

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 616.31-085

Разработка электрической принципиальной схемы блока управления магнитным полем соленоида ультразвукового магнестрикционного стоматологического скалера

М.К. Суханов, М.М. Сябро

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты разработки методик управления магнитным полем соленоида наконечника стоматологического ультразвукового магнестрикционного (далее по тексту просто ультразвукового) скалера при использовании широтно-импульсно моделированного сигнала и принципиальных схем, реализующих данную методику. Определены три критерия-признака, по которым оценивалась оптимальность выбора методики: наработка на отказ сердечника соленоида, длительность безотказной работы блока управления соленоида и изменение длины сердечника при одинаковых мощности и параметрах управляющего сигнала. Проведен сравнительный анализ разработанных методик и принципиальных электрических схем и определена оптимальная конфигурация принципиальной схемы и конструкции соленоида по трем описанным признакам. Представлен результат моделирования управляющего сигнала и сигнала на соленоиде в среде проектирования Proteus. Сформулированы итоги проведенного сравнительного анализа методик управления магнитным полем соленоида в контексте объекта исследования, определены возможные места применения результатов исследования и пути его продолжения.

Ключевые слова: ультразвуковой скалер, магнестрикционный скалер, стоматологический скалер, ШИМ, соленоид, магнитное поле, магнестрикционный излучатель

Для цитирования. Суханов М.К., Сябро М.М. Разработка электрической принципиальной схемы блока управления магнитным полем соленоида ультразвукового магнестрикционного стоматологического скалера. *Молодой исследователь Дона*. 2024;9(1):20–25.

Development of an Electrical Schematic Diagram of the Magnetic Field Control Unit of the Solenoid of an Ultrasonic Magnetostrictive Dental Scaler

Maksim K. Sukhanov, Margarita M. Syabro

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

This article presents the results of the development of methods for controlling the magnetic field of the solenoid of the tip of a dental ultrasonic magnetostrictive (hereinafter referred to as simply ultrasonic) scaler using a pulse-width modeled signal and circuit diagrams implementing this technique. Three criteria were determined, according to which the optimality of the choice of methodology was evaluated: the operating time for the failure of the solenoid core, the duration of trouble-free operation of the solenoid control unit and the change in the length of the core at the same power and control signal parameters. A comparative analysis of the developed techniques and basic electrical circuits was carried out and the optimal configuration of the circuit diagram and the solenoid design was determined according to the three described features. The result of modeling the control signal and the solenoid signal in the Proteus design environment is presented. The results of the comparative analysis of the methods of controlling the magnetic field of the solenoid in the context of the object of study are formulated, possible places of application of the results of the study and ways of further implementation of the study are determined.

Keywords: ultrasonic scaler, magnetostrictive scaler, dental scaler, PWM, solenoid, magnetic field, magnetostrictive emitter

For citation. Sukhanov MK, Syabro MM. Development of an electrical schematic diagram of the magnetic field control unit of the solenoid of an ultrasonic magnetostrictive dental scaler. *Young Researcher of Don*. 2024;9(1):20–25.

Введение. В медико-биологической практике, в частности в стоматологии, одним из наиболее часто используемых устройств является стоматологический скалер. В настоящее время имеются сложности поставками и ремонтом медицинского оборудования. Эта ситуация особенно сильно затронула область стоматологии. Поэтому появилась необходимость в импортозамещении медицинского оборудования и приборов.

Стоматологический ультразвуковой (УЗ) скалер — это устройство для удаления зубного камня, чистки поверхности зубов от налета и потемнений эмали зубов, работающее по принципу ультразвуковых механических колебаний. Различают несколько разновидностей стоматологических скалеров, одним из которых является ультразвуковой скалер, принцип его работы основан либо на эффекте магнитострикции, либо на пьезоэлектрическом. Магнитострикционный УЗ-скалер построен по принципу магнитострикционного излучателя, который упрощенно состоит из излучателя — электромагнитной катушки (в форме соленоида) с ферромагнитным сердечником определенного материала и блока управления магнитным полем соленоида — генератора импульсов, например, ШИМ-сигнала [1].

Магнитострикция может быть описана как закономерное периодическое колебание продольно-поперечных геометрических размеров твердотельного сердечника электромагнитной катушки при периодическом изменении величины и направления вектора напряженности магнитного поля внутри катушки (внутри сердечника) вследствие перемагничивания доменов материала сердечника и/или отдельных его молекул [2]. Данное явление свойственно всем материалам в той или иной степени, но наиболее сильно оно выражено и вообще применимо при малых величинах напряженности магнитного поля именно у ферромагнетиков, причем в зависимости от используемого материала зависимость изменения длины сердечника от напряженности магнитного поля будет различной.

Цель данного исследования — разработка оптимальной методики формирования управляющего сигнала для соленоида наконечника ультразвукового стоматологического скалера и конфигурации соленоида посредством сравнения разработанных методик, описываемых в исследовании по трем основным показателям: наработка на отказ сердечника соленоида, длительность безотказной работы блока управления соленоида и изменение длины сердечника при одинаковой мощности и параметрах управляющего ШИМ-сигнала.

Основная часть. Сравнение конфигурации схемы управления магнитным полем соленоида. У профессиональных моделей УЗ-скалеров¹ частота управляющих импульсов и, как следствие, магнитострикции обычно равна приблизительно 28 кГц. Чтобы получить описываемые механические упругие колебания, необходимо периодическое колебание или направления вектора магнитной индукции и/или изменение его величины.

1. Соленоид со средней точкой и управлением от двухтактного противофазного прямоугольного ШИМ-сигнала. Схематично принцип реализации такой методики управления магнитным полем соленоида показан на рис. 1.

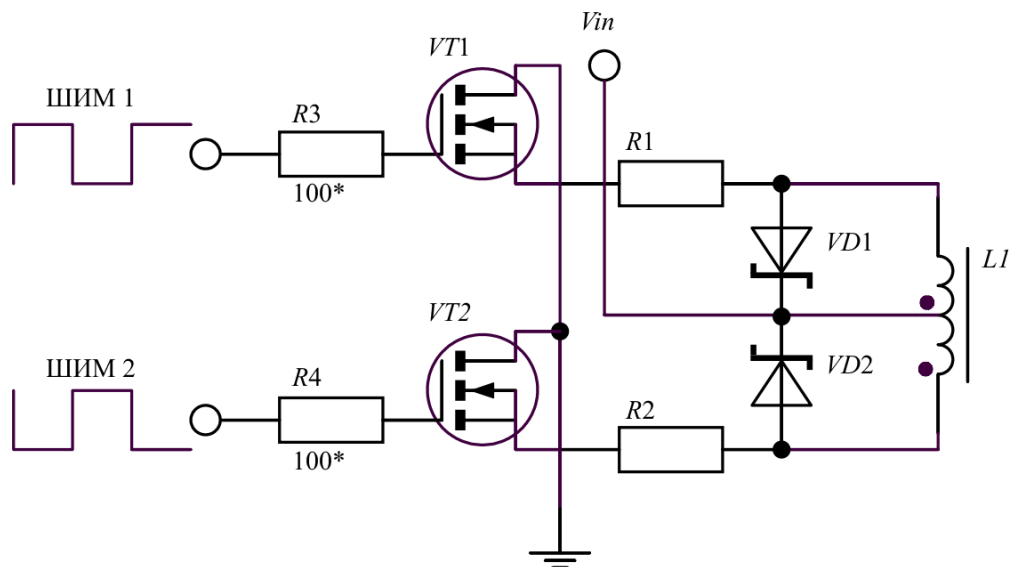


Рис. 1. Схематическое обозначение блока управления соленоидом со средней точкой и управлением от двухтактного противофазного прямоугольного ШИМ-сигнала

¹ Скалеры ультразвуковые. URL: <https://dentalgroup-company.ru/skalery-ultrazvukovyye> (дата обращения: 24.01.2024).

На рис. 2 схематически представлен процесс магнитострикции сердечника соленоида при данной конфигурации элементов.

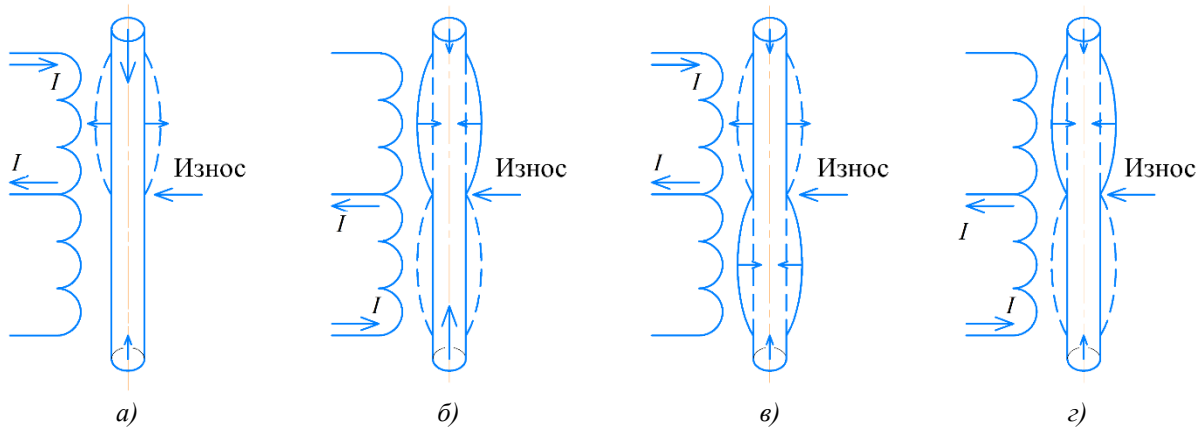


Рис. 2. Схематическое представление процесса магнитострикции сердечника соленоида со средней точкой и управлением от двухтактного противофазного прямоугольного ШИМ-сигнала в разные моменты такта ШИМ-сигнала

На рис. 2 а показано состояние сердечника в момент включения устройства в первый такт ШИМ-сигнала. На рис. 2 б изображен процесс перемагничивания при смене направления ШИМ-сигнала. Рис. 2 в и 2 г симметричны и показывают, что происходящие колебания будут симметричны относительно средней точки соленоида. Кроме того, на рис. 2 видно, что такой метод управления магнитным полем соленоида не является оптимальным, так как в процессе работы действительные колебания размеров будут сильно меньше, чем возможны при использовании такого материала и такой амплитуды сигнала. Кроме того, на графиках также видно, что из-за частых упругих колебаний геометрических размеров сердечника в двух точках в области, близкой по расположению к средней точке соленоида, будет повышенный износ материала, поэтому сердечник очень быстро выйдет из строя и расколется.

2. Соленоид без средней точки, с управлением двухполюсным (переменным) прямоугольным ШИМ-сигналом. Следующий вариант реализации схемы, представленный на рис. 3, позволяет упростить конструкцию соленоида и предотвратить раскол сердечника. Основной смысл заключается в том, что при использовании того же противофазного двухтактного ШИМ-сигнала нужно заряжать магнитное поле соленоида импульсами то в одном, то в другом направлении, получая тем самым импульсно-переменное напряжение на соленоиде. Схема реализована при использовании стандартной для инвертера напряжения компоновки управляющих транзисторов VT1–VT4.

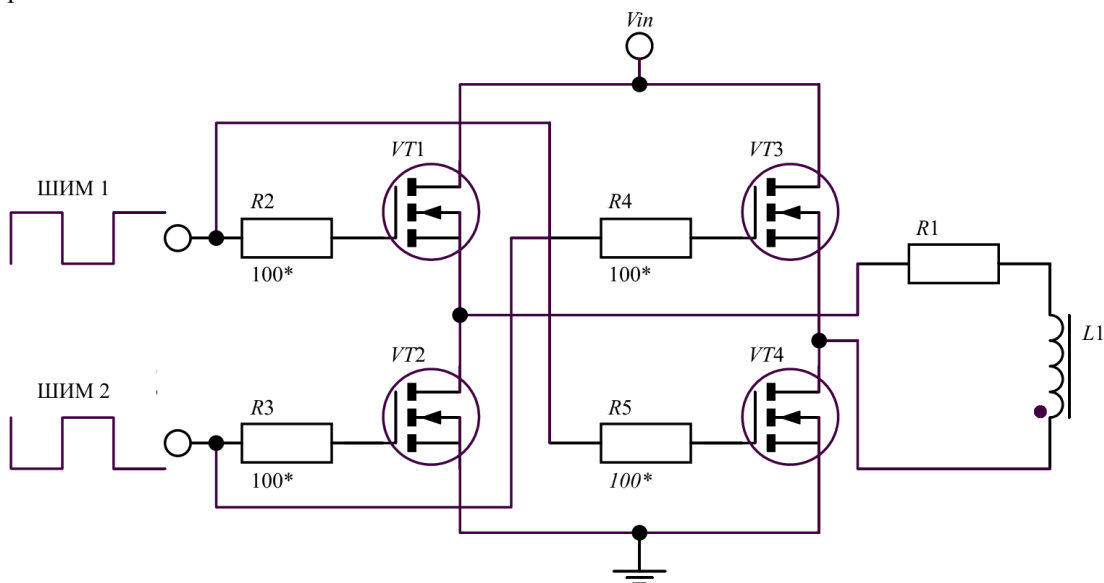


Рис. 3. Схематическое обозначение блока управления соленоидом без средней точки, с управлением двухполюсным (переменным) прямоугольным ШИМ-сигналом

Далее, на рис. 4, приведено схематическое обозначение магнитострикционных колебаний сердечника при текущей конфигурации соленоида и схемы управления.

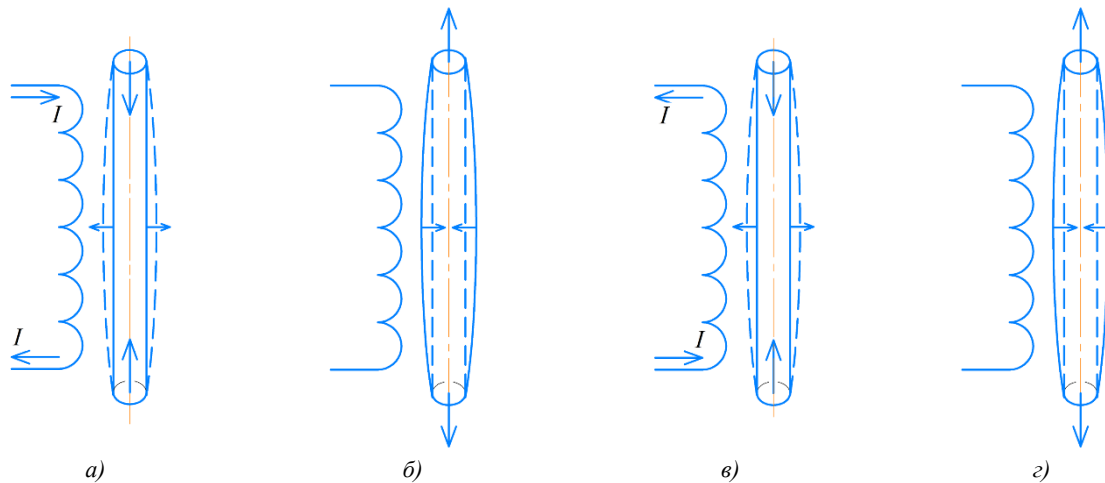


Рис. 4. Схематическое обозначение магнитострикционных колебаний сердечника соленоида без средней точки, с управлением двухполюсным (переменным) прямоугольным ШИМ-сигналом: а–г — повторяющиеся импульсы тока в соленоиде и реакция сердечника

На рис. 4 видно, что для магнитострикционных колебаний неважно направление вектора магнитной индукции магнитного поля и, соответственно, направление тока в соленоиде, что предоставляет возможность для упрощения схемы управления магнитным полем соленоида.

3. Соленоид без средней точки, с управлением одноктактным прямоугольным ШИМ-сигналом (рис. 5).

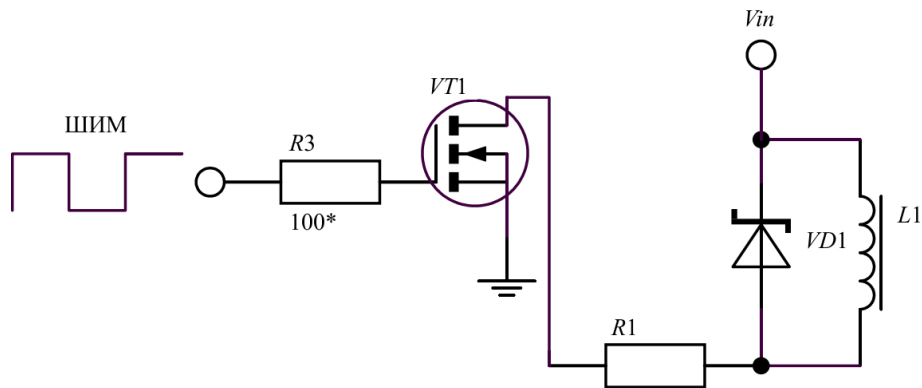


Рис. 5. Схематическое обозначение блока управления соленоидом без средней точки, с управлением одноктактным прямоугольным ШИМ-сигналом

Для предотвращения насыщения соленоида необходимо использовать добавочный резистор R_1 (рис. 5). Магнитострикционные колебания сердечника соленоида будут идентичны тем, что представлены ранее на рис. 4.

Классификационные признаки. 1. Нарботка на отказ сердечника соленоида. Этот признак определяет длительность безотказной работы сердечника соленоида и всего наконечника ультразвукового стоматологического скалера в целом. Измеряется в часах работы. Область определения, как и область существования, находится в пределах единиц и десятков тысяч часов работы.

2. Длительность безотказной работы блока управления соленоида. Признак характеризует время безотказной работы электрической управляющей части устройства и обусловлен количеством и разновидностями используемых электронных компонентов. Измеряется в часах работы, а область определения, как и область существования, находится в пределах единиц и десятков тысяч часов работы.

3. Изменение длины сердечника при одинаковой мощности и параметрах управляющего ШИМ-сигнала. Этот признак характеризует изменение длины сердечника соленоида как вертикальное (по оси вращения соленоида) движение случайной точки на поверхности края сердечника (места крепления насадки). Измеряется пространственная координата в микрометрах относительно стартовой точки до начала работы устройства, область определения и существования по модулю находятся в пределах от 20 до 120 мкм.

Сравнительный анализ предложенных конфигураций схемы управления по классификационным признакам. Далее описаны выводы по рассмотренным показателям (наработка на отказ сердечника соленоида,

длительность безотказной работы блока управления соленоида, изменение длины сердечника при одинаковой мощности и параметрах управляющего ШИМ-сигнала), которые сведены в таблице 1. Для сравнительной оценки использованы категории: плохо, хорошо, отлично (в формате баллов: 0, 1, 2 соответственно).

Таблица 1

Характеристики качества проводимой процедуры и длительности безотказной работы стоматологического ультразвукового скалера

Конфигурации схемы управления магнитным полем соленоида	Классификационные признаки			Суммарные баллы
	наработка на отказ сердечника соленоида	длительность безотказной работы блока управления соленоида	изменение длины сердечника при одинаковой мощности и параметрах управляющего ШИМ-сигнала	
1. Соленоид со средней точкой и управлением двухтактным противофазным прямоугольным ШИМ-сигналом	0	1	0	1
2. Соленоид без средней точки, с управлением двухполюсным (переменным) прямоугольным ШИМ-сигналом	2	0	2	4
3. Соленоид без средней точки, с управлением одноктактным прямоугольным ШИМ-сигналом	2	2	2	6

На основании данных этой таблицы можно сделать вывод, что самой оптимальной конфигурацией схемы управления магнитным полем соленоида по перечисленным признакам при одинаковых амплитуде, частоте и скважности прямоугольного ШИМ-сигнала применительно к наконечнику стоматологического УЗ-скалера является конструкция соленоида без средней точки с управлением одноктактным прямоугольным ШИМ-сигналом (максимальный суммарный балл по перечисленным признакам). Для выбранной схемы связь управляющего ШИМ-сигнала и колебаний сердечника представлена на рис. 6.

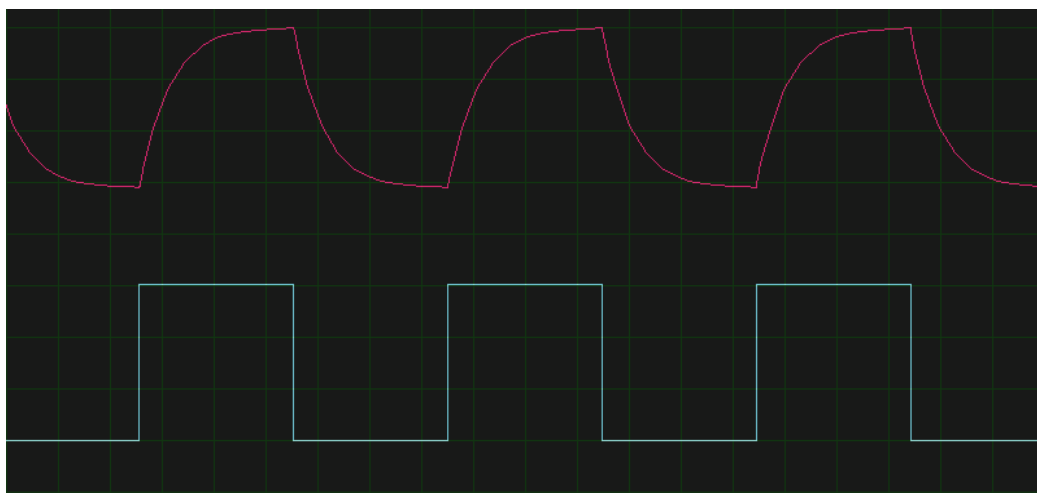


Рис. 6. Связь одноктактного ШИМ-сигнала в вольтах (вертикальная ось) применительно к соленоиду без средней точки и вертикального движения случайной точки, например, на верхней части сердечника в микрометрах (вертикальная ось) с течением времени (горизонтальная ось)

Заключение. Разработаны методики и конфигурации схемы управления магнитным полем соленоида наконечника УЗ-скалера. Проведено сравнение конфигурации схемы управления. Установлено, что наиболее перспективным по трем признакам (наработка на отказ сердечника соленоида, длительность безотказной работы блока управления соленоида, изменение длины сердечника) при одинаковых амплитуде, частоте и скважности прямоугольного ШИМ-сигнала является конструкция соленоида без средней точки с управлением однотактным прямоугольным ШИМ-сигналом для реализации магнитострикционного излучателя применительно к наконечнику стоматологического ультразвукового скалера. На основании проведенного анализа доказана перспективность использования указанной конфигурации.

Полученные в процессе исследования результаты применимы для разработки стоматологического ультразвукового скалера, а также для создания устройств с использованием магнитострикционного эффекта. К ним относятся разновидности датчиков уровня жидкости в резервуаре, магнитострикционные стабилизаторы частоты, магнитострикционные приемо-передающие устройства, такие как датчики и излучатели. Причем использование излучателей и датчиков именно на этом эффекте позволяет повысить чувствительность датчиков и точность, рабочую частоту излучателей. Наиболее часто метод сейчас используется для излучателей ультразвука, но он применим и для излучения гиперзвука.

Список литературы

1. Хорошилов М.Е. Применение магнитострикционных явлений в измерительной технике. URL: <https://studfile.net/preview/5882332/> (дата обращения: 26.10.2023).

2. Миллер Э., Хилл К., Бэмбер Дж., Дикинсон Р., Фиш П., Тер Хаар Г. *Применение ультразвука в медицине: Физические основы*. К. Хилл (ред). Москва: Мир; 1989. 568 с.

Об авторах:

Максим Константинович Суханов, студент кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), suhanov_mk@mail.ru

Маргарита Михайловна Сябро, студент кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), syabro.margo@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Maksim K. Sukhanov, Student of the Instrumentation and Biomedical Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), suhanov_mk@mail.ru

Margarita M. Syabro, Student of the Instrumentation and Biomedical Engineering Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 3440003, RF), syabro.margo@mail.ru

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.