

УДК 615.471

С.В. Штык

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## КОНЦЕПЦИЯ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ МОТОРНО-ЭВАКУАТОРНОЙ ФУНКЦИИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

В желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) присутствуют семь близко расположенных пейсмейкеров, генерирующих медленные волны на смежных частотах, и задающих ритм дистально расположенным отделам пищеварительного тракта. Предложена концепция метода диагностики электрической активности органов ЖКТ, отличающаяся использованием в качестве диагностической информации сигналы пейсмейкерных областей ЖКТ. На основании концепции разработан метод электрогастроэнтерографической диагностики, основанный на электрической активности пейсмейкеров ЖКТ, что позволяет диагностировать весь ЖКТ и его отделы. Также предложено слепое разделение сигналов (методы JADE и FastICA), для обработки электрогастроэнтерограммы, что позволяет повысить точность диагностики всего ЖКТ и отдельных его отделов.

**Ключевые слова:** желудочно-кишечный тракт, моторно-эвакуаторная функция, электрическая активность, пейсмейкер, электрогастроэнтерография, концепция.

### Введение

Болезни органов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) относятся к числу наиболее распространенных заболеваний на Украине.

Известно, что функциональные и органические заболевания ЖКТ часто сопровождаются нарушениями его моторно-эвакуаторной функции.

Наиболее распространенные методы диагностики состояния ЖКТ это: антродуоденальная манометрия, эзофагогастродуоденоскопия, в том числе капсульная, рентгеноскопия/рентгенография, сцинтиграфия, ультрасонография и электрогастроэнтерография (ЭГЭГ).

ЭГЭГ - это неинвазивный физиологичный, безвредный, простотой в использовании и необременительный для пациента метод оценки динамики моторной функции ЖКТ. Этот метод заключается в регистрации и обработке изменения биопотенциалов пищеварительного канала, которые регистрируются на поверхности кожи пациента.

За продолжительный период существования ЭГЭГ не вошла в широкую врачебную практику из-за низкой информативности, обусловленной плохим пространственным разрешением и перекрытием спектров полезных сигналов между собой и с артефактами дыхания и электрокардиограммы.

### 1. Формулирование проблемы

Проведенный анализ функционирования пищеварительного тракта показал, что он имеет собственную энтеральную нервную систему или внутреннюю нервную систему. В его мышечной оболочке локально распределены промежуточные клетки Коджела, которые служат пейсмейкерами, т.е. медиаторами кишечной нейропередачи. Они генерируют электрические медленные волны в гладкомы-

шечных клетках ЖКТ. Отсутствие или повреждение промежуточных клеток Коджела приводит к патологической электрической активности на этом участке пищеварительного канала, включая отсутствие медленных волн, что делает невозможным любой вид сокращения. Электрические волны, генерируемые пейсмейкерами ЖКТ, имеют отличные частоту и амплитуду, которые одинаковые для каждого сегмента, определяемого проксимально расположенным пейсмейкером, т.е. пейсмейкерная активность определяет наличие электрической активности (медленных волн) в дистальном сегменте пищеварительного тракта. Патологические изменения тонуса (частоты МВ) гладких мышц пищеварительного тракта ведут к изменениям моторно-эвакуаторной функции ЖКТ. Поэтому, диагностика состояния ЖКТ осуществляется по результатам оценки электрической активности гладкой мускулатуры пищеварительного тракта, генерируемой пейсмейкерами ЖКТ.

В ЖКТ присутствуют семь пейсмейкеров, задающих ритм дистальным отделам ЖКТ [1 – 6].

Существующие принципы ЭГЭГ, основанные на делении ЖКТ на отделы: желудок, двенадцатиперстная, тощая и подвздошная кишки, толстый кишечник, – каждый из которых имеет отличную частоту [7], не позволяют учесть перекрытие спектров полезных сигналов ЖКТ между собой и с артефактами.

### 2. Решение проблемы

Для усовершенствования методов и средств ЭГЭГ исследований моторно-эвакуаторной функции ЖКТ предложена концепция метода диагностики как всего ЖКТ, так и отдельных его отделов, которая основана на регистрации электрической активности пейсмейкеров ЖКТ.

Концепция данного метода диагностики состоит в:

1) определении схемы расположения электродов с целью получения максимального уровня сигналов и регистрации поверхностных сигналов, отражающих внутреннюю электрическую активность пейсмейкеров и дистально расположенных отделов пищеварительного тракта, которые представляют собой смесь полезных сигналов, помех и шума;

2) разработке модели смешивания сигналов пейсмейкеров, помех и шума;

3) обработке полученной смеси сигналов, включающей их фильтрацию и выбор методов слепого разделения сигналов для выделения сигналов пейсмейкеров, эффективных как для диагностики всего ЖКТ, так и отдельных его органов;

4) анализе полученной информации с выдачей диагностического заключения.

### **2.1. Определении схемы расположения электродов для диагностики МЭФ всего ЖКТ**

Согласно работе [8], эффективность исследования электрической активности мышечного органа с помощью регистрации потенциалов с кожной поверхности зависит от следующих факторов:

- анатомических размеров исследуемого органа;
- глубины расположения органа;
- расположения электродов относительно исследуемого органа;
- расположения электродов относительно друг друга;
- взаимной ориентации векторов электрической активности исследуемого органа и отведения.

Анализ методов шумоподавления в биомедицинских сигналах показал, что в условиях плохого пространственного разрешения и перекрытия спектров сигналов источников, присутствующих в ЭГЭГ смеси, перспективным методом является слепое разделение сигналов.

Из исследования в области кардиологии [9] следует, что с точки зрения слепого разделения сигналов, места расположения электродов должны удовлетворять следующим условиям:

- информация в каналах должна максимально отличаться, т.е. два электрода не должны регистрировать один и тот же сигнал;
- с помощью отведений необходимо получать максимальное отношение сигнал-шум за счет подавления артефактов и помех и усиления слабых сигналов электрической активности ЖКТ.

Причем следует отметить, что согласно принципам слепого разделения сигналов, при условии отсутствия эталона полезного сигнала или помехи количество каналов регистрации должно быть не менее двух.

Сигналы электрической активности органов ЖКТ – это сигналы малой мощности, так как брюшные мышцы, большой и малый сальники, находя-

щиеся над пищеварительным трактом, снижают уровень сигналов электрической активности (ЭА) ЖКТ. Низкий уровень полезных сигналов обусловлен также низкой степенью синхронности сокращений гладкой мускулатуры (при сравнении с синхронностью сердечной мышцы).

Низкая мощность сигналов ЭА ЖКТ является причиной существенного значения расположения электродов, так как при одном расположении электродов может увеличиться эффективность выделения полезных сигналов из электрогастроэнтерограммы, в то время как другое расположение электродов может снизить эффективность выделения полезных сигналов.

Анализируя анатомические особенности ЖКТ можно сделать вывод, что для повышения уровня ЭА ЖКТ необходимо активные электроды каждого отведения располагать над определенным отделом ЖКТ, охватывая всю длину исследуемого отдела так, чтобы ось отведения была параллельна диполю ЭА данного отдела, условно начинающегося в месте расположения пейсмейкера.

Согласно проведенному анализу артефактов, помех и шума, с электрогастроэнтерограммой смешиваются магнитные, электростатические, электромагнитные и электрохимические помехи, проникающие в аппаратуру регистрации, и физиологические артефакты. К источникам физиологических артефактов относятся: ЭА кожи или кожно-гальванический рефлекс, артефакт ЭКГ, сосудистые волны, электромиограмма подкожных мышц, электромиограмма диафрагмы, артефакты дыхания и движения.

Если представить источник произвольной электрической активности внутри тела человека в виде диполя тока, то на поверхности тела будут регистрироваться силовые линии этого диполя. Силовые линии можно восстановить по разности потенциалов между опорным электродом и электродами, расположенными по схеме отведений. В ЭГЭГ используются биполярные отведения. Это значит, что каждый канал электрографа имеет дифференциальный вход. В сравнении с монополярным отведением, применяемым чаще всего в электрокардиографии и электроэнцефалографии, такое отведение позволяет получить:

- более низкий уровень электродной разности потенциалов за счет вычитания напряжений поляризации электродов на инвертирующем и неинвертирующем входах и, следовательно, больший допустимый коэффициент усиления;

- суммарную проекцию всех лежащих под отведением векторов диполей ЭА ЖКТ.

Согласно проведенным исследованиям, в диапазоне электрической активности пейсмейкерных областей ЖКТ находятся не только медленные волны и потенциалы действия пейсмейкерных облас-

тей, но и артефакт дыхания, и артефакт ЭКГ. Артефакт дыхания перекрывается с медленными волнами пейсмейкеров двенадцатиперстной кишки и подвздошной кишки. Артефакт ЭКГ перекрывается по спектру с потенциалами действия, так как спектр Т-волн находится на частоте 1-2 Гц.

С учетом наличия девяти сигналов в ЭГЭГ смеси согласно принципам СРС необходимо иметь минимум десять каналов регистрации.

На рис. 1 предложена схема расположения электродов биполярных отведений для проведения ЭГЭГ исследования.

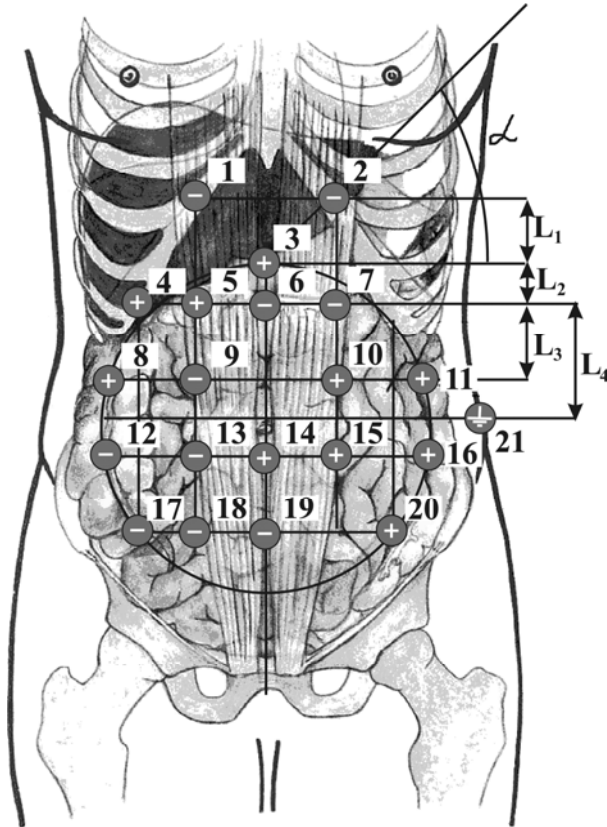


Рис. 1. Схема расположения электродов для регистрации ЭГЭГ

Расположение электродов осуществлено согласно основным выше изложенным принципам расположения электродов, которым необходимо придерживаться при регистрации электрических потенциалов мышц с поверхности кожи. На рис. 1 цифрами 2-3 обозначены электроды биполярного отведения используемого для регистрации ЭА пейсмейкера желудка, 1-5 – для регистрации ЭА пейсмейкера двенадцатиперстной кишки, 18-14 – подвздошной кишки, 17-8 – ЭА пейсмейкера слепой кишки, 12-4 – ЭА восходящей ободочной кишки, 6-11 – поперечной ободочной кишки, 19-20 – сигмовидной кишки, а отведения, 7-16, 9-15, 13-10 – используются для регистрации дополнительных сигналов, необходимых для качественной обработки методом слепого разделения сигналов. Числом 21 обозначен опорный электрод.

На рис. 1 знаком «минус» обозначен электрод, с которого сигнал подается на инвертирующий вход биполярного усилителя, а знаком «плюс» – электрод, с которого сигнал подается на неинвертирующий вход биполярного усилителя.

При этом шестой электрод располагается на передней срединной линии тела, в среднем на  $L_4=63,7\pm 3,9$  мм выше пупка [10].

Третий электрод находится от шестого электрода на расстоянии  $L_2=20$  мм.

Второй электрод располагается относительно третьего влево на  $L_1=40$  мм и вверх под углом  $45^\circ$  (угол  $\alpha$ ).

Первый электрод размещается симметрично второму электроду относительно срединной линии тела.

Пятый электрод, располагается на пересечении линии, выходящей из точки расположения первого электрода и проходящей параллельно срединной линии тела.

Седьмой электрод размещается симметрично пятому электроду относительно срединной линии тела.

Четвертый электрод располагается в начале среднебоковой линии живота, на одной линии с электродами пять-семь с правой стороны пациента.

Семнадцатый электрод располагается в конце среднебоковой линии живота.

Двадцатый электрод находится на левой среднебоковой линии живота на одном уровне с семнадцатым электродом.

На одной линии с пятым электродом находятся девятый, тринадцатый и восемнадцатый электроды на расстоянии в среднем  $L_3=39,95\pm 2,74$  мм друг от друга. Эта вертикальная линия параллельна срединной линии тела.

Десятый и пятнадцатый электроды располагаются на одной линии, параллельной срединной линии тела на расстоянии  $L_3$  друг от друга.

Четырнадцатый электрод находится в точке пересечения линии, соединяющей тринадцатый и пятнадцатый электроды и срединной линии тела.

Девятнадцатый электрод находится на этой же линии вниз на расстоянии  $L_3$ .

Восьмой, одиннадцатый, двенадцатый и шестнадцатый электроды располагаются на окружности радиуса в среднем  $65,7\pm 3,9$  мм с центром возле пупка, как показано на рис. 1.

Для уменьшения артефактов опорный электрод располагается над верхней передней подвздошной костью, на уровне пупка – середины схемы, так как слева в кишечнике в норме не обнаружены пейсмейкеры.

Как видно из рис. 1, семь электродов: 1, 2, 6, 12, 17, 18 и 19 - биполярных отведений размещаются над областью расположения пейсмейкеров. Оставшиеся три канала отведения для выделения арте-

фактов и шума в отдельные каналы методом СРС. Поскольку целью исследования является ЭА ЖКТ, а не качественный сигнал артефакта, то электроды трех отведений располагаются также над ЖКТ. Расположение отведений 9-15, 13-19, 7-16 согласно предложенной схеме позволяет:

1) унифицировать схему биполярных отведений для ЭГЭГ диагностики, что позволяет зарегистрировать полезные сигналы источников, положение которых меняется во времени, в зависимости от пола, возраста и конституции пациента;

2) из-за наличия большого сальника сигналы пейсмейкеров подвздошной кишки и толстой кишки ослабляются в большей степени по сравнению с сигналами пейсмейкеров двенадцатиперстной кишки и желудка, поэтому расположение дополнительных отведений в данных областях позволяет получить дополнительную информацию (сигнальную компоненту ослабленных сигналов указанных пейсмейкеров) в регистрируемой отведениями смеси. Данная дополнительная информация позволяет повысить эффективность проведения выделения данных сигналов методом СРС.

## 2.2. Обработка сигналов ЭГЭГ для диагностики моторно-эвакуаторной функции всего ЖКТ

При обработке для подавления помех, артефактов и шума, находящихся вне спектра ЭА пейсмейкеров ЖКТ, необходимо проводить полосовую цифровую фильтрацию нерекурсивным фильтром, причем, полоса фильтрации должна быть одинаковой для всех каналов. Согласно проведенным исследованиям для фильтрации ЭГЭГ в полосе 0,01 – 1,33 Гц могут использоваться фильтры 75 порядка, синтезированные методом обратного преобразования Фурье с использованием окон.

После цифровой полосовой фильтрации электрогастроэнтерограммы полезные сигналы остаются искаженными из-за наличия артефактов, перекрывающихся с полезным сигналом по спектру. Для борьбы с артефактами дыхания и ЭКГ и разделения сигналов ЭА пейсмейкеров, применяется эффективный метод СРС.

Согласно слепой обработке сигналы электрогастроэнтерограммы, отфильтрованные согласно диапазону ЭА пейсмейкерных областей, можно представить смесью сигналов, источниками которых являются пейсмейкеры и артефакты на фоне шума.

Как показано в [12], согласно статистическим свойствам сигналов источников и условиям их смешивания при прохождении через мышечные и жировые ткани, определена линейная модель смешивания сигналов ЭА ЖКТ. Для получения незашумленных сигналов, содержащих информацию об электрической активности одного или нескольких отделов ЖКТ необходимо определить эффективные методы СРС, которые позволят из смеси СИ получить исходные СИ [11].

Как показано в работе [12], метод JADE позволяет получить с минимальными искажениями сигналы ЭА следующих пейсмейкерных областей ЖКТ: желудка, двенадцатиперстной кишки, подвздошной кишки, слепой, восходящей ободочной и поперечно-ободочной кишки. Оценка СИ пейсмейкерной области сигмовидной кишки при использовании метода JADE получена с искажением формы сигнала. Т.е. использование метода JADE не позволяет диагностировать весь ЖКТ, а именно отдел сигмовидной кишки.

Для расширения возможностей метода ЭГЭГ диагностики проведены дополнительные исследования.

СИ пейсмейкера сигмовидной кишки имеет асимметричное распределение. Согласно [13], использование нелинейной функции «skew» в реализации метода FastICA, в отличие от используемой в работе [12] функции «row3», позволяет разделять асимметричные СИ. Наложённые осциллограммы напряжений исходных сигналов пейсмейкеров до смешивания на брюшной стенке и осциллограммы напряжений оценок исходных сигналов пейсмейкеров после обработки методом FastICA приведены на рис. 2. На рис. 2 Y1 – это осциллограммы ЭА пейсмейкера желудка, Y2 – пейсмейкера двенадцатиперстной кишки, Y3 – подвздошной кишки, Y4 – слепой кишки, Y5 – восходящей ободочной, Y6 – поперечно-ободочной, Y7 - сигмовидной кишок. Как видно из рисунка, использование метода FastICA с функцией «skew» позволяет получить неискаженным только сигнал ЭА пейсмейкера сигмовидной кишки, а СИ других пейсмейкеров имеют существенные искажения формы сигнала.

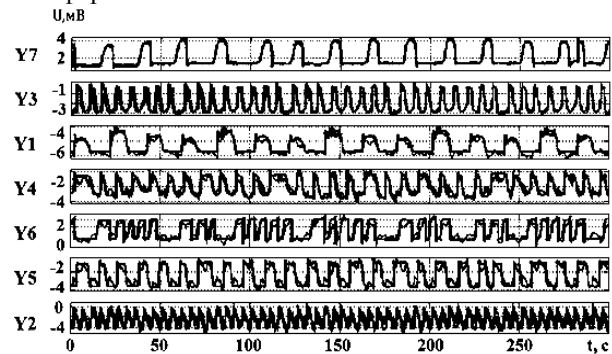


Рис. 2. Оценки сигналов пейсмейкеров ЖКТ после обработки методом JADE

Таким образом, согласно работе [12] методом СРС, позволяющем выделять наибольшее количество сигналов пейсмейкеров из ЭГЭГ смеси является метод JADE. Параллельное применение метода FastICA с нелинейной функцией «skew» позволяет выделить из десятиканальной смеси сигнал ЭА пейсмейкера сигмовидной кишки с наименьшими искажениями. Поэтому для оценки ЭА семи пейсмейкеров ЖКТ необходимо проводить обработку десятиканальной электрогастроэнтерограммы методом

JADE, с целью получения ЭА шести пейсмейкеров ЖКТ, и методом FastICA с нелинейной функцией «skew» для получения сигнала ЭА пейсмейкера сигмовидной кишки.

### Выводы

Таким образом, в данной статье предложена концепция метода диагностики электрической активности ЖКТ, отличающаяся использованием в качестве диагностической информации сигналы пейсмейкерных областей ЖКТ.

На основании концепции предложен метод электрогастроэнтерографической диагностики, основанный на электрической активности пейсмейкеров ЖКТ, что позволяет диагностировать весь ЖКТ и его отделы.

Также предложено слепое разделение сигналов (методы JADE и FastICA), для обработки электрогастроэнтерограммы, что позволяет повысить точность диагностики всего ЖКТ и его отделов.

### Список литературы

1. Shafik A. Colonic pacing in the treatment of patients with irritable bowel syndrome: technique and results / A. Shafik, O. El-Sibai, A.A. Shafik, I. Ahmed // *Frontiers in bio-science*. – 2005. – Vol. 8, № 5. – P. 13-18.
2. Rae M.G. Control of motility patterns in the human colonic circular muscle layer by pacemaker activity / M.G. Rae, Fleming N., McGregor D.B., Sanders K.M., Keef K.D. // *The journal of physiology online*. – 1998. – Vol. 510, № 1. – P. 309-320.
3. Nurko S. Motility of the colon and anorectum / S. Nurko // *Neoreviews*. – 2006. – Vol. 7, № 1. – P. 34-48.
4. *Medical physiology*. – Lippincott Williams and Wilkins, 2003. – 781 p.
5. Hansen M.B. Neurohumoral control of gastrointestinal motility / Hansen M.B. // *Physiology research*. – 2005. – Vol. 52. – P. 1-30.

6. Lu G. Inflammation modulates in vitro colonic myoelectric and contractile activity and interstitial cells of Cajal / Lu G., Qian X., Berezin I., Telford G.L., Huizinga J.D., Arnal S.K. // *American journal of physiology*. – 1997. – Vol. 273, № 6. – P. 1233-1245.

7. Ступин В.А. Периферическая электрогастроэнтерография в диагностике нарушений моторно-эвакуаторной функции желудочно-кишечного тракта / В.А. Ступин, Г.О. Смирнова, М.В. Баглаенко, С.В. Силюянов, Д.Б. Закуров // *Лечащий врач*. – 2005. – № 2. – С. 60-62.

8. Davis J.F. Manual of surface electromyography / Davis J.F., Eng M. // *Medical technical report*, 1959. – 184 p.

9. Vigneron V. Sensor array for foetal ECG. Part 2: sensor selection / Vigneron V., Azancot A., Herail C., Schmidt M., Sibony O., Jutten C. // *2nd IEEE International Conference on Computational Intelligence in medical and Healthcare*. Costa da Caparica, Lisabon: Portugal. – 2008.

10. Лемешко З.А. Ультразвуковая диагностика заболеланий желудка: руководство / З.А. Лемешко, З.М. Османова – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 80 с.

11. Штык С.В. Обработка электрогастроэнтерограммы методом слепого разделения сигналов / С.В. Штык, М.Ф. Лагутин // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. Тем. вып.: Новые решения в современных технологиях. – 2008. – Вып. 3. – С. 6-15.

12. Штык С.В. Слепое разделение смоделированных сигналов электрогастрограммы и электроэнтерограммы / С.В. Штык, А.И. Кузин // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2008. – №1(28). – С. 32-35.

13. Gadhok N. Robust independent component analysis for cognitive informatics / N. Gadhok, W. Kinsner // *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*. – 2005. – Vol. 2, No. 4. – P. 86-92.

Поступила в редколлегию 1.06.2010

Рецензент: канд. техн. наук А.И. Кузин. Национальный радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков.

### КОНЦЕПЦІЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ МОТОРНО-ЕВАКУАТОРНОЇ ФУНКЦІЇ ШЛУНКОВО-КИШКОВОГО ТРАКТУ

С.В. Штык

У шлунково-кишковому тракті (ШКТ) присутні сім близько розташованих пейсмейкерів, що генерують повільні хвилі на суміжних частотах, і задають ритм дистально розташованим відділам травного тракту. Запропонована концепція діагностики електричної активності ШКТ, що відрізняється використанням в якості діагностичної інформації сигнали пейсмейкерних областей ШКТ. На підставі концепції розроблено метод електрогастроентерографічної діагностики, оснований на електричній активності пейсмейкерів ШКТ, що дозволяє діагностувати увесь ШКТ і його відділи. Також запропонований сліпий розподіл сигналів (методи JADE і FastICA), для обробки електрогастроентерограмми, що дозволяє підвищити точність діагностики усього ШКТ і окремих його відділів.

**Ключові слова:** шлунково-кишковий тракт, моторно-евакуаторна функція, електрична активність, пейсмейкер, електрогастроентерографія, концепція.

### THE CONCEPT OF DIAGNOSTIC METHOD OF MOTOR-EVACUATION FUNCTION OF THE GASTROINTESTINAL TRACT

S.V. Shtyk

In the gastrointestinal tract are seven close pacemakers that generate slow waves at adjacent frequencies and set the rhythm of the distal located parts of digestive tract. The concept of diagnostic electrical activity of the gastrointestinal tract differs by the use of pacemaker region's signals of the digestive tract as of diagnostic information is offered. The electrogastroenterographical diagnosis method based on gastrointestinal tract pacemaker's electrical activity is developed on concept, which allows to diagnose the entire gastrointestinal tract and its parts. It's also proposed blind signal separation (methods JADE and FastICA), for the electrogastroenterogram processing, thus enhancing the accuracy of diagnosis of the digestive tract and its parts.

**Keywords:** gastroenteric highway, motor-evacuator function, electric activity, pacemaker, electrogastroenterographi, conception.