

ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИИ

УДК 615.84

В. Г. ГУСЕВ**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯТОРОВ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ****Гусев
Владимир Георгиевич**

профессор, зав. кафедрой информационно-измерительной техники УГАТУ. Заслуж. деятель науки РБ; заслуж. изобретатель РБ; член отделения технических проблем АН РБ. Дипл. инж.-электромеханик по авиационному приборостроению (УАИ, 1965). Д-р техн. наук (защ. в МИЭТ в 1987 г. по спец. «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»). Исследования в области измерительной техники, преобразователей электронных информационных сигналов, построения медицинских диагностических систем и установок терапевтического назначения. Автор более 400 научных трудов и изобретений, в том числе 12 книг.

Тел: (3472) 23 77 89 E-mail: iit@mail.rb.ru

Излагаются концептуальные вопросы построения высокоэффективных электростимуляторов для биологических организмов. Предложен новый подход, заключающийся в том, что подвергаемый электростимуляции участок биологической ткани включается в цепь положительной обратной связи широкополосного электронного устройства, в котором при определенных условиях теряется устойчивость. Электрические токи стимуляции синхронизированы с электрическими процессами в биологическом организме, а их форма и параметры зависят от характеристики биоткани в месте воздействия. Рассмотрены два варианта реализации этой идеи и приведены результаты экспериментальной проверки одной из них

Электростимулятор; биологическая ткань; обратная связь; напряжения и токи воздействия

Электростимуляторы для биологических организмов являются достаточно распространенным устройством терапевтического назначения [1–6]. Они используются как в кабинетах физиотерапии, так и в домашних условиях. Их применяют в случае различных патологий мышечно-двигательных функций, обусловленных нарушениями со стороны системы управления (нервной системы), при реабилитационных мероприятиях у спортсменов и пр. При терапии используются постоянные, переменные и импульсные токи. Наиболее часто встречаются пульсирующие токи, полученные при однополупериодном или двухполупериодном выпрямлении синусоидального тока, токи прямоугольной, трапецеидальной и треугольной формы, которые в ряде случаев модулированы по амплитуде. Используются и импульсы, по форме напоминающие потенциалы действия или спайки, которые получают с помощью блокинг-генераторов. Ознакомление с используемыми электростимуляторами показывает, что значения электрического тока, отдаваемого в биологический организм, не превышают тех значений, которые укладываются в рамки принятых норм электробезопасности. Частота колебаний находится в области достаточно низких частот от долей герца–нескольких герц до значений, как правило, не превышающих

10 кГц. Верхняя граница оптимальной частоты электростимуляции, как считается [2], не превышает 100–125 Гц. При электроаналгезии применяются и более высокочастотные колебания: чередующиеся пачки импульсов с длительностью порядка 1 мкс.

Такое разнообразие форм воздействующего тока и частот колебаний, а также отсутствие убедительных данных о характере влияния на процессы в биологическом организме тех или иных спектральных составляющих свидетельствует о плохой изученности данного вопроса и недостаточности имеющейся базы знаний. Положение облегчается благодаря тому, что при воздействии самыми разнообразными по параметрам электрическими токами получают схожие результаты и редко наблюдается ухудшение состояния пациента. В то же время в отдельных случаях удается вызвать быстрые ответные реакции организма, весьма впечатляющие по скорости снятия болевого синдрома с последующей стойкой ремиссией.

Под влиянием электрического тока, приложенного к двигательным точкам или к мышцам, происходит их сокращение. При этом в организме вырабатывается дополнительная тепловая энергия, повышающая температуру отдельных участков и всего организма. Так, состояние, известное многим как дрожь от холода, имеет четкое физиологическое объяснение. При сокращениях мышечных волокон вырабатывается дополнительная теплота, необходимая для организма [1]. С точки зрения сокращения мышц и количества вырабатываемой в них теплоты форма электрического тока и частота следования импульсов отнюдь не безразличны.

Возбуждение клеток биологической ткани под влиянием электрической энергии зависит от длительности ее действия, интенсивности и скорости нарастания этого внешнего стимула. Так, при увеличении в определенных пределах электрического тока внешнего воздействия наблюдается укорочение времени раздражения. При уменьшении уровня электрического стимула, после достижения значения так называемой «реобазы», электрический сигнал (при дальнейшем его уменьшении) не вызывает появления возбуждения у клеток, как бы долго он ни действовал [4].

С точки зрения увеличения скорости нарастания внешнего стимула наилучшими считаются прямоугольные импульсы, у которых этот параметр имеет наибольшее значение [3].

Следует признать, что вторжение в биологический организм электрическими сигналами, вызывающими «энергетические эффекты», не является оптимальным с терапевтической точки зрения. Это подтверждается наблюдаемой часто невысокой эффективностью электровоздействия и невысоким процентом отрицательных результатов, получаемых при разных параметрах электрического стимула. Действительно, если ответная реакция на электрическую энергию была бы сильно выраженной, то ошибки в выборе формы и частоты энергетического стимула должны бы были вызвать ощутимые отрицательные изменения в функционировании организма. Так как это обычно не наблюдается, то косвенно подтверждается справедливость высказанных выше суждений.

Вероятно, что для повышения эффективности электровоздействия при проектировании электростимулирующих устройств терапевтического назначения следует исходить из следующих концептуальных положений:

- параметры внешнего возбуждающего электрического сигнала должны быть адекватны (максимально приближены) к тем, которые характерны для электрических процессов внутри организма в той зоне, которая подвергается электродействию;
- возбуждающие электрические сигналы должны быть синхронизированы с соответствующими процессами в биологическом организме;
- направление приложения электрического воздействия должно быть определенным и усиливать или ослаблять соответствующие электрические сигналы в биологическом организме;
- должна обеспечиваться определенная плотность электрической энергии или электрической мощности.

При выполнении первого положения предполагается, что форма (спектральный состав), частота или порядок следования соответствующих импульсов и паузы между ними равны соответствующим параметрам электрического сигнала в зоне воздействия. Простое решение этой задачи вряд ли возможно. Но попытки ее решения известны. Так, например, с мышцы, расположенной симметрично с той, которая подвергается электростимуляции, снимается разность потенциалов, которая после усиления прикладывается к стимулируемой мышце, или мгновенная разность потенциалов записывается на магнитофон. Воздействие на «большую» часть проводится электрическим сигналом, который характеризует электрические процессы на здоровой поло-

вине тела или характерные для другого здорового биологического организма. Эти идеи реализованы в электростимуляторах «Бион» и «Миотон» [2]. В отдельных случаях при электровоздействиях используются сигналы, форма которых моделирует импульсы, возникающие в перехвате Ранвье [2].

Таким образом, можно считать, что многие серьезные исследователи давно пытаются реализовать первое из концептуальных положений. При этом отмечается, что биостимулирующие сигналы не могут в полной мере заменить естественные импульсы (В.С.Гурфинкель и др., 1972).

Второе концептуальное положение также можно считать признанным в среде специалистов. Так, еще в 1959 году Кечвеч предложил устройство для синхронной биоэлектростимуляции при парезе мышцы. Колебания разности биопотенциалов отводятся от больного, усиливаются, а в момент посылки импульсов усилитель автоматически отключается от электростимулятора и подключаются электроды, расположенные на больном. Известен также ряд последующих разработок, в которых сделаны попытки решить вопросы синхронизации воздействующего сигнала с параметрами организма.

Третье положение соответствует основным закономерностям, признанным в медицине. Месту, времени и интенсивности внешнего воздействия в ней всегда уделялось большое внимание. Поэтому место воздействия и направление протекания электрического тока электростимуляции играют немаловажную роль.

Несмотря на очевидность этих положений, эффект от их частичного использования не очень велик, так как частичное решение отдельных вопросов кардинально не изменяет эффективности электростимулирующих технических средств.

Особенность объекта, подвергаемого воздействию, такова, что для получения хороших результатов нужно одновременно выполнить все требуемые условия.

Весьма важным является вопрос о том, какие фазовые сдвиги должны быть между электрическими токами, характеризующими процессы функционирования организма, и электрическим током или токами внешнего воздействия. В свете вышеизложенного они должны или совпадать по направлению, или быть противоположно направленными.

При их совпадении напряженность электрического поля на соответствующих участках биологической ткани увеличивается, а при противоположной направленности — уменьшается. Что более рационально с точки зрения эффективности терапии, достоверно не известно. Поэтому выскажем собственные гипотетические предположения.

Воспалительные нарушения функционирования, наблюдаемые в локальных зонах биологической ткани, приводят к повышению напряженности электрического поля в этой зоне и, вероятно, к увеличению значений электрических токов в ней. Эта мысль подтверждается достаточно хорошо установленным фактом повышения электрического потенциала и уменьшения электрического тока и, как следствие, электрического потенциала зоны должны привести к активации более высоких уровней управления и возникновению более мощных ответных реакций.

При уменьшении результирующего электрического тока в локальной зоне трудно ожидать появления мощных компенсаторных ответных реакций организма. Поэтому при острых воспалительных процессах, сопровождающихся болевыми синдромами, целесообразно воздействовать электрическими токами, направление которых близко к направлению естественных токов организма. Это положение нашло подтверждение в экспериментальных исследованиях, проведенных на добровольцах. При воздействии электрическими токами, синхронизированными и по форме приближенными к процессам в организме, мы не наблюдали существенных последствий в течение небольших промежутков времени в случае уменьшения результирующего значения электрического тока. И практически всегда констатировали появление ответных реакций при увеличениях результирующего значения электрического тока в локальной зоне организма. Причем в течение небольших промежутков времени, оценка которых проводилась, ответная реакция всегда была положительной.

Как представляется в настоящее время, размеры зоны, на которую осуществляется воздействие электрическим током, должны быть небольшими и не превышать по размерам участка, на котором наблюдается аномалия электрических напряжений и проводимости. При этом удается уменьшить общее энергетическое воздействие на организм и избежать активизации тех его

зоной. Вряд ли целесообразно, как это делается в настоящее время, электрический ток пропускать через значительную часть организма.

Высказанные мысли, в основном, касаются острых воспалительных процессов, сопровождающихся повышенной электрической активностью и болевыми синдромами. В случаях деградации биологической ткани воздействие электрическим током должно восстанавливать возбудимость клеток и обеспечить получение нормального функционирования деградировавшего участка, если это еще возможно обеспечить. Деградация электрических свойств биологических тканей — существенно более сложный случай, который еще ждет своего исследования.

Из-за сложности, громоздкости и дороговизны в настоящее время известно небольшое количество используемых на практике технических устройств, в которых в достаточно полном объеме были бы учтены вышерассмотренные положения.

Дополнительные функциональные возможности открываются при применении в электростимуляторах электрической обратной связи, осуществляемой через стимулируемую биологическую ткань. Если электронный усилитель охватить положительной обратной связью, то колебания разности биопотенциала или электрического тока на его входе приведут к появлению тока воздействия. При петлевом усилении $K\beta \geq 1$ произойдет потеря устойчивости и в зависимости от частотной характеристики усилителя или возникнут автоколебания, параметры которых в определенной степени зависят от параметров биологической ткани, или проявится триггерный эффект. В последнем случае усилитель в итоге перейдет в одно из устойчивых состояний, когда выходной сигнал примет максимальное значение. Причем момент возникновения изменения электрического сигнала воздействия будет четко синхронизирован с моментом начала изменения электрического параметра биологического организма и будет совпадать с ним по направлению. Преимущества такого подхода к построению электростимуляторов: простота в реализации и дешевизна; синхронизация сигналов, воздействующих на биоткань, с электрическими параметрами в ней; изменение параметров воздействия при изменении электрических параметров биоткани.

Возможен и другой вариант обеспечения вышеназванных концептуальных положений. Он заключается в том, что в течение некоторого времени записывается биоэлектрический сигнал в память терапевтического устройства, а потом производится воздействие электрической энергией на биологическую ткань. Причем сигнал воздействия формируется сигналом, записанным в память, а его синхронизация с процессами в организме происходит путем анализа признаков сигнала в памяти с признаками сигнала, снимаемого с биологического организма. При их совпадении включается цепь воздействия на биологический организм. В течение определенного времени осуществляется электростимуляция с параметрами, соответствующими сигналу, записанному в память.

При этом возможна и коррекция электровоздействия путем соответствующей обработки записанного сигнала, и исключение из него или введение дополнительных сигналов, которые характеризуют патологические изменения и обеспечивают их компенсацию. Но это пока дело будущего. Реализация такого перспективного подхода возможна только после проведения большого объема научно-исследовательских работ.

Рассмотрим основные подходы к построению автогенераторных электростимуляторов. В их состав должны входить:

- устройство для снятия электрического сигнала с биообъекта;
- устройство для усиления электрического сигнала и введения электрической энергии в биообъект;
- блок с нелинейной амплитудной характеристикой, с помощью которого обеспечивается стабилизация или ограничение значения воздействующей электроэнергии.

Представляется целесообразным автогенераторные электростимуляторы выполнять по одной из структурных схем, показанных на рис. 1. В структуре (рис. 1, а) сигнал с биообъекта снимается с помощью преобразователя ток-напряжение 1. Он имеет форму электрического тока, значение которого зависит: от значения разности биопотенциалов электродов, установленных на кожном покрове; входного сопротивления преобразователя ток-напряжение 1; внутреннего сопротивления объекта между электродами. Этот электрический ток преобразуется в напряжение и через разделительную RC -цепь 2 подается на вход блока нелинейности 3. Коэффициент его передачи зависит от уровня входного сигнала и уменьшается при его увеличении. Пройдя

через эти узлы, напряжение оказывается приложенным ко входу преобразователя напряжение-ток 4. С его выхода электрический ток подается на биообъект. Проходя через участок биообъекта на вход преобразователя ток-напряжение 1, этот ток создает положительную обратную связь. При малой величине входного сигнала петлевое усиление $K\beta$ больше единицы на небольшую величину, где K — коэффициент преобразования прямой цепи, β — коэффициент передачи выходного тока на вход преобразователя ток-напряжение 1.

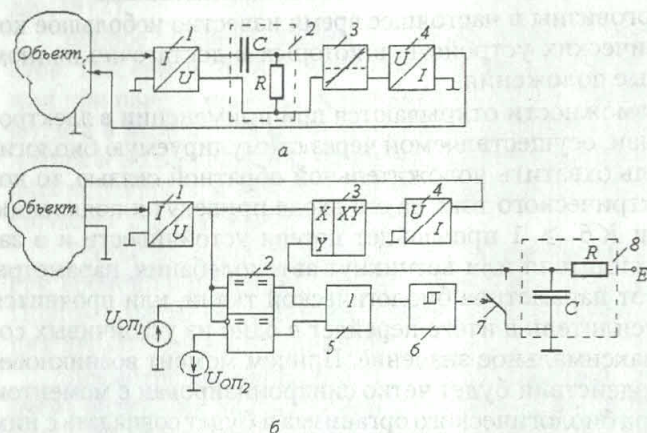


Рис. 1. Структурные схемы автогенераторных электростимуляторов

RC-цепи 2. Вследствие этого напряжение на входе преобразователя напряжение-ток 4 непрерывно снижается. Это эквивалентно увеличению петлевого усиления $K\beta$. В результате одновременно идущих и накладывающихся друг на друга колебаний и процессов экспоненциального уменьшения напряжения на входе преобразователя ток-напряжение и увеличения при этом коэффициента передачи блока нелинейности, а также проявления нелинейных свойств у биологической ткани в определенный момент времени возникнет релаксационный процесс. В итоге электрический ток скачком изменится в другом направлении до получения петлевого усиления $K\beta = 1$ при другой полярности напряжения.

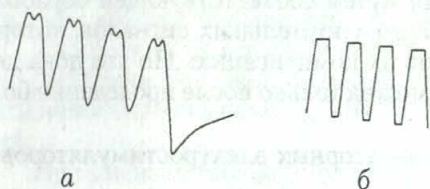


Рис. 2. Форма автоколебаний в автогенераторном электростимуляторе с нелинейностью: при существенной нелинейности (а); при малой нелинейности, повышенном $K\beta$ и увеличенном времени воздействия (б)

петлевого усиления и увеличением длительности электрического воздействия колебательная часть сигнала, напоминающая искаженные полуволны синусоид, существенно изменяет свою форму. Колебания начинают напоминать трапецеидальный сигнал с разной длительностью у разных полярностей (рис. 2, б).

Структура автогенераторного электростимулятора (рис. 1, б) существенно отличается от структуры рис. 1, а по способу формирования сигнала воздействия. В ней коэффициент передачи прямой цепи, охваченной положительной обратной связью через биологический объект,

Поэтому любое колебание биопотенциала приводит к появлению релаксационного процесса увеличения электрического тока «в ту сторону», которая увеличивает величину входного колебания. По мере увеличения выходного напряжения у преобразователя ток-напряжение 1, петлевое усиление $K\beta$ уменьшается. При достижении им значения $K\beta = 1$ значения входного и выходного токов станут равными между собой. Это, как известно, является условием установления значения амплитуды в автогенераторных цепях. Скачкообразное нарастание электрического тока на этом прекращается, и при определенных условиях в составе выходного тока появляются колебания (рис. 2, а). Одновременно будет идти процесс зарядки конденсатора С

При этом в ряде случаев колебания с существенной амплитудой не возникают и наблюдается только экспоненциальное уменьшение напряжения на выходе RC цепи. То, что колебания при другой полярности напряжения иногда не возникают, делают правдоподобной гипотезу, что причиной их появления является возбуждение биологической ткани. Видимо, проявляется явление, называемое полярным законом раздражения [1]. В момент замыкания цепи постоянного тока возбуждение возникает под катодом, а в момент размыкания — под анодом. В отдельных случаях наблюдается появление колебаний тока при обеих полярностях, а также невозможность их возбуждения при любой из полярностей. С уменьшением нелинейности у блока нелинейностей, повышением значения

плавно увеличивается в течение времени. Когда $K\beta$ достигает единицы, начинается процесс возбуждения, синхронизированный с параметрами электрических процессов в организме. Когда уровень тока возбуждения в цепи достигает заданного значения, коэффициент передачи прямой цепи резко уменьшается и процесс воздействия электрическим током прекращается. Затем коэффициент передачи плавно увеличивается до достижения следующего момента, когда $K\beta$ снова станет равным единице и выполнятся условия потери устойчивости. Такой алгоритм функционирования реализуется следующим образом. Электрический сигнал, снимаемый с кожного покрова, в преобразователе ток-напряжение 1 преобразуется в электрическое напряжение. Оно подается на вход устройства с управляемым коэффициентом передачи 3. Управление осуществляется сигналом на входе Y , которое нарастает в течение времени. Это обеспечивается с помощью генератора квазилинейно нарастающего напряжения. В состав его входят ключ 7 и RC-цепь 8. При разомкнутом ключе 7 напряжение на конденсаторе C увеличивается с течением времени. Как только петлевое усиление достигает значения $K\beta = 1$, устройство теряет устойчивость и напряжение на выходе преобразователя ток-напряжение 1 начинает быстро изменяться. Направление этого изменения соответствует направлению колебания входного тока, снимаемого с кожного покрова в момент потери схемой устойчивости. Когда оно достигает уровня, заданного опорными источниками напряжения $U_{оп1}$ и $U_{оп2}$, срабатывает один из компараторов 2. Через элемент ИЛИ 5 их сигналы запускают одновибратор 6. Сигнал одновибратора 6 управляет ключом 7. При замыкании ключа на время $\tau_{и}$, конденсатор C быстро разряжается. Напряжение на выходе Y падает до нуля, и коэффициент передачи прямой цепи уменьшается до малого значения. Соответственно ток электровоздействия становится ничтожно малым. И так продолжается до следующего момента, когда напряжение на входе Y станет таким, что прямая цепь потеряет устойчивость.

При такой структуре будет хаотически увеличиваться действие тех импульсов электрического тока биологической ткани, которые имеются в момент достижения цепию состояния, когда теряется устойчивость. Изменяя параметры генератора линейно изменяющегося напряжения, можно синхронно с процессами в организме увеличивать воздействие на организм параметров отдельных биоимпульсов.

Терапевтические возможности электростимуляторов, имеющих подобную структурную схему, подлежат дальнейшему исследованию. Но априори можно предположить, что такое формирование электрического энергетического воздействия более эффективно, чем воздействие сигналами, сформированными в электронном устройстве и никак не связанными с электрическими процессами и параметрами организма.

При практической реализации вышеизложенных положений и подходов приходится учитывать и ряд второстепенных факторов, которые не представляется возможным рассмотреть в рамках настоящей работы. Для эффективного их использования малоквалифицированными в технических вопросах людьми требуется вводить ряд автоматически работающих регулирующих цепей и цепей программного задания режимов работы, например, обеспечивающих получение пауз между циклами воздействия электрическим током, а также тщательно подбирать нелинейности у отдельных функциональных узлов.

За использованием электрической обратной связи, вводимой через биологический организм, большое будущее. Но многие вопросы идеологии их построения еще ждут своих исследователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физиология человека** / Е. Б. Бабский, А. А. Зубков, Г. И. Косицкий, Б. И. Ходоров. М.: Медицина, 1966. 656 с.
2. **Колесников Г. Ф.** Электростимуляции нервно-мышечного аппарата. Киев: Здоров'я, 1977. 168 с.
3. **Электронная аппаратура для стимуляции органов тканей** / Под ред. Р. И. Утямышева и М. Враны. М.: Энергоатомиздат, 1983. 384 с.
4. **Тасаки И.** Нервное возбуждение. М.: Мир, 1971. 198 с.
5. **Системы комплексной электромагнитотерапии** / Под ред. А. М. Беркутова, В. И. Жулева, Г. А. Кураева, Е. М. Прошина. М.: Лаборатория базовых знаний; Бином, 2000. 376 с.
6. **Попечителев Е. П., Корневский Н. П.** Электрофизиологическая и фотометрическая медицинская техника. Курск: Курский гос. техн. ун-т, 1999. 121 с.