

Э.С. Константинов, З.М. Гизатуллин
(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ КАРДИОСТИМУЛЯТОРОВ

MATHEMATICAL SUPPORT OF THE AUTOMATED SYSTEM
OF REMOTE DIAGNOSTICS OF CARDIAC STIMULATORS

Рассматривается содержательная и математическая постановка задачи дистанционной диагностики кардиостимуляторов, а также методы и алгоритмы решения.

This article discusses the meaningful and mathematical formulation of the problem of remote diagnostics of pacemakers, as well as methods and algorithms for solving.

Ключевые слова: модель, кардиостимулятор, искусственный водитель ритма, дистанционная диагностика.

Keywords: model, cardiac stimulators, artificial heart rate driver, remote diagnostics.

Все современные электрокардиостимуляторы включают в себя источник энергии, стимулирующую и воспринимающую цепь. При имплантации ЭКС используют один электрод при однокамерных, два большинства случаев при двухкамерных, где один из них расположен в правом предсердии, а другой – в правом желудочке. [1]

Сами электроды для постоянной стимуляции состоят из таких компонентов, как проводники, покрытие, соединительные кончики и механизм фиксации. На данный момент современные электроды часто содержат на кончике кортикостероид (стероидные электроды), который позволяет иметь низкий острый и хронический пороги стимуляции и получать хороший сигнал от миокарда.

Имплантация ЭКС позволяет улучшить прогноз и качество жизни пациентов, но не всегда положительно влияет на проявление основного заболевания, его осложнений и способна вызвать свои собственные осложнения, снижающие эффективность работы. Наблюдение за пациентами после имплантации ЭКС позволяет выявить отдельные факторы, учет и адекватная коррекция которых могут улучшить результаты лечения и повлиять на ближайший и отдаленный прогнозы у этих больных, но и не у всех есть возможность каждый раз диагностировать кардиостимулятор, так как находятся далеко от МКДЦ.

Динамическое наблюдение за больными с имплантированными ЭКС предусматривает проведение периодических контрольных исследований системы электрокардиостимуляции (контроль состояния кардиостимулятора и электрода) и состояния пациента. Необходимо контролировать состояние уже имплантированного электрода для того, чтобы предупредить его дисфункцию, которая может представлять опасность для пациента.

Исходными данными являются входные параметры (напряжение (В), сила тока (мА), импеданс (Ом)) соответственно x_1, x_2, x_3 , которые характеризуют сведения о дислокации функций: разряд батареи, излом проводника со стойкой полной утратой проводимости, излом проводника неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника.

Результирующие данные – определение значение параметра характера нарушения (разряд батареи, излом проводника со стойкой полной и неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника).

Для разработки автоматизированной системы дистанционной диагностики электрокардиостимуляторов могут служить искусственные нейронные сети. [4] В основу необходимости нейронных сетей, то есть самообучающихся системах включаются такие способности, как выполнять запрограммированные действия, анализировать поток поступающей информации, находить некие закономерности, производить диагностирование.

Оптимизация нейронной сети направлена на уменьшение объёма вычислений при условии сохранения точности решения задачи на требуемом уровне. Параметрами оптимизации в нейронной сети могут быть размерность и структура входного сигнала нейросети, синапсы нейронов сети, количество нейронов каждого слоя сети, количество слоёв сети. [5]

Перечень, который используется в математической модели, показан в таблице 1.

Таблица 1. Математическая модель искусственного нейрона

Обозначение компонента объекта и результата проектирования	Наименование компонента объекта и результата проектирования	Наименование соответствующего элемента математической модели
n		Число входных сигналов
m		Число выходных сигналов
x_i	Входные сигналы	Значение i -го входа нейрона
w_i	Коефф-т обучения	Вес i -го синапса
S_j	Ячейка нейрона	Взвешенная сумма вх. сигн.
y_i	Выход нейрона	Значение i -го выхода нейрона
e_i		Ошибки нейронов ($i = \overline{1..m}$)

Состояние нейрона определяется по формуле (1):

$$S_j = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_{ij} \quad (1)$$

Определяется значение аксона нейрона по выражению (2):

$$y_j = f(S_j) \quad (2)$$

В процессе обучения искусственной нейронной сети заключается в необходимости настройки сети таким образом, чтобы для некоторого множества входов давать желаемое (или, по крайней мере, близкое, сообразное с ним) множество выходов.

В качестве активационной функции, которая преобразует взвешенную сумму в число, которое будет выходом нейрона, выбрана сигмоидальная функция, так как в отличие от пороговой функции, выход которой равен либо нулю, либо единице, она позволяет получить число, расположенное в диапазоне от 0 до 1. Чем больше взвешенная сумма, тем ближе выход будет к 1 и соответственно наоборот - чем меньше взвешенная сумма, тем ближе выход нейрона будет к 0.

Модель разработанной НС представляет собой однослойную нейронную сеть. Нейроны входного слоя представляют собой данные ЭКС в виде числовых характеристик (напряжение (В), сила тока (мА), импеданс проводника (Ом)), а выходного слоя представляют собой определение характера нарушения так же числовыми значениями (нормальные величины при длительном ЭКС, разряд батареи, излом проводника со стойкой полной и неполной утратой проводимости, дислокация проводника, нарушение целостности изоляции проводника).

На вход выходного слоя подаются числовые значения требуемых характеристик, затем значения нейрона сравниваются с признаками, с помощью активационной функции определяет значимость данного параметра, и на каждом выходе нейронной сети получается оптимальное значение соответствующего данному нейрону.

Процесс функционирования нейронной сети зависит от значений синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой НС, отвечающей какой-либо задаче, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов.

Модель, взятая за основу при построении алгоритмов адаптации в нейронных сетях, позволила формировать критерий первичной оптимизации в рассматриваемых системах в виде требований минимума средней функции ошибки и его модификаций:

- максимум апостериорной вероятности (условная вероятность случайного события при условии того, что известны апостериорные, т. е. основанные на опыте, данные);
- минимум средней функции ошибки;
- минимум средней функции ошибки при условии равенства условных функций риска для различных классов;

- минимум средней функции ошибки при условии заданного значения условной функции ошибки для одного из классов и другие критерии первичной оптимизации, вытекающие из требований конкретной практической задачи.

Отметим, что в подавляющем большинстве работ в области теории нейронных сетей и в алгоритмах обратного распространения рассматривается простейший критерий – минимум среднеквадратической ошибки.

Один из основных недостатков этого классического алгоритма состоит в возможном попадании в локальные минимумы функции. Для нейронной сети требуется подобрать оптимальные веса w_{11} , w_{12} , w_{13} , w_{21} , w_{22} , w_{23} , w_{31} , w_{32} , w_{33} , минимизирующие значение целевой функции, определяемой среднеквадратичной погрешностью. Параметрами практически любой задачи являются веса, которые определяют точку пространства поиска и, следовательно, представляет собой возможное решение.

Условием прекращения работы алгоритма может быть, как достижение суммарной квадратичной ошибкой результата на выходе сети предустановленного заранее минимума в ходе процесса обучения, так и выполнения определенного количества итераций алгоритма.

Для ограничения области поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая находится по методу наименьших квадратов (3):

$$E(w_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p e_i^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где для ошибки служит формула (4):

$$e_i = \frac{(y_j - d_i)}{\varepsilon} \rightarrow 0 < \varepsilon \leq 1. \quad (4)$$

Минимизация ограниченной функции является устойчивостью нейронной сети (входное воздействие в любой момент времени). Взаимодействие нейронов описывается весовыми коэффициентами w_i , которые характеризуют силу воздействия нейронов.

Список литературы

1. *Ермолаева, Т.Н.* Динамика сердечной недостаточности и качества жизни у больных с имплантированным кардиостимулятором / Т.Н. Ермолаева, В.Ю. Кашин, С.В. Шиховцов, И.В. Кубышкин // *Анналы аритмологии: Мат. I Всерос. съезда аритмологов.* – 2005. – № 2. – 101 с.
2. *Аксенов, С.В.* Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев. – Томск, 2006. – 128 с.
3. *Dey, N.* Classification in BioApps: Automation of Decision Making / N. Dey, A.S. Ashour, S. Borra. // *Springer*, 2017. – № 26. – 781-788 p.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.