

Сатыбаев А.Дж.

д.ф-м.н., проф. Ошского технол. универ. им. М.М.Адышева, Кыргызская Республика

Курманалиева Г.С.

ст. преп. Ошского технол. универ. им. М.М.Адышева, Кыргызская Республика

Анищенко Ю.В.

к.т.н. Ошского технол. универ. им. М.М.Адышева, Кыргызская Республика

НЕРВ ТАЛЧАЛАРЫНДАГЫ ПОТЕНЦИАЛДЫН ТАРКАЛУУСУНУН ТҮЗ ГИПЕРБОЛИКАЛЫК МАСЕЛЕСИНИН САНДЫК АЛГОРИТМИН ТАЛДОО

Изилдөөнүн предмети болуп бул жумушта нерв талчаларындагы потенциалдын таркалуусунун түз гиперболикалык маселеси. Изилдөөнүн максаты- нерв талчаларындагы потенциалдын таркалуусунун түз гиперболикалык маселесинин сандык алгоритмин талдоо. Нерв талчасы боюнча иш-аракет потенциалын жайылтуу боюнча түздөн-түз маселенин сандык чечилишин талдоо нейрофизиологиядагы маанилүү изилдөө багыты болуп саналат. Нерв талчалары нерв тутумундагы электрдик сигналдарды берүүчү негизги канал катары кызмат кылат жана алар аркылуу аракет потенциалынын таралуу процессинин түшүнүү механизмдерин жана бүтүндөй нерв системасынын иштешин түшүнүү үчүн чоң мааниге ээ. Нерв жипчеси боюнча иш-аракет потенциалынын таралышынын түздөн-түз маселесин сандык чечүү диффузия процессин сандык моделдөө жана алынган натыйжаларды талдоо болуп саналат. Ыкма таралуу процессинин ар кандай аспектилерин изилдөөгө мүмкүндүк берет. Бул жумушта нерв жипчесинин аракет потенциалынын гиперболикалык типтеги таралышынын түз маселесин болжолдуу чечүү үчүн алгоритмди куруу каралат. Мүнөздөмөлөр боюнча берилген маселе чектүү айырмачылык ыкмасы менен чечилген. Түз маселенин туруктуулугу орнотулуп, чечүү алгоритми түзүлүп, компьютердик ишке ашыруу жүргүзүлдү. Болжолдуу чечимдердин графиктери келтирилип, абсолюттук каталар белгиленет, ошондой эле алар алгоритмдин сандык туруктуулугу, моделдик функциялардын варианттары, теңдеменин параметрлерин көбөйтүү жана нерв талчасынын узундугу боюнча анализденет.

***Негизги сөздөр:** нерв талчасы; түз гиперболикалык маселе; алгоритм; сандык чечим; компьютердик ишке ашыруу.*

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ПРЯМОЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ НЕРВНОГО ВОЛОКНА

Предметом исследования в данной работе является прямая гиперболическая задача распространения потенциала в нервных волокнах. Цель исследования – анализ численного алгоритма решения прямой гиперболической задачи распределения потенциала в нервных волокнах. Анализ численного решения прямой задачи распространения потенциала действия по нервному волокну является важным направлением исследований в нейрофизиологии. Нервные волокна служат основным каналом передачи электрических сигналов в нервной системе и понимание процесса распространения потенциала действия по ним имеет большое значение для понимания механизмов нервной передачи, и функционирования нервной системы в целом. Численное решение прямой задачи распространения потенциала действия по нервному волокну заключается в численном моделировании процесса распространения и анализе полученных результатов. Этот подход позволяет исследовать различные аспекты процесса распространения. В данной работе рассмотрено построение алгоритма приближенного решения прямой задачи гиперболического типа распространения потенциала действий нервного волокна. Приведенная задача с данными на характеристиках решена конечно-разностным методом. Установлена устойчивость прямой задачи, построен алгоритм решения, а также проведена компьютерная реализация. Приведены графики приближенных решений и установлены абсолютные погрешности, а также они проанализированы по численной устойчивости

алгоритма, по вариантам модельных функций, по увеличению параметров уравнения и по длине нервного волокна.

Ключевые слова: нервное волокно; прямая гиперболическая задача; алгоритм; численное решение; компьютерная реализация.

ANALYSIS OF A NUMERICAL ALGORITHM FOR THE DIRECT HYPERBOLIC PROBLEM OF NERVE FIBER ACTION POTENTIAL PROPAGATION

The subject of research in this work is the direct hyperbolic problem of potential propagation in nerve fibers. The purpose of the study is to analyze the numerical algorithm of the direct hyperbolic problem of potential distribution in nerve fibers. The analysis of the numerical solution of the direct problem of action potential propagation along a nerve fiber is an important area of research in neurophysiology. Nerve fibers serve as the main channel for transmitting electrical signals in the nervous system, and understanding the process of spreading the action potential through them is of great importance for understanding the mechanisms of nervous transmission and the functioning of the nervous system as a whole. The numerical solution of the direct problem of propagation of the action potential along a nerve fiber consists in numerical modeling of the propagation process and analysis of the results obtained. This approach allows us to investigate various aspects of the propagation process. This article discusses the construction of an algorithm for an approximate solution of the direct problem of hyperbolic type propagation of the action potential of a nerve fiber. The given problem with data on characteristics was solved by the finite-difference method. The stability of the direct problem was established, a solution algorithm was constructed, and a computer implementation was carried out. Graphs of approximate solutions are presented and absolute errors are established, and they are also analyzed by the numerical stability of the algorithm, by variants of model functions, by increasing the parameters of the equation and by the length of the nerve fiber.

Keywords: nerve fiber; direct hyperbolic problem; algorithm; numerical solution; computer implementation.

Введение. Анализ численных алгоритмов является важным шагом в разработке и совершенствовании методов решения сложных физических задач. В области нейробиологии и нейрофизиологии одной из таких задач является моделирование распространения потенциала действия по нервному волокну. Этот процесс является ключевым для понимания механизмов передачи информации в нервной системе.

Прямая гиперболическая задача распространения потенциала действия по нервному волокну описывает динамику электрического импульса, который передается вдоль нервных волокон. Точное решение этой задачи является сложной задачей, требующей вычислительной мощности и времени. Поэтому важным инструментом для изучения таких задач является численный анализ, позволяющий приближенно моделировать и исследовать их характеристики.

Целью данной работы является анализ численного алгоритма, предназначенного для решения прямой гиперболической задачи распространения потенциала действия по нервному волокну. Мы сосредоточимся на оценке эффективности алгоритма, его точности и устойчивости к различным факторам, таким как параметры волокна, временные и пространственные шаги и другие возможные искажения.

Результаты данного исследования представят значимый вклад в область нейрофизиологии, позволяя более глубоко понять процессы распространения потенциала действия и предоставить информацию о точности и надежности численных алгоритмов для его моделирования. Это может иметь практическое применение в разработке новых методов диагностики и лечения неврологических заболеваний, а также способствовать развитию более эффективных алгоритмов моделирования нервных систем.

Учитывая вышесказанное, на основе алгоритмов нами создан программный комплекс для вычисления максимальных значений и абсолютной величины распространения потенциала действия по нервному волокну.

Обзор литературы. В работах [1–4] разработана солитонная модель изменения трансмембранного потенциала нервного волокна при распространении по нему возбуждения. Точное аналитическое решение задачи распространения нервного импульса в рамках модели Ходжкина–Хаксли на основе интегрального преобразования Лапласа и теоремы Эфроса, когда входной импульс возбуждения отклоняется от ступенчатой функции Хевисайда, получено в [5].

Решение задачи распространения потенциала действия по нервному волокну для возбуждающего импульса произвольной формы дано в [6].

В работе Е.М.Андреева [7] разработана модель электрической активности нейронной сети на основе модели Ижикевича и алгоритм её реализации с использованием технологии GPGPU.

Моделирование распространения потенциала действия с учетом генерации потенциала на каждом участке волокна изложено в работе Богатова [8].

Научная новизна. В данной работе представлен анализ численного алгоритма для решения гиперболической задачи распространения потенциала действия по нервному волокну. Это представляет собой оригинальное исследование, поскольку на сегодняшний день существует ограниченное количество исследований, посвященных численному моделированию этого процесса.

В статье представлены новые результаты исследования, касающиеся эффективности, точности и устойчивости численного алгоритма, применяемого для моделирования распространения потенциала действия по нервному волокну. Эти результаты могут быть полезными для дальнейшего развития численных методов в области нейрофизиологии.

Актуальность. Исследование проблемы распространения потенциала действия по нервным волокнам является важным в контексте понимания работы нервной системы. Правильное моделирование этого процесса имеет решающее значение для разработки новых методов диагностики и лечения неврологических заболеваний, а также для улучшения понимания механизмов нервной передачи сигналов.

Несмотря на значительный прогресс в области численного моделирования нервных сигналов, существует необходимость в совершенствовании алгоритмов и методов, особенно в области гиперболических задач распространения потенциала действия. Эта работа отвечает на эту потребность, предлагая анализ численного алгоритма, который может быть использован в дальнейших исследованиях и разработке новых методов моделирования нервной системы.

Результаты этой работы могут быть полезны для широкого спектра специалистов, работающих в области нейробиологии, нейрофизиологии, вычислительной нейронауки и биомедицинской инженерии. Актуальность этого исследования связана с его потенциальной способностью привести к разработке новых методов моделирования и улучшению практического применения.

Практическая значимость. Развитие методов диагностики и лечения неврологических заболеваний: результаты анализа численного алгоритма, представленные в данной работе, могут быть использованы для разработки новых методов диагностики и лечения неврологических заболеваний. Понимание процессов распространения потенциала действия в нервной системе является ключевым для выявления и понимания патологий, связанных с этим процессом и разработки эффективных методов исследования и лечения.

Оптимизация технологий моделирования нервных систем: исследование численного алгоритма прямой гиперболической задачи распространения потенциала действия по нервному волокну позволяет оптимизировать технологии моделирования нервных сигналов. Улучшение точности, эффективности и устойчивости численных алгоритмов имеет практическую значимость для различных областей, включая разработку электронных протезов, создание биологически основанных компьютерных моделей и оптимизацию стимуляционных методов в медицинских исследованиях.

Улучшение понимания нейрофизиологических механизмов: Анализ численного алгоритма позволяет углубить понимание нейрофизиологических механизмов, связанных с распространением потенциала действия в нервной волокне. Понимание численных методов моделирования нервных сигналов и свойств позволяет разрабатывать более точные и эффективные вычислительные модели нервной системы.

Постановка задачи. При исследовании обратных задач (об обратных задачах см. монографии [9]-[10]) необходимо установить корректность прямых задач, то есть определить существования, единственность и устойчивость решения.

Были установлены существование и единственность решения прямой задачи [11]-[12]. Особенно надо уточнить третье условие: установить устойчивость построенных численных приближенных решений, то есть точность аппроксимации и сходимости приближенного решения к точному решению и получения оценки сходимости.

Математическая модель распространения потенциала действий по нервному волокну описывается параболическим уравнением вида

$$C_m(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{r_a(x)}{2r_a(x)} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{u(x,t)}{r_m(x)}, \quad x \in R_+, t \in R_+, \quad (1)$$

$$u(x,t)|_{t=0} = 0, \quad u_x|_{x=0} = h_0 q(t) + t_0 q_1(t) + p_0 q_2(t), \quad t \in R_+, \quad (2)$$

где: $r_a(x)$ - радиус нервной волокны; $r_m(x), r_a(x)$ - удельное сопротивление аксоплазмы и нервной волокны соответственно; $C_m(x)$ - емкость на единицу площади мембраны; l - толщина мембраны, $u(x,t)$ - плотность электрического тока в точке x во времени t , h_0, t_0, r_0 - заданные положительные числа; $q(t)$ - тета функция Хевисайда,

$$q_1(t) = tq(t), \quad q_2(t) = \frac{t^2}{2} q(t).$$

Прямая параболическая задача заключается в определении функции $u(x,t)$ - плотности электрического тока из задачи (1) - (2).

Используя преобразования Лапласа [13] прямая параболическая задача приводится к решению прямой гиперболической задачи

$$C_m(x) \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} = \frac{r_a(x)}{2r_a(x)} \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{r_m(x)} V(x,t), \quad (x,t) \in R_+^2, \quad (3)$$

$$V(x,t)|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_0 d(t) + r_0 q(t) + p_0 q_1(t), \quad t \in R_+, \quad (4)$$

$$u(x,t) = \int_0^t V_t(x,t) G_t(t,t) dt = \int_0^t V(x,t) G_{tt}(t,t) dt, \quad G(t,t) = \frac{1}{\sqrt{pt}} e^{-\frac{t^2}{4t}} - \text{функция Грина.}$$

Пусть относительно параметров нервного волокна выполнено условие

$$\{C_m(x), r_a(x), r_a(x), r_m(x)\} \in L_0, \quad (5)$$

где: $L_0 = \{C_m(x) \in C^6(R_+), C_m'(a) = 0, 0 < M_1 \leq C_m(x) \leq M_2, \|C_m(x)\|_{C^2} < M_3\}$,

где: M_1, M_2, M_3 - положительные постоянные.

Прямая гиперболическая задача заключается в определении функции $V(x,t)$ из (3), (4) при известных значениях коэффициентов $C_m(x), r_a(x), r_a(x), r_m(x)$, а также постоянных h_0, r_0, p_0 .

Для определения функции $V(x,t)$ задачу (3) – (4) приведем к прямой задаче с данными на характеристиках.

Для этого, во-первых, применяя метод выпрямления характеристики уравнения, введя новую переменную

$$z(x) = \int_0^x \sqrt{\frac{r_a(x) \times C_m(x)}{r_a(x)}} dx, \quad z(0) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} z(x) = 0. \quad (6)$$

Введем новые функции:

$$C_m(z(x)) = C_m(x), \quad r_a(z(x)) = r_a(x), \quad r_a(z(x)) = r_a(x),$$

$$r_m(z(x)) = r_m(x), \quad V(z(x), t) = V(x, t) \quad (6^*)$$

Произведем выкладки описанные в работе [14], получаем следующую прямую задачу:

$$V_{tt}(z,t) = V_{zz}(z,t) - \frac{C'(z)}{C(z)} V_z(z,t) - \frac{V(z,t)}{C_m(z) r_m(z)}, \quad (z,t) \in R_+^2, \quad (7)$$

$$V_z(z,t)|_{z=0} = \frac{1}{C(0)} [h_0 d(t) + r_0 q(t) + r_0 q_1(t)]. \quad (8)$$

Применяя метод выделения особенностей по методике В.Т.Романова [9] представим решение задачи (7) – (8) в виде

$$V(z,t) = \tilde{V}(z,t) + S(z)q(t - |z|) + R(z)q_1(t - |z|), \quad (9)$$

так как уравнение (7) является гиперболическим уравнением и коэффициенты уравнения ограничены, то задачу можно рассматривать в определенной области, а также учитывая решения задачи (9) получим задачу с данными на характеристиках:

$$V_{tt}''(z,t) = V_{zz}(z,t) - 2 \frac{S'(z)}{S(z)} V_z(z,t) - \frac{1}{Cm(z)rm(z)} V(z,t), \quad (z,t) \in D(2T), \quad (10)$$

$$V(z,t)|_{t=|z|} = S(z), \quad z \in [0, T]. \quad (11)$$

Так как, $C(z) = \frac{ra(z) \times Cm(z)}{ra(z)}$, $ra(z)$, $Cm(z)$, $ra(z)$, $rm(z)$, l -известные, то $C(z)$ - известная функция, то функция $S(z)$ также известная функция, то есть

$$S(z) = \sqrt{C(z)} = \sqrt{\frac{ra(z) \times Cm(z)}{ra(z)}}. \quad (11^*)$$

Теперь задачу (10) – (11) можно решить конечно-разностным методом.

Конечно-разностное решение гиперболической задачи.

Введем сеточную область

$$D_h(T) = \left\{ x_i = ih, \quad i \in \overline{0, N}, \quad h = \frac{2T}{N}; \quad t = tk, \quad k \in \overline{0, M}, \quad t = \frac{2T}{M} \right\}, \quad t, h - \text{шаги сетки по } t, x.$$

Затем пишем разностный аналог дифференциальной задачи (10) – (11) при этом используя сеточные обозначения [15] и отбрасывая малые члены получаем:

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k - u_i^{k-1} + \frac{t^2}{h^2} [u_{i+1}^k - 2u_i^k + u_{i-1}^k] - t^2 f_i^k, \quad (x_i, t_k) \in D_h(2T), \quad (12)$$

$$u_i^i = S_i, \quad i \in \overline{0, N}. \quad (13)$$

$$\text{где } f_i^k = [u_{i+1}^k - 2u_i^k + u_{i-1}^k] + \frac{S_{i+1} - S_{i-1}}{S_i} * [u_i^k - u_{i-1}^k] + \frac{1}{Cm_i rm_i} u_i^k, \quad i \in \overline{1, N-1},$$

$$2Nh + |ih| < tk < 2Nh - |ih|.$$

Шаги сетки по x и по t должны быть равны, то есть $h = t$, таким образом выполняется условие Куранта-Лакса $\frac{h}{t} \leq 1$, и можно показать устойчивость решения прямой задачи. Из (8) определим сеточную функцию S_i

$$S_i = \sqrt{\frac{r a_i * C m_i}{r a_i}}, i = 0, N \quad (14)$$

Решение. Прямая задача заключается в определении сеточной функции u_i^k из задачи (12) - (13) при вышеуказанных известных функциях.

При выполнении условия относительно коэффициентов уравнений (5) и при выполнении условия Куранта-Лакса приближенное решение прямой задачи (12) – (13) устойчиво и оно сходится к точному решению прямой задачи (10) – (11).

Для решения прямой задачи (12) – (13) нами создан алгоритм и по созданному алгоритму вычислена прямая задача и она реализована на компьютере, на языке Delphi.

Одномерная прямая задача для уравнения потенциала действий по нервному волокну (12) – (13) численно реализована для функций $C_m(x)$, $r_a(x)$, $r_m(x)$ в следующих видах (таблицу 1).

На всех представленных значениях функций (см. таблицу 1) выведены графики $dpin(k)$ – дополнительная информация для исследования обратной задачи.

Алгоритм решения прямой задачи для уравнения потенциала действий по нервному волокну

1. Задаем $T = 4$, $N = 200$, $h = T/N$, $t = T/2N$.

2. Задаем значения функций: $C_m(x)$ - емкость на единицу площади мембраны, $r_a(x)$ - радиус нервного волокна, $r_m(x)$ - удельное сопротивление аксоплазмы и $r_a(x)$ - удельное сопротивление нервного волокна.

3. Вводим новую переменную (6) и новые функции (6*).

4. Вычисляется формула (11*) и определяются значения функции $S(z)$.

5. Затем эти значения присваиваются к $V(z, z) = S(z)$, то есть определяются значения функции V на характеристиках (на рисунке 1. отмечены).

6. По значениям $V(z, z)$ определяются значения $V(z, z + Dz) = S(z) + (S(z + Dz) - S(z))/\sqrt{2}$, по формуле Тейлора (на рисунке 1).

7. Дополнительные внутренние точки также определяются по формуле (10) (на рисунке 1).

8. Внутренние точки вычисляются по формуле (12) (на рисунке 1).

9. После завершения вычисления определяется дополнительная информация для решения одномерной обратной задачи уравнения потенциала действий по нервному волокну $dpin(t) = V(0, t)$.

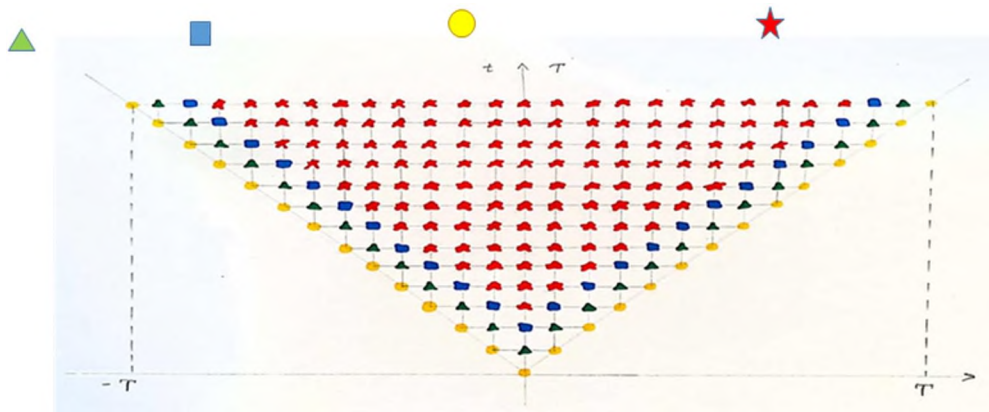


Рисунок 1 - Область вычисления прямой задачи.

Анализ возможности разработанного алгоритма прямой задачи

1. Численная устойчивость алгоритма

В ходе исследования выявлена численная устойчивость алгоритма путем проведения следующих действий: последовательно уменьшали шаги сетки, в результате получили значения решения задачи и абсолютную погрешность прямой задачи в нескольких точках. Здесь абсолютные погрешности почти одинаковы, что и подтверждает устойчивость алгоритма.

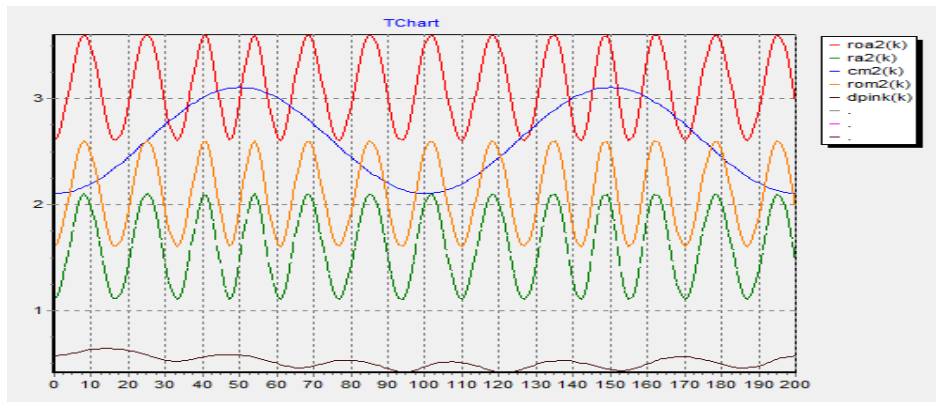


Рисунок 2 - Графики функций $dpink(k)$ – дополнительная информация для обратной задачи, $C_m(x) = 3.1 - \cos^2(b(x))$ при $r_a(x) = 2.1 - \cos^2(6.28x)$, $r_a(x) = 3.6 - \cos^2(6.28x)$, $r_m(x) = 2.6 - \cos^2(6.28x)$, $t = 0.01$.

2. Анализ на увеличение параметров уравнения

Если значительно увеличить величину при параметре $C_m(x)$ - емкость на единицу площади мембраны, и постоянную при параметре $r_a(x)$ - радиус нервного волокна, то максимальное значение решения задачи тоже увеличивается. А если значительно увеличить величину при параметре $r_a(x)$ - удельное сопротивление нервного волокна, и величину при параметре $r_m(x)$ - удельное сопротивление аксоплазмы, то максимальное значение решения задачи уменьшается. Все эти показатели утверждают уравнение прямой задачи.

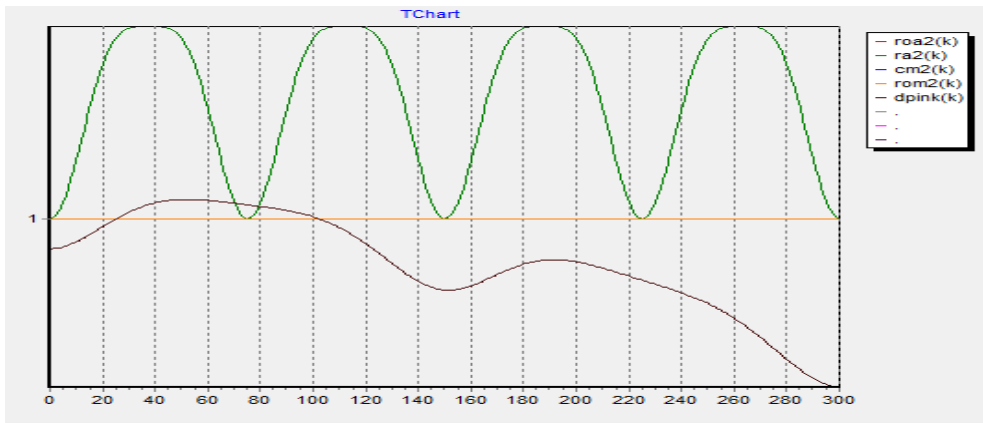


Рисунок 3 - Графики функций $dpin(k)$ – дополнительная информация для обратной задачи, $r_a(x) = 2 - \cos^4(b(x))$ при $C_m(x) = 1$, $r_a(x) = 1$, $r_m(x) = 1$, $b(x) = 6.28$, $t = 0.006$.

3. Варианты функций $C_m(x)$, $r_a(x)$, $r_a(x)$, $r_m(x)$.

В качестве функции $C_m(x)$ - емкость на единицу площади мембраны, задавали различные функции: косинусообразные, импульсные, ступенчатые. Здесь установили, что при увеличении $b(x)$ максимальное значение решения задачи либо уменьшается, либо не меняется.

Затем последовательно задавали косинусообразные, импульсные, ступенчатые функции для функций $r_a(x)$, $r_a(x)$, $r_m(x)$. Здесь тоже увеличивали $b(x)$ и выяснили, что решение прямой задачи распространения потенциала действий существенно и сильно зависит от функции $r_a(x)$ - радиус нервного волокна, и слабо зависит от функций $C_m(x)$ - емкость на единицу площади мембраны, $r_a(x)$ - удельное сопротивление нервного волокна, $r_m(x)$ - удельное сопротивление аксоплазмы. Это означает, что:

1. При увеличении радиуса нервного волокна увеличится площадь поперечного сечения, через которую распространяется нервный импульс. Это может увеличить эффективность проведения импульса и ускорить скорость передачи сигналов по нервной системе.
2. Увеличение радиуса нервного волокна может увеличить дистанцию, на которую может передаваться нервный импульс без значительной потери сигнала. Это может быть полезно при передаче нервных сигналов на большие расстояния в организме.
3. Увеличение радиуса нервного волокна уменьшает его сопротивление, что позволяет электрическому сигналу более эффективно распространяться. Это может способствовать более точной и быстрой передаче сигналов.

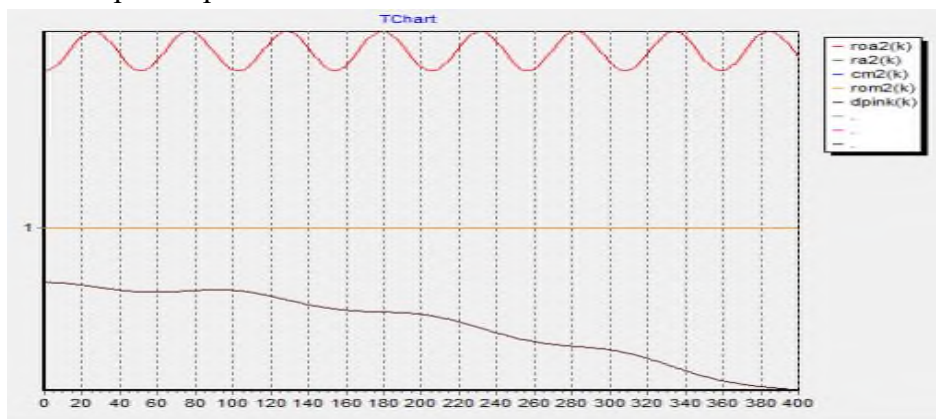


Рисунок 4 - Графики функций $dpin(k)$ – дополнительная информация для обратной задачи, $r_a(x) = 2 - 0.2 \cos^2(b(x))$ при $C_m(x) = 1$, $r_a(x) = 1$, $r_m(x) = 1$, $b(x) = 6.28$, $t = 0.005$.

4. Анализ на вычисление по длине нервного волокна T

Вычисление производилось по длине нервного волокна и она составила $40 \leq T \leq 120$ условной единицы (см). При увеличении T от 40 до 60 графики $dpin(k)$ выходят выразительные и четкие, при увеличении T от 80 до 120 графики значительно ухудшаются. Значит, длина нервного волокна влияет на передачу нервных импульсов. Импульсы могут пропадать или становиться слабыми и искаженными с увеличением длины волокна. Это может быть связано с потерей энергии или дисперсией сигнала. А также длина нервного волокна может влиять на его физические свойства, такие как сопротивление, ёмкость. Если эти свойства неоптимальны, это может приводить к искажениям и потере сигнала при передаче через волокно.

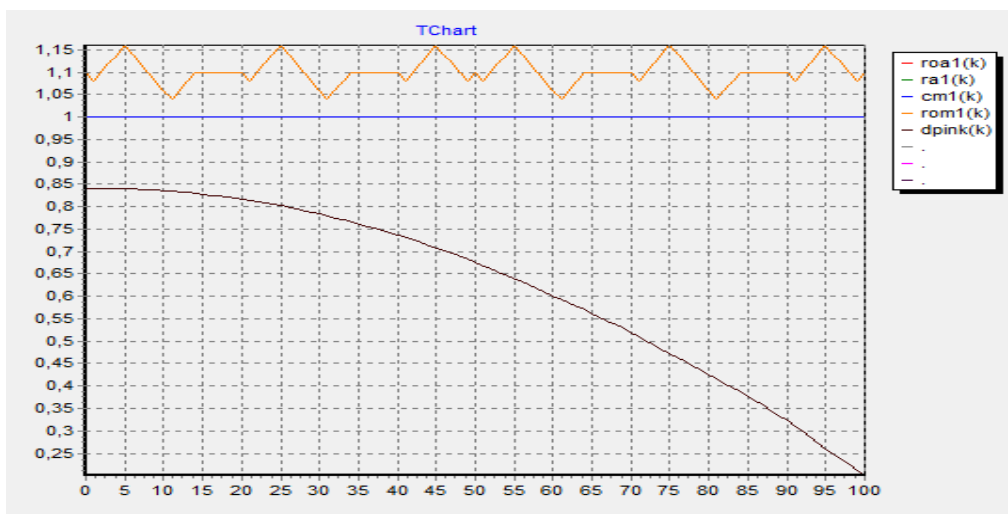


Рисунок 5 - Графики функций $dpin(k)$ – дополнительная информация для обратной задачи, $r_m(x)$ - импульсная при $C_m(x) = 1$, $r_a(x) = 1$, $r_a(x) = 1$, $t = 0.02$.

Последний анализ необходим для решения обратной задачи.

Вывод

В ходе исследования выявлена численная устойчивость алгоритма, был сделан анализ на увеличение параметров уравнения, а также сделан анализ на вычисление по длине нервного волокна T.

Список литературы:

1. **Максименко, Е.В.** Аналитическая модель нервного импульса [Текст] / Е.В. Максименко // Обозрение прикл. и пром. матем.- 2003. -Т.10.- Вып. 3. - С. 696–697.
2. **Максименко, Е.В.** Использование уравнения Кортевега- де Фриза для моделирования трансмембранного потенциала в нервном волокне [Текст] / Е.В. Максименко // Вестник Северо-Кавказского гос. техн. универ., серия ¾ Естественная. - 2004. - №1(7). - С. 234–235.
3. **Максименко, Е.В.** Моделирование распространения нервного импульса с использованием ЭВМ [Текст] / Е.В. Максименко // Обозрение прикл. и пром. матем.- 2004. - Т.11.- Вып.2.- С. 368–369.
4. **Максименко, Е.В.** Об использовании математических методов в биологических исследованиях [Текст] / Е.В. Максименко // Обозрение прикл. и пром. матем.- 2005. - Т.12.- Вып.2.- С. 431–432.

5. **Селезов, И.Т.** Обобщение задачи возбуждения и распространения потенциала действия по нервному волокну [Текст] / И.Т. Селезов, Л.В.Морозова // Прикладна гідромеханіка, 2010. - Т.12. - № 3.- С.75– 83.
6. **Богатов, Н.М.** Моделирование распространения электрического импульса в нервном волокне [Текст]: Коллективная монография / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, Е.Г. Понетаева // Современные проблемы физики, биофизики и инфокоммуникационных технологий.- Краснодар: Краснодарский ЦНТИ, 2012. - С. 33–44.
7. **Андреева, Е.М.** Моделирование электрической активности нейронов с использованием технологии параллельных вычислений [Текст] / [Е.М.Андреева, В.В.Бавин и др.] // Матем. био. и биоинф.- 2015.- Т10.- №2. - С. 344-355.
8. **Богатов, Н.М.** Анализ изменения потенциала действия в нервном волокне [Текст] / Н.М.Богатов, Л.Р.Григорьян, Е.Г.Понетаева // Эколог. вестник науч. центр. ЧЭС.- 2013. -№3. -С.21-25.
9. **Романов, В.Г.** Устойчивость в обратных задачах [Текст] / В.Г.Романов.- М.: Научный мир.- 2005.- 296 с.
10. **Кабанихин, С.И.** Обратные и некорректные задачи [Текст] / С.И.Кабанихин.- Новосибирск: Сибирское научное, 2009. – 458 с.
11. **Сатыбаев, А.Ж.** Единственность решения двумерной прямой задачи распространения потенциала действий по нервному волокну [Текст] / А.Ж.Сатыбаев, Г.С.Курманалиев // Вестник КРСУ.- Бишкек: КРСУ, 2019. - Т19. - №4. – С. 19-25.
12. **Satybaev, A.J.** The existence of a solution of the two-dimensional direct problem of propagation of the action potential along nerve fibers [Текст] / A.J. Satybaev, G.S. Kurmanalieva // Filomat, 2019. –Т 33.- №5.- Pp.1287-1300.
13. **Кабанихин, С.И.** Обратные и некорректные задачи [Текст] / С.И.Кабанихин // Монография.- Сибирское научное, 2008. – 450 с.
14. **Курманалиева, Г.С.** Численное решение одномерной обобщенной прямой задачи распространения потенциала действий по нервному волокну [Текст] / Г.С.Курманалиева, А.Дж. Сатыбаев // Вестник КГУСТА.-2022. -Т 3. -№2(76). - С 1104-1111.
15. **Самарский, А.А.** Численные методы математической физики [Текст] / А.А. Самарский, А.В.Гулин.–М.: Научный мир, 2003. -316 с.

DOI:10.54834/16945220_2023_3_16
Поступила в редакцию: 31.10.2023 г.

Таблица 1 - Заданные функции для прямой задачи, шаг сетки и погрешность вычисления

№п/п	№ рисунка	Функции				b(x)	Шаг сетки	Dpin(k)	Абсолютная погрешность
		$C_m(x)$ - ёмкость на единицу площади мембраны	$r_a(x)$ - радиус нервного волокна	$r_a(x)$ - удельное сопротивление нервного волокна	$r_m(x)$ - удельное сопротивление аксоплазмы				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.		$3.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	0.393	0.02	0.6335	0.0244
2.		$3.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	1.57	0.0133	0.6415	0.0180
3.		$3.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	3.14	0.01	0.6388	0.0153
4.		$3.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	6.28	0.005	0.6267	0.0068
5.		1	$2 - \cos^4(b(x))$	1	1	4.71	0.0066	1.0800	0.0090
6.		1	$2 - \cos^4(b(x))$	1	1	4.71	0.005	1.0792	0.0067
7.		1	$2 - \cos^4(b(x))$	1	1	6.28	0.0066	1.0992	0.0114
8.		1	$2 - \cos^4(b(x))$	1	1	6.28	0.005	1.0988	0.0086
9.		1	1	$2 - 0.2 \cos^2(b(x))$	1	4.71	0.0066	0.7259	0.0038
10.		1	1	$2 - 0.2 \cos^2(b(x))$	1	4.71	0.005	0.7259	0.0028
11.		1	1	$2 - 0.2 \cos^2(b(x))$	1	6.28	0.0066	0.7259	0.0042
12.		1	1	$2 - 0.2 \cos^2(b(x))$	1	6.28	0.005	0.7259	0.0032
13.		1	1	1	импульсная		0.02	0.8408	0.0128
14.		1	1	1	импульсная		0.01	0.8408	0.0048

15.		ступенчатая	1	1	1	1			0.0066	0.5397	0.0213
16.		ступенчатая	1	1	1	1			0.005	0.5554	0.0214
17.		$13.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	6.28		0.0066	0.4331	0.0206
18.		$13.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	6.28		0.005	0.4353	0.0116
19.		$13.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	4.71		0.0066	0.4304	0.0203
20.		$13.1 - \cos^2(b(x))$	$2.1 - \cos^2(6.28x)$	$3.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	$2.6 - \cos^2(6.28x)$	4.71		0.005	0.4308	0.0120