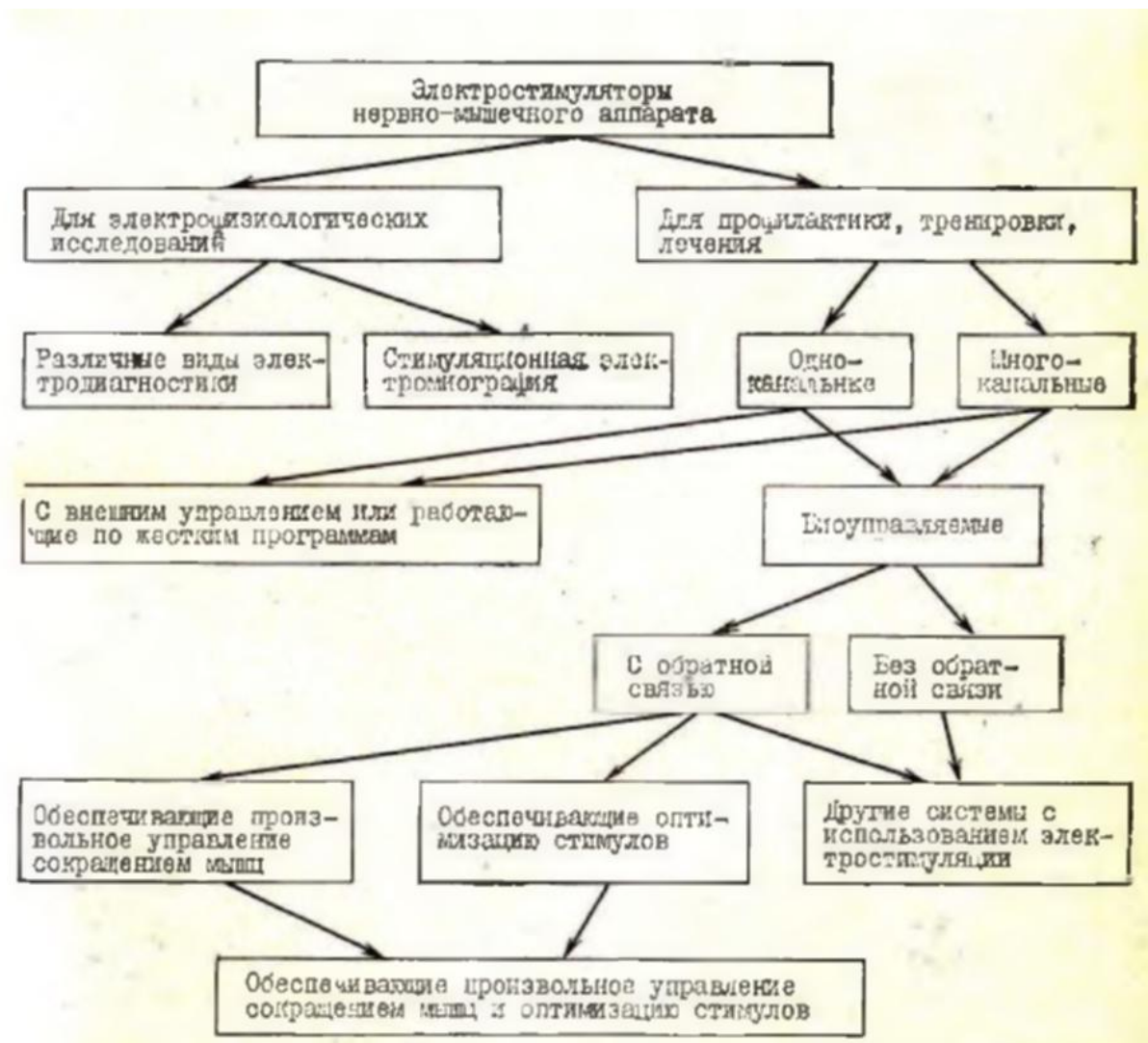


Электростимуляторы нервно-мышечного аппарата

В зависимости от целей применения электростимуляции различаются как сами электростимуляторы, так и методики воздействия. Классификация электростимуляторов по их функциональному назначению и техническим решениям приведена на рисунке.



По функциональному назначению можно выделить два класса электростимуляторов нервно-мышечного аппарата: а) предназначенные для электрофизиологических исследований; б) предназначенные для профилактики заболеваний, тренировки и лечения. Возможны варианты конструкций электростимуляторов с отдельными функциональными свойствами, присущими обоим классам.

Электростимуляторы электрофизиологического назначения могут быть подразделены на два подкласса; используемые для определения различных характеристик электровозбудимости (реобазы, хронаксии, порога аккомодации, кривых сила — длительность, сила — интервал и др.) и используемые для получения и регистрации биоэлектрического ответа нервно-мышечного аппарата на электрический стимул (стимуляционная электромиография). Для определения

электровозбудимости нервно-мышечного аппарата наиболее часто применяют прямоугольные и пилообразные импульсы. Особенностью соответствующих электростимуляторов является возможность точной количественной оценки параметров стимулов. Поэтому к таким устройствам предъявляются высокие метрологические требования по измерению амплитуды, длительности и частоты следования импульсов.

При стимуляционной электромиографии регистрируется биоэлектрический ответ нервно-мышечного аппарата на электрическое раздражение. Величины стимулов составляют десятки вольт, а М-ответ — единицы или десятки милливольт. При этом между электростимулятором и регистратором возникает связь через паразитные емкости, что приводит к искажению биоэлектрического ответа. Наиболее эффективным средством борьбы с артефактами стимуляции является применение метода радиочастотной связи электростимулятора с биологическим объектом. Управляющими видеоимпульсами модулируют по амплитуде колебания высокочастотного генератора (с частотой 0,3—15 МГц); полученный радиоимпульсный сигнал через высокочастотный малоемкостный трансформатор, детектор и фильтр посылают на объект стимуляции. В результате этого на выходе возникают видеоимпульсы, соответствующие по параметрам управляющим импульсам, но развязанные трансформатором относительно основной схемы электростимулятора. Такие устройства называют изолирующими; их используют как в отдельных электростимуляторах, так и в стимуляторах, входящих в состав электромиографов. В последнем случае обеспечивается синхронизация работы электростимулятора с системой регистрации, причем развертка опережает появление артефакта, т. е. отражения стимула на записи. Это дает возможность регистрировать начало электрического воздействия и латентное время ответа. Задержка между синхроимпульсом и стимулом устанавливается автоматически или вручную. Полное сопротивление нагрузки (электроды — кожа) должно быть равно (или меньше) полному сопротивлению выходного трансформатора.

Современные электростимуляторы могут работать в нескольких режимах (с различными уровнями выходных напряжений, токов и сопротивления). Для некоторых исследований используют многоканальные электростимуляторы с независимыми входами, генерирующими импульсы с различными параметрами и изменяющимися временными интервалами. С их помощью определяют разность скоростей проведения возбуждения по наиболее быстро и наиболее медленно проводящим двигательным волокнам периферического нерва.

Примеры аппаратов для электромиографии

Электромиограф «СИНАПСИС»



Электромиографическая система «Синапсис» позволяет проводить методики:

- анализ интерференционной, спонтанной, интегральной электромиограммы,
- турн-амплитудный и спектральный анализ,
- анализ потенциалов двигательных единиц,
- расчет скорости проведения импульсов по двигательным (проксимальным и дистальным участкам) и чувствительным нервам,
- определение характеристик F-волны,
- анализ H-рефлекса, мигательного рефлекса,
- анализ декремента M-ответа на ритмическую стимуляцию и тетанизацию,
- анализ реципрокности.

В качестве дополнительных методик в системе реализованы *стоматологические методики* для оценки действия жевательных и мимических мышц.

Технические характеристики

- Электромиограф:
 - Количество каналов: 4;
 - Интерфейс подключения к ПК: USB;
 - Рабочая полоса частот усилителя (на уровне – 3 дБ): 0-10 кГц;
 - Частота дискретизации по каждому из каналов: 40 кГц;
 - Среднеквадратическое значение шума, приведённое ко входу: не более 5 мкВ;
 - Диапазон амплитуд измеряемых сигналов: 0,1 мкВ – 200 мВ;
 - Динамический диапазон АЦП: 100 дБ;
 - Разрядность АЦП: 24;
 - Нижняя граница полосы пропускания: 0-1000 Гц;
 - Верхняя граница полосы пропускания: 1-10000 Гц;
 - Электропитание: +5 В (от USB порта);
 - Габариты (Ш x В x Г): 225 x 72 x 220 мм (40-40-20);

- Вес: 5 кг.
- **Электростимулятор:**
 - Тип: токовый;
 - Амплитуда импульсов: 0-100 мА;
 - Шаг управления амплитудой импульсов: 1 мА;
 - Длительность импульсов: 10 мкс – 1мс;
 - Шаг перестройки длительности импульсов: 10 мкс;
 - Частота следования импульсов: 0-50 Гц.

Keypoint G4 рабочая станция для исследований в области электромиографии и вызванных потенциалов



Технические характеристики

- Число каналов блока усиления - 3, 6, 8
- Уровень внутренних шумов усилителя (среднеквадратичное отклонение в полосе частот 2 Гц – 10 кГц при замкнутом накоротко входе), не более - 0.4 мкВ
- Уровень подавления синфазной помехи, не менее - 48 кГц
- Входной импеданс сбалансированный (между активным и референтным входами усилителя), не менее - 200 МОм
- Входной импеданс общий (между "землей" и активным входом усилителя или "землей" и референтным входом усилителя):
 - сопротивление, не менее - 1000 Мом
 - емкость, не более - 25 пФ
- Диапазон регулировки чувствительности для входного сигнала - 0.5 мкВ/дел – 20 мВ/дел
- Диапазон регулировки чувствительности для усредненного сигнала - 0.05 мкВ/дел – 20 мВ/дел

- Диапазон регулировки скоростей развертки - 0.2 мс/дел – 12 с/дел
- Диапазон частот генерации импульсов электрического стимулятора - 0.01 – 200 Гц
- Диапазон регулировки нижней границы полосы пропускания - 0,01 Гц – 3 кГц
- Диапазон регулировки верхней границы полосы пропускания - 20 Гц – 20 кГц
- Минимальная длительность импульса стимулятора, не более - 40 мкс
- Максимальная длительность импульса стимулятора, не менее - 1000 мкс
- Максимальная сила тока электрического стимулятора, не менее - 100 мА
- Шаг "грубый" регулировки тока электрического стимулятора, не менее - 0.1 мА
- Шаг "тонкий" регулировки тока электрического стимулятора, не более - 0.02 мА
- Тип защиты от поражения электрическим током - класс I
- Степень защиты от поражения электрическим током - тип ВF

Электростимуляторы, предназначенные для профилактики, тренировки и лечения, по своим техническим решениям делятся на одно- и многоканальные, имеющие ручное управление и биоуправляемые. Наиболее распространены однокапальные аппараты с ручным управлением. Управление параметрами стимулов и режимами электростимуляции осуществляется врачом, медсестрой или же самим пациентом. Стимулятор работает по жестким программам или в полу-автоматическом режиме.

Бытовой миостимулятор Omron E3 Intense



Технические характеристики **(пример, как не надо писать ТЗ):**

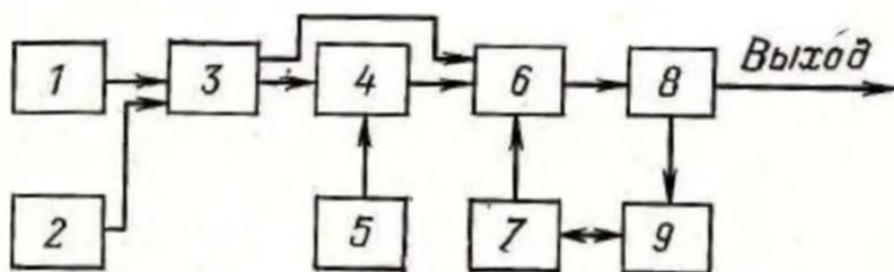
- Наименование прибора: электронный массажер для стимуляции нервных окончаний
- Модель: E3 Intense (HV-F021-ESL)
- Дисплей: Есть
- Пластины в комплекте: Есть
- Количество сменных насадок: 0
- Количество программ массажа: 3
- Выбор режима воздействия: Есть, 6 режимов воздействия (плечи, локоть/колени, рука, стопа, нога, спина)

- Метод массажа: Постукивание, растирание, разминание
- Программа обезболивания (1200 Гц): Нет
- Напряжение: 70 В
- Регулировка интенсивности стимуляции: Есть, 15 уровней
- Функция повтора: Есть
- Таймер: Есть, автоматическое отключение прибора после 15 минут работы
- Функция интенсивного прогрева: Нет
- Функция мягкого прогрева: Нет
- Источник питания: 2 щелочных элемента питания на 1,5 В типа ААА, срок службы около 3-х месяцев при использовании 15 минут
- Генерируемые частоты: 1 - 238 Гц
- Условия эксплуатации: температура воздуха от + 10 °С до + 40 °С при относительной влажности до 80%
- Условия хранения: температура воздуха от - 20 °С до + 60 °С при относительной влажности от 10% до 95%
- Размеры прибора: 52 X 112 X 25 мм
- Вес прибора: Не более 100 грамм (включая батарейки)

Для выявления параметров стимулирующих воздействий, близки к оптимальным, в первую очередь необходимо учесть следующее. Из рассмотрения спектральных характеристик видеоимпульсов видно, что основная часть их энергии сосредоточена вблизи нулевой частоты. Так как поверхностный слой кожи обладает значительным сопротивлением для токов низкой частоты, применение видеоимпульсов для электростимуляции приводит к раздражению кожных рецепторов и вызывает у пациента ощущение жжения и покалывания под электродами. С ростом частоты переменного тока сопротивление кожи уменьшается в большей мере, чем сопротивление мышечной ткани, в связи с чем энергия стимула распределяется между ними равномерно. Однако применение непрерывного синусоидального тока повышенных частот звукового диапазона нефизиологично из-за значительного возрастания энергии. Существует область частот, в которой требуется меньшая пороговая энергия стимула. Такой минимум энергии, вызывающий пороговое сокращение мышцы при электростимуляции через кожу, был обнаружен на частоте 1 кГц, хотя при этом еще имеют место выраженные болевые ощущения, которые значительно уменьшаются с ростом частоты синусоидального тока; на частоте (10 ± 2) кГц они минимальны.

Для одной и той же величины сокращения мышцы при амплитудной модуляции требуется меньшая мощность стимула по сравнению с немодулированными колебаниями. При выборе формы огибающей исследовались следующие импульсы: прямоугольные, колоколообразные, трапецевидные, треугольные, с крутым фронтом и пологим (по экспоненте) срезом, с пологим фронтом и крутым срезом и др. При частоте 1 кГц и длительности импульса 1 мс используется только один период синусоидального колебания; болевые рецепторы отвечают на него серией импульсов, поступающих по афферентным путям в центральную нервную систему.

Использование стимула в виде радиоимпульса с частотой несущего синусоидального колебания 10 кГц и длительностью 1 мс (10 периодов) приводит к тому, что каждый период колебания воздействует на рецепторы, находящиеся в фазе абсолютной рефрактерности; в результате этого блокируется возникновение возбуждения в рецепторах и проведение в чувствительных нервных волокнах. При сравнении прямоугольного и трапециевидного видеоимпульсов (длительность 1 мс на уровне 0,1 амплитудного значения, частота следования 75 имп./с, площадь электродов 15 см², расстояние между электродами 5 см), видеоимпульса с крутым фронтом (25 мкс) и экспоненциальным срезом (975 мкс) с соответствующими им радиоимпульсами (несущая частота 10 кГц) оказалось, что наименьшая мощность, при которой возникало пороговое сокращение бицепса, была у радиоимпульса с крутым фронтом и экспоненциальным срезом. Такой радиоимпульс был использован в качестве стимула в электростимуляторе «Бион-2», структурная схема которого показана на рисунке.



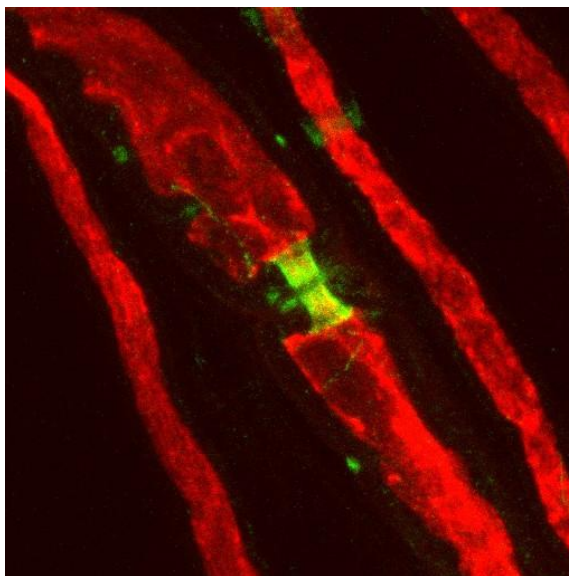
Структурная схема электростимулятора «Бион-2»:

1 — генератор стимулирующих импульсов; 2 — генератор синусоидальных модулирующих импульсов; 3 — блок коммутации; 4 — модулятор; 5 — генератор несущих колебаний (10 кГц); 6 — аналоговый ключ; 7 — блок управления; 8 — выходной усилитель мощности; 9 — блок контроля и индикации

Аппарат осуществляет посылки стимулов с плавным нарастанием амплитуды в течение 0,5 с. Длительность посылок и пауз плавно регулируется в пределах от 1 до 20 с. Блок контроля и индикации позволяет измерять мощность стимулов и обеспечивает световую и звуковую индикацию посылок и пауз. Выбор мощности стимулов в качестве контролируемого выходного параметра позволил сделать измерения более информативными, сопоставимыми между собой и независимыми от режима работы выходного каскада электростимулятора. Эксплуатация электростимулятора в клинике подтвердила, что стимул в виде радиоимпульса с несущей частотой 10 кГц, имеющего крутой фронт и экспоненциальный спад, т. е. сходного с импульсом, возникающим в перехвате Ранвье двигательного нервного волокна, отвечает таким критериям, как минимальная энергия стимула при пороговом сокращении мышцы в сочетании с минимальными болевыми ощущениями.

[Перехваты Ранвье — периодические разрывы в изолирующих миелиновых оболочках миелинизированных аксонов в местах аксональных мембран, подвергаемых воздействию внеклеточного пространства. Перехваты Ранвье не изолированы и очень богаты ионными каналами, что позволяет им принимать участие в обмене ионов, необходимых

для восстановления потенциала действия. Нервная проводимость в миелинизированных аксонах называется *сальтаторным* проведением (от лат. *saltare* — прыгать, скакать) из-за того, что потенциал действия «перескакивает» от одного узла к другому по всей длине аксона.

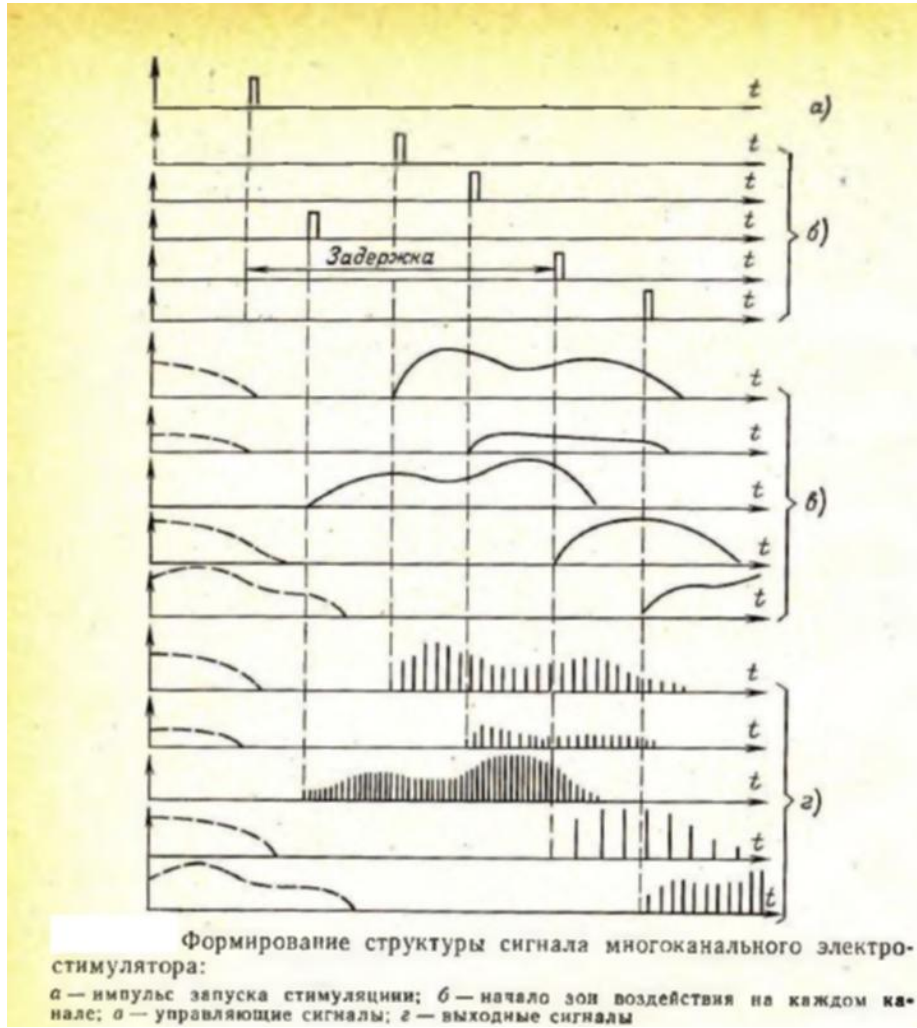


Фотография перехвата Ранвье

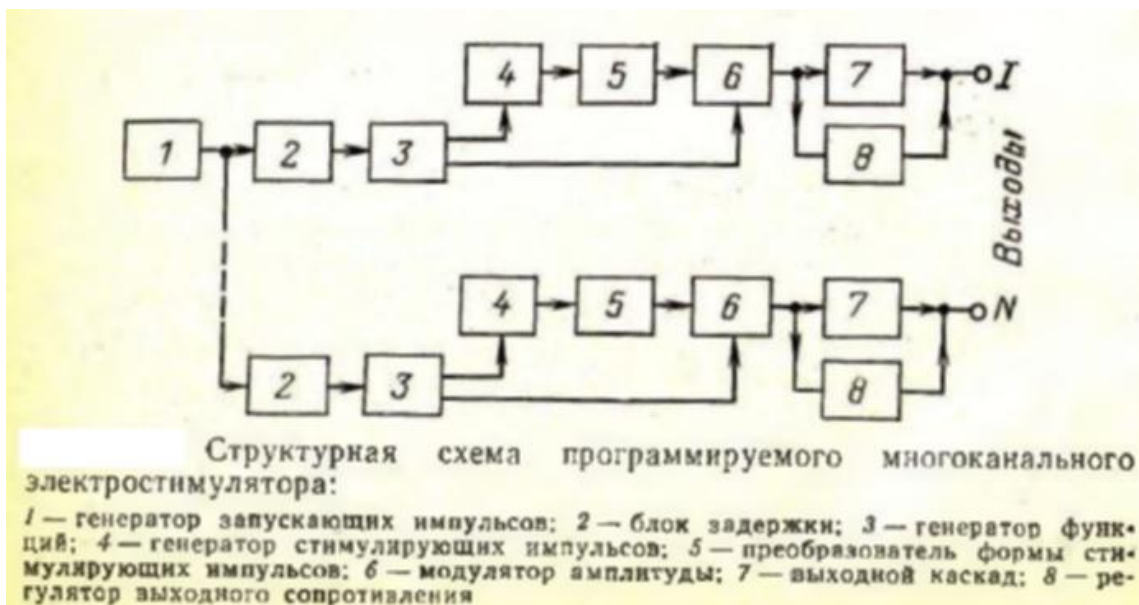
Благодаря перехватам Ранвье, крайне богатым ионными каналами, импульс распространяется по миелинизированным волокнам гораздо быстрее, чем по немиелинизированным нейронам, порядка 100 метров в секунду]

Многоканальные электростимуляторы. Считается целесообразным создание устройств, в которых вырабатывается импульсный сигнал запуска стимуляции, общий для всех каналов; интервал его следования во времени определяет единичный цикл. Этот импульс поступает на отдельные для каждого канала узлы задержки. Распределяя во времени импульсы запуска, устанавливают начало зон воздействия в каждом канале, т. е. при помощи узлов задержек формируют фазовую структуру многих сигналов. Задержанные импульсы запускают генераторы, которые вырабатывают стимулы, регулируемые по форме огибающих (последние определяют длительность зон воздействия и закон изменения последовательности стимулирующих импульсов внутри зон).

Импульсы подаются на входы многоканального блока электростимуляции с гальванически развязанными выходами. В реальном устройстве используются раздельная и совместная амплитудная и частотная модуляции стимулирующих импульсов. В каждом канале устанавливаются различные параметры импульсов (длительность, форма, период следования) в зависимости от функционального состояния стимулируемой мышцы, определяемого, например, по данным стимуляционной электромиографии.



Пример структуры сигнала многоканального стимулятора



Пример структуры многоканального стимулятора

Многоканальные стимуляторы НМА достаточно широко используются на практике.

Например, многоканальный электростимулятор «Тонус» испытывался в космическом полете двух экипажей орбитальной станции «Салют-4» в 1975 г. Воздействие на человека осуществляется по программам, которые имитируют работу мышц-антагонистов при выполнении произвольных движений; учитываются анатомо-физиологические особенности' мышц. На рис. 4.14 приведена схема наложения электродов при управляемой многоканальной электростимуляции основных групп мышц.

Пример

Аппарат ES-2



Биоуправляемые электростимуляторы нервно-мышечного аппараты без обратной.

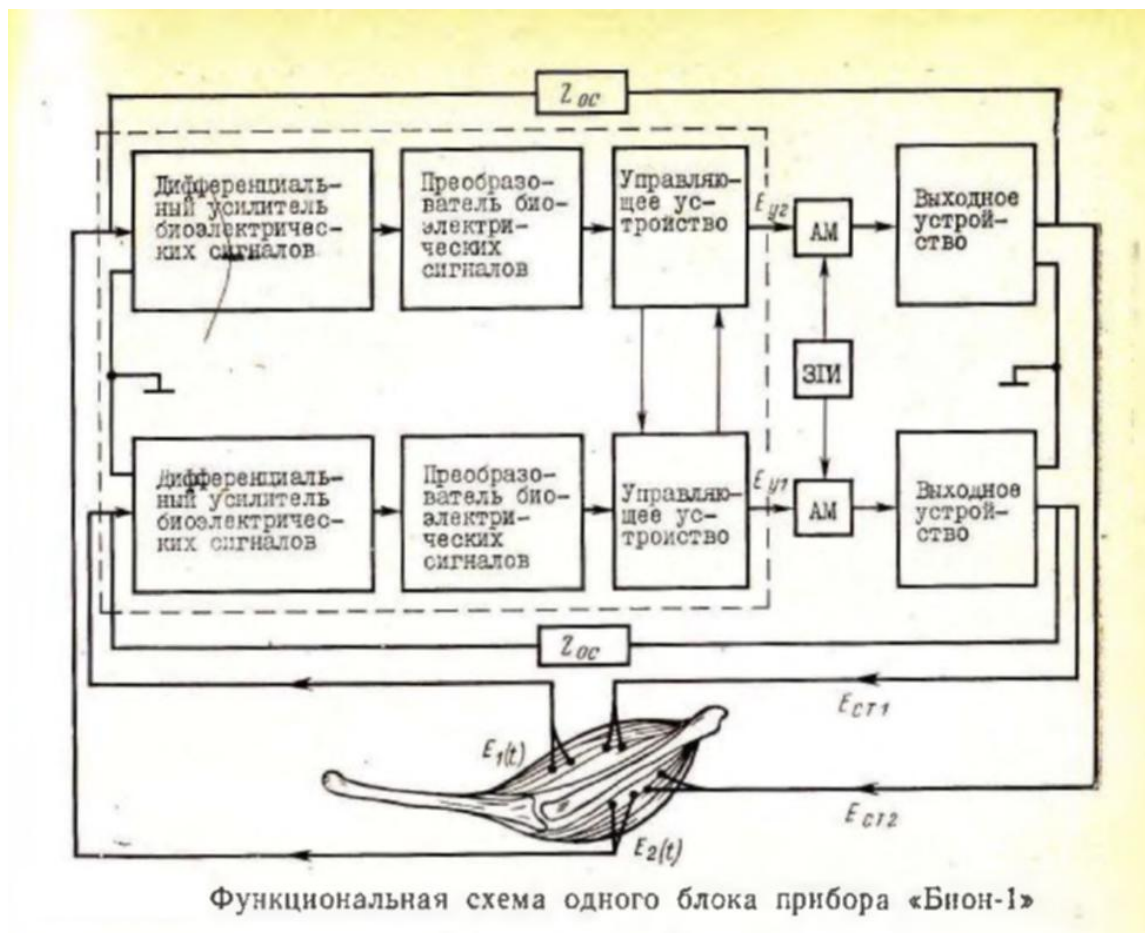
Например, биоэлектростимулятор «Стимул» который состоит из следующих блоков: входного и выходного усилителей, устройства прямого и обратного преобразования спектра, устройств записи, индикации и контроля. Чувствительность прибора 10 мкВ, полоса усиливаемых частот от 10 Гц до 9 кГц. Электроды при помощи экранированных проводов соединяют со входом усилителя биопотенциалов. Испытуемому (реципиенту) накладывают электроды на участки тела, аналогичные тем, с которых биопотенциалы отводятся у донора. После включения прибора донор производит активное движение в суставе, сокращая соответствующие мышцы. Биопотенциалы отводятся и усиливаются, а затем воздействуют на одноименную нервно-мышечную структуру реципиента; у последнего происходит сокращение мышцы и движение в суставе, причем ему

можно навязать различный ритм. Такой же физиологический эффект можно получить при отведении усиленных колебаний биопотенциалов во время сокращения мышц лица, живота, промежности и других участков тела.

Во втором варианте методики колебания биопотенциалов, отведенные от нервно-мышечного аппарата человека, записываются, а при проведении электростимуляции воспроизводятся и дополнительно усиливаются. Параметры тока на выходе прибора такие же, как и в первом варианте. Для выполнения сложных движений, например поочередного сгибания и разгибания различных пальцев руки, необходима многоканальная система усилителей биопотенциалов, которая позволяет отвести биоэлектрические сигналы с каждой мышцы, усилить их и послать реципиенту или же после регистрации, например, на магнитной ленте вновь воспроизвести их для испытуемого.

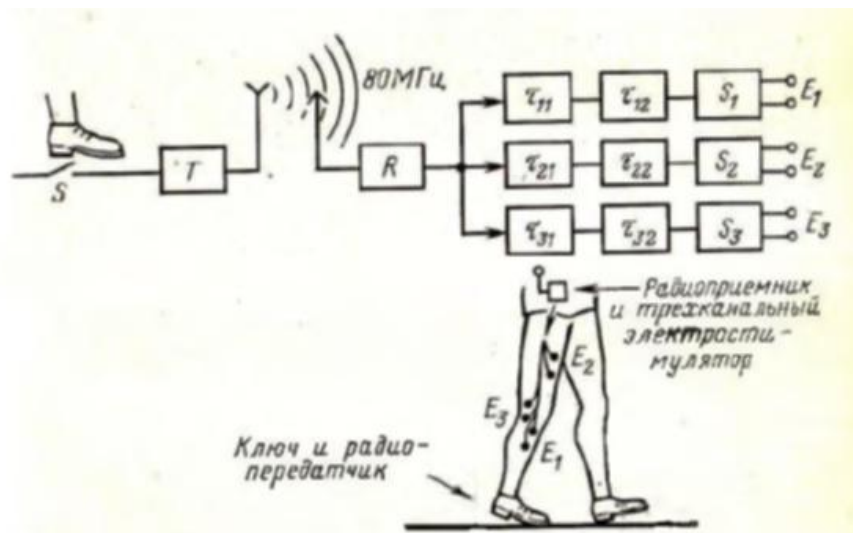
Был разработан 12-канальный электростимулятор серии «Бион» без обратной связи, позволяющий учитывать взаимоотношения между произвольными двигательными актами. Это устройство можно использовать в качестве электростимулятора с биоэлектрическим управлением и без такого управления. Работа прибора в режиме биоуправления основана либо на непосредственном использовании биопотенциалов донора, либо на использовании предварительно зарегистрированных сигналов. Возможно также управление от специальной приставки, формирующей управляющий сигнал с автономной программой. Частотная характеристика дифференциального усилителя обеспечивает усиление сигнала в следующих диапазонах: широкая полоса — от 3,5 до 11 000 Гц; узкая полоса — от 20 до 11 000 Гц. Максимальная (пороговая) чувствительность прибора не менее 5 мкВ. Амплитуда стимулирующих импульсов регулируется в пределах от 0 до 70 В автоматически (в режиме биоуправления) или вручную. Частота следования импульсов регулируется плавно (в пределах от 20 до 140 Гц. В режиме одиночных импульсов (определение реобазы) амплитуда выходного сигнала регулируется в пределах от 0 до 70 В. Прибор имеет выходы для регистрации электромиограммы на магнитной ленте, шлейфовом или электронном осциллографе. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока или от автономных источников, входящих в комплект прибора.

Пример *стимулятора с обратной связью*- «Бион-1». На рисунке приведена функциональная схема одного блока электростимулятора «Бион-1»; остальные блоки аналогичны.



При помощи поверхностных электродов электрические сигналы $E_1(t)$ и $E_2(t)$ отводятся от мышц-антагонистов на вход дифференциальных усилителей биопотенциалов следящей системы; здесь они усиливаются, детектируются, фильтруются. На выходах системы формируются управляющие сигналы E_{y1} и E_{y2} . При $E_1 > E_2$ формируется только сигнал E_{y1} в противном случае — только сигнал E_{y2} . Эти сигналы поступают на амплитудные модуляторы АМ и модулируют импульсы задающего генератора ЗГИ. В выходных устройствах формируются импульсы стимуляции $E_{ст1}$ и $E_{ст2}$, которые по форме моделируют ток действия, генерируемый перехватом Ранвье нервного волокна. Частота их следования регулируется в пределах от 20 до 140 Гц.

Другим примером биоуправляемого стимулятора является перонеальный протез, один из вариантов которого показан на рисунке.



В каблуке обуви смонтирован ключ S , включающий радиопередатчик T , смонтированный там же. Сигнал от радиопередатчика, поступающий на радиоприемник R , включает трехканальный электростимулятор, причем каждый канал (S_1, S_2, S_3) начинает работать с определенным временным сдвигом ($\tau_{11}, \tau_{21}, \tau_{31}$); различны также длительности ($\tau_{12}, \tau_{22}, \tau_{32}$) электрических стимулов, поступающих на мышцы через электроды E_1, E_2, E_3 . Временные задержки, длительности пакетов импульсов и амплитуды стимулов регулируются в широких пределах и устанавливаются индивидуально.