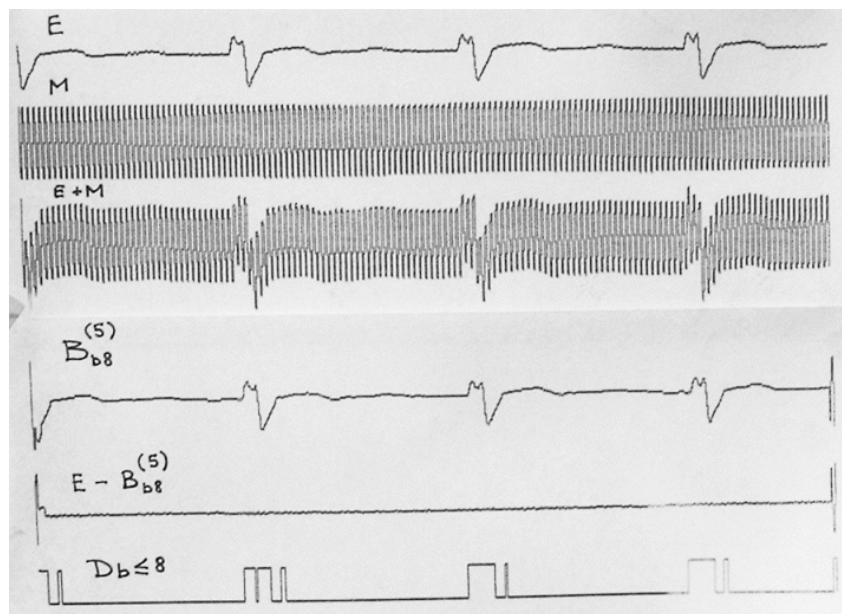
Ще изследваме експериментално процедурата за филтриране, реализирана според алгоритъма, описан в 3.4.1, при критерий $D_b < 8$,

който е приет за оптимален на базата на предварително направените изследвания. Тъй като процедурата е нелинейна, необходимо е да се направи всеобхватно изследване при най-разнообразни ЕКС и смущения. Това е трудно условие, тъй като биологичният сигнал се отличава с голямо разнообразие и нестационарност, с най-различни и непредсказуеми смущения. Описаните по-долу изследвания са правени върху електрокардиографска цифрова база данни от 111 различни индивида – здрави и с най-различни сърдечни патологии. Специално бяха записани мрежови смущения със специфичния спектър, характерен за капацитивните мрежови смущения (виж фиг. 2.25), тъй като този тип смущения са преобладаващи (виж гл. 2). Мрежови смущения с най-различна амплитуда, с вариация на честотата и амплитудата и т.н. могат да бъдат сумирани програмно с всеки ЕКС от базата данни.

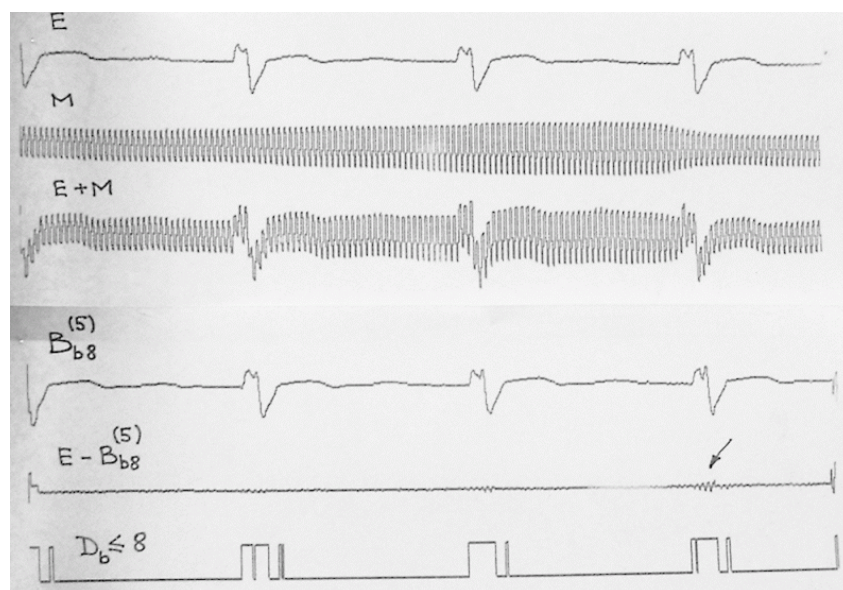


Фиг. 3.30

На Фиг. 3.30 и 3.31 са показани два типични случая с умерено и високо ниво на мрежови смущения в ЕКС. Към сигнал E (специално подбран да бъде с няколко екстремума) е прибавено смущение M с честота, почти кратна на честотата на дискретизация, което е благоприятен случай. Полученият сигнал $E + M$ е филтриран с процедурата, означена като $B_b^{(5)}$. Долният индекс означава използвания критерий за линейност (критерий $b - D_b < 8$), а горният индекс означава броя на точките N при текущото усредняване. Дадена е също разликата между оригиналния сигнал E и филтрирания сигнал B , като по този начин могат съвсем точно да се отчетат получените изменения в ЕКС, предизвикани от филтриращата процедура. На последния ред от фигурите са показани моментите на



Фиг. 3.31



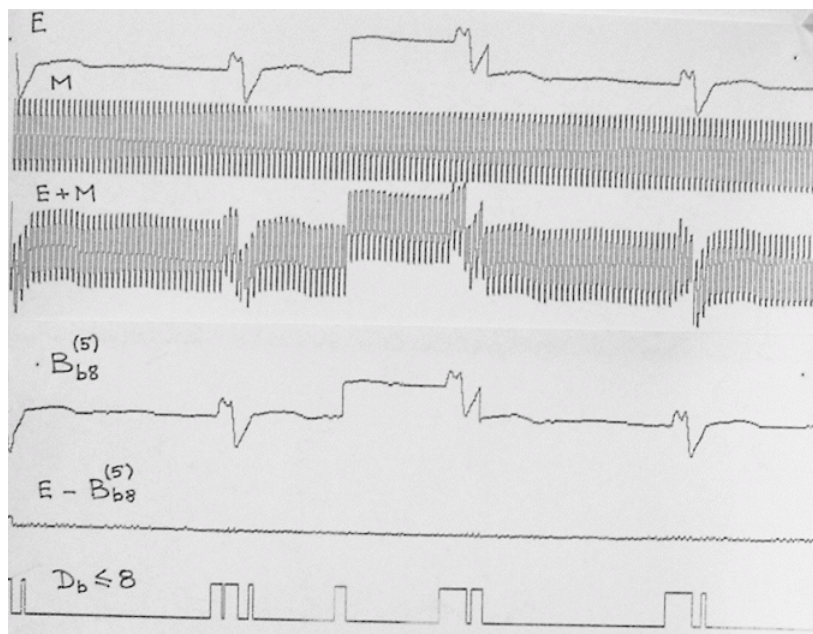
Фиг. 3.32

удовлетворяване на критерия за линейност $D_b < 8$.

На Фиг. 3.32 е показан един възможен, макар и рядко срещан случай на бавно изменящо се по амплитуда смущение. В този случай процедурата е поставена в "тежки" условия, особено в моментите, когато критерият за линейност не е изпълнен. Със стрелка е маркиран такъв момент. Корекцията на смущението в тези точки се извършва с неадекватни стойности от регистъра, което води до увеличаване на грешката.

На фиг. 3.33 е показана една проверка за реакция на импулсни смущения. Към ЕКС е прибавен програмно един правоъгълен импулс.

Във филтрирания сигнал не се забелязват промени, като трябва да се отбележи, че при фронтовете на импулса критерият за линейност не е изпълнен.



Фиг. 3.33

Общите изводи, които могат да се направят при експериментирането на процедурата върху реалните ЕКС, са следните:

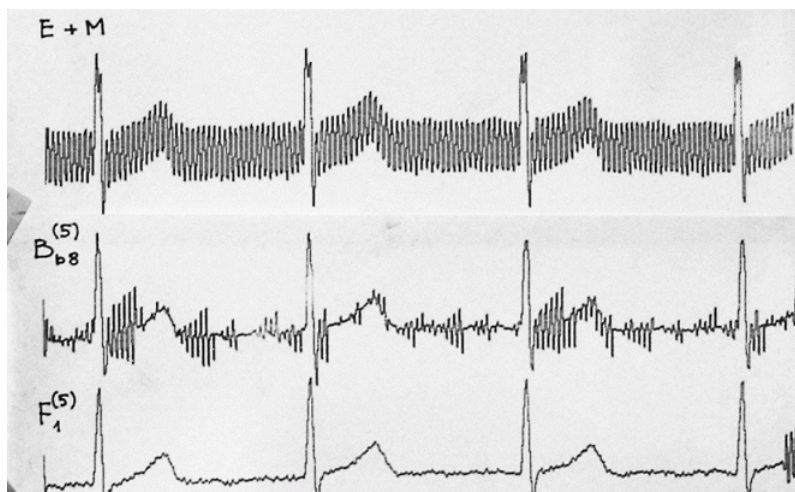
а) При стационарно смущение с честота, кратна на честотата на дискретизация, грешката, отразена в разликовия сигнал $E - B_b$, е не-повече от ± 1 дискрет. Тази грешка практически не зависи от нивото на смущението, стига да не се излезе извън динамичния диапазон на АЦП. Мрежовите смущения практически напълно се елиминират.

б) При нестационарно смущение с честота, кратна на честотата на дискретизация и бавно променяща се амплитуда, се забелязва увеличена грешка в областта на QRS комплекса. В реално срещашите се в практиката случаи грешката не надхвърля допустимите граници.

в) Процедурата не се влияе от импулсни шумове и други адитивни смущения.

3.4.4 Диапазон на ефективност на филтриращата процедура.

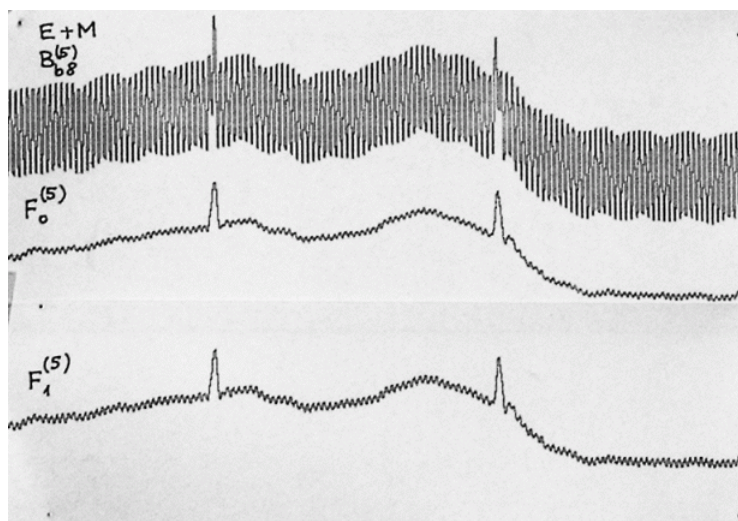
На Фиг. 3.34 е показан сигнал с високо ниво на мрежови смущения, който обаче не е синхронизиран с честотата на



Фиг. 3.34

дискретизация (честота на дискретизация 250 Hz и честота на смущението 49 Hz). Освен това в ЕКС има и слаби мускулни смущения. Вижда се, че процедурата е неефективна и полученият сигнал е негоден за обработка. На третия ред е показана линейна филтрация на сигнала с филтър $F_1^{(5)}$ (виж параграф 3.3.3.), който премахва смущението, но същевременно променя амплитудата на QRS комплекса на ЕКС.

На Фиг. 3.35 е показан един краен случай на много голяма девиация на мрежовата честота – 48 Hz. В този случай критерият за линейност изобщо не е изпълнен за нито една точка от ЕКС поради това, че усредняването около дадена дискрета не премахва напълно мрежовия сигнал. Това личи и от долните две криви, при които сигналът е филтриран с $F_0^{(5)}$ (просто текущо усредняване по 5 точки) и УРС-филтър $F_1^{(5)}$. Ясно се вижда остатъчното мрежово смущение.



Фиг. 3.35

От направените експерименти следва, че описаната процедура е ефективна само при равенство на мрежовата честота с честотата на дискретизация. При тези случаи процедурата практически премахва

смущението напълно, като същевременно не оказва влияние върху ЕКС. Очевидно е, че при реализацията на процедурата трябва да се вземат специални мерки за синхронизация на честотата на дискретизация с мрежовата честота.

3.4.5 Реализация на процедурата в текущо време.

В параграф 3.2.5. е дефинирано понятието обработка в текущо време. Основното условие за изпълнимост в текущо време е времето за процедурата върху епоха ЕКС да е по-късо от времетраенето на епохата. Процедурата $B_b^{(5)}$, реализирана за процесор MC6800 на асемблер, се изпълнява за 0.7 s върху епоха от 2.8 s (данните са взети от реализацията в електрокардиограф ЕКГ1222). За разлика от двупосочния филтър (параграф 3.2.), времето за забавяне на изхода е значително по-малко. Теоретично, минималното време е равно на 20 ms – това е времето за пристигане на 5 дискрети, необходими за да се получи усреднената стойност. За да се постигне обработка на 8 канала ЕКС (има само 8 линейно независими стандартни отвеждания) в реално време, е необходимо да се използва по-производителен микропроцесор.

3.4.6 Клас нелинейни процедури за потискане на мрежови смущения

Ако обобщим, описаната нелинейна процедура принадлежи към цял клас нелинейни процедури за потискане на мрежови смущения. В тяхната основа лежат 2 операции:

i) линейна филтрация на сигнала в участъци, където е изпълнено условието за линейност. Предавателната характеристика на линейната филтрация трябва да има нули за честоти кратни на мрежовата.

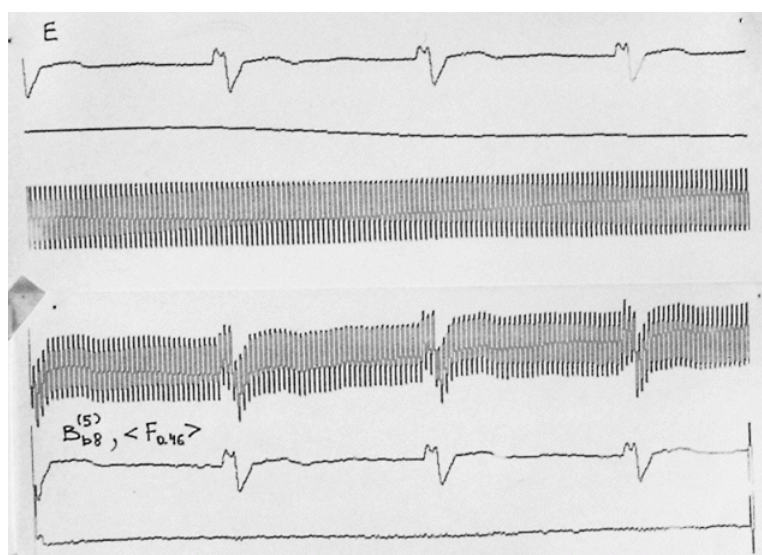
ii) критерий за линеен участък, имащ нули в предавателната характеристика за честоти кратни на мрежовата.

Естествено, използваните от нас критерии за линейност (D_a , D_b , D_c) не са единствено възможните, като същото се отнася и до линейната филтрация (в случая текущо усредняване). Например, възможно е за линейна филтрация да се използват някои от УРС-филтрите описани в 3.3, като тогава процедурата би запазвала някои високочестотни компоненти на ЕКС и в зоните вътре в QRS комплекса, като това би облекчило изискванията към критерия за линейност.

3.5 Грешки в ЕКС след последователно изпълнение на няколко процедури

Последователното изпълнение на множество процедури върху ЕКС може да доведе до нежелателно натрупване на грешки, което е еквивалентно на въвеждане на шум. Грешките се дължат главно на закръгленията в хода на изчислителния процес. За случая на линейна филтрация, влиянието на изчислителните грешки е разглеждано изчерпателно от много автори (виж например Голд, Райдер, 1973). Този въпрос не е решен теоретично в случаите на нелинейна филтрация, където като единствен възможен метод остава експерименталният подход.

За целите на настоящото изследване представлява интерес случая на последователна филтрация на дрейф и мрежови смущения. Това е стандартната процедура, която се прилага върху ЕКС, предназначен за по-нататъшна обработка и изписване. Тази процедура се използва широко в нашите изследвания, затова бе направен експеримент върху ЕКС с цел да се оцени нивото на допълнителния шум. Един примерен резултат е показан на фиг. 3.36. Към ЕКС (означен с E) цифрово са сумирани мрежови и свръхнискофреkwотни смущения. Първо е извършена процедурата $B_b^{(5)}$, а след това двупосочна филтрация на дрейфа $\langle F_{0,46} \rangle$ (виж п. 3.2.7). Най-долната крива представлява разликата между първоначалния сигнал E и обработения сигнал. Разликата е средно ± 1 дискрет, като само на някои места може да достигне до 2 дискрети. Експериментите показаха, че няма значение коя процедура се извършва първа $B_b^{(5)}$ или $\langle F_{0,46} \rangle$, като разликовите сигнали в двата случая не са корелирани, което показва, че грешките са случайни и се дължат главно на крайната точност на изчисленията.



Фиг. 3.36