

СЕРІЯ «Фізико-математичні науки»

УДК 519.6:004.94

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-8\(36\)-1228-1237](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-8(36)-1228-1237)

Самусь Василь Михайлович аспірант кафедри системного аналізу та теорії оптимізації факультету математики та цифрових технологій, ДВНЗ «УжНУ», вул. Університетська, 14, м. Ужгород, тел.: (050) 622-40-04, <https://orcid.org/0000-0002-1682-689X>

Антосяк Павло Павлович кандидат фіз.- мат. наук, доцент кафедри системного аналізу та теорії оптимізації факультету математики та цифрових технологій, ДВНЗ «УжНУ», вул. Університетська, 14, м. Ужгород, тел.: (050) 945-40-78, <https://orcid.org/0000-0001-7131-1795>

Самусь Євгенія Іванівна ст. викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж інженерно-технічного факультету, ДВНЗ «УжНУ», вул. Університетська, 14, м. Ужгород, тел.: (099) 027-65-81, <https://orcid.org/0009-0003-9601-289X>

Тютюнникова Ганна Семенівна старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж інженерно-технічного факультету, ДВНЗ «УжНУ», вул. Університетська, 14, м. Ужгород, тел.: (050) 869-62-77, <https://orcid.org/0000-0003-0859-6382>

Балога Світлана Іванівна канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж інженерно-технічного факультету, ДВНЗ «УжНУ», вул. Університетська, 14, м. Ужгород, тел.: (050) 372-32-96, <https://orcid.org/0000-0002-1221-9072>

ПОБУДОВА БАЗОВОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ ЕКТОПІЧНИХ СЕРЦЕВИХ УДАРІВ

Анотація. Електрокардіографія є одним із ключових методів вивчення функціонування серця та діагностики захворювань серцево-судинної системи. Аналіз ЕКГ є критично важливим інструментом у сучасній кардіології для своєчасної діагностики, лікування і профілактики серцево-судинних захворювань. Регулярний аналіз ЕКГ може допомогти виявити потенційно небезпечні стани на ранніх стадіях, що дозволяє вчасно розпочати

профілактичне лікування та уникнути потенційних проблем. Сучасні біотрекери для ЕКГ відкривають нові можливості завдяки технічним інноваціям і портативності. Серед багатьох переваг відзначимо мобільність, зручність та можливість постійного моніторингу. Ці всі фактори відкривають шлях до можливості дистанційного аналізу. В останні три десятиліття здійснено суттєвий прорив в сфері аналізу даних ЕКГ. З'явилося декілька інструментів, які можна використати для базового аналізу сигналу. Але в більшості випадків це стосується лише пошуку піків та інтервалів на числовому відображенні кардіограми. Цих даних зазвичай є недостатньо для повного аналізу ЕКГ.

Дана стаття присвячена побудові математичної моделі для аналізу цифрової кардіограми. Цифрова кардіограма містить значну кількість показників, але для дослідження обрані саме удари, які можна охарактеризувати як вироджені. Виродженість ударів визначається суттєвими відхиленнями від стандартних показників часу серцевого скорочення, ширини QRS-комплексу, наявністю Р-хвилі.

Задача пошуку ектопічних ударів зводиться до задачі розділення сигналу на сегменти. Кожен із сегментів відповідає одиничному серцевому удару, і в подальшому аналізується на наявність ознак, що визначають ектопічність. На основі отриманих числових характеристик сегментів будується числовий ряд з ознаками ектопічності для виявлення їх періодичності. Для побудови моделі використовуються інструменти з відкритим кодом: мова програмування Python, бібліотеки Neurokit та Pandas. Розроблена математична модель дозволяє отримати статистичні характеристики цифрової кардіограми, що дає можливість віднести ЕКГ до певної категорії, яка відповідає деякому виду захворювання.

Ключові слова: математична модель, електрична цифрова кардіограма, ектопічність, статистичні характеристики, біотрекери, сегментація.

Samus Vasyi Mykhailovych Phd student, Department of System Analysis and Optimization Theory, Faculty of Mathematics and Digital Technologies, Uzhhorod National University, St. Universytetska, 14, Uzhhorod, tel.: (050) 622-40-04, <https://orcid.org/0000-0002-1682-689X>

Antosiak Pavlo Pavlovych Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of System Analysis and Optimization Theory, Faculty of Mathematics and Digital Technologies, UzNU, St. Universytetska, 14, Uzhhorod, tel.: (050) 945-40-78, <https://orcid.org/0000-0001-7131-1795>

Samus Yevheniia Ivanivna Senior Lecturer, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Engineering, UzNU, St. Universytetska, 14, Uzhhorod, tel.: (099) 027-65-81, <https://orcid.org/0009-0003-9601-289X>

Tiutiunnykova Hanna Semenivna Senior Lecturer, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Engineering, Uzhhorod National University, St. Universytetska, 14, Uzhhorod, tel.: (050) 869-62-77, <https://orcid.org/0000-0003-0859-6382>

Baloha Svitlana Ivanivna Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Systems and Networks, Faculty of Engineering, Uzhhorod National University, St. Universytetska, 14, Uzhhorod, tel.: (050) 372-32-96, <https://orcid.org/0000-0002-1221-9072>

BUILDING A BASIC MATHEMATICAL MODEL FOR DETECTING ECTOPIC HEARTBEATS

Abstract. Electrocardiography (ECG) is a key method for studying heart function and diagnosing cardiovascular diseases. ECG analysis is a critically important tool in modern cardiology for timely diagnosis, treatment, and prevention of cardiovascular diseases. Regular ECG analysis can help detect potentially dangerous conditions at an early stage, allowing for timely initiation of preventive treatment and avoiding potential problems. Modern ECG trackers offer new possibilities thanks to technological innovations and portability. Among the many advantages are mobility, convenience, and the ability for continuous monitoring. All these factors open the way for remote analysis. Over the past three decades, there has been a significant breakthrough in the field of ECG data analysis. Several tools have been developed for basic ECG signal analysis. However, in most cases, this only involves detecting peaks and intervals on a numerical representation of the electrocardiogram. This data is usually not enough for a complete ECG analysis.

This article is dedicated to building a mathematical model for analyzing digital electrocardiograms. A digital electrocardiogram contains a significant amount of data, but for this study, focus is on beats that can be characterized as degenerate. Ectopicy of beats is defined by significant deviations from standard indicators of heart rate, QRS complex width and the presence of P-waves.

The task of detecting ectopic beats is reduced to the problem of signal segmentation. Each segment corresponds to a single heart beat and is subsequently analyzed for signs indicative of ectopy. Based on the obtained numerical characteristics of the segments, a numerical series with ectopy features is constructed to detect their periodicity. Tools with open source are used to build the model: the Python programming language, and the Neurokit and Pandas libraries. The developed mathematical model allows obtaining statistical characteristics of a digital cardiogram, which makes it possible to assign an ECG to a certain category corresponding to a certain type of disease.

Keywords: mathematical model, electrocardiography, ectopicity, statistical characteristics, biotrackers, segmentation.

Постановка проблеми. Аналіз цифрової кардіограми - це багатоетапний процес, де деякі етапи досліджені значно менше, ніж інші. Є багато різних способів визначення піків [1, 6] або ж сегментів на зразок QRS-комплексу [2, 5]. Однак, процес аналізу визначених піків та сегментів і співставлення їх з фізичним процесом є недостатньо вивченим.

В контексті даного дослідження зосередимо увагу на етап аналізу періодичності ектопічних ударів. Під періодичністю будемо вважати як наявність груп з послідовними ектопічними ударами, так і періодичність виникнення таких груп.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пошук матеріалів для статті було здійснено згідно медичних термінів “ECG”, “ventricular”, “supraventricular”, “fibrillation” в період з січня 2010 року по квітень 2024 року та обрано дослідження, які стосувалися визначення та побудови базових принципів формування математичної моделі. Більшість досліджень були вузькоспеціалізованими і стосувалися якогось частинного випадку. Ці дані можна використовувати для визначення тої чи іншої характеристики загальної базової моделі. Однак, питання практичних аспектів реалізації математичної моделі з використанням сучасних програмних механізмів залишається відкритим.

Мета статті полягає у дослідженні практичних аспектів побудови базової математичної моделі для аналізу періодичності ектопічних серцевих ударів з використанням мови програмування Python та бібліотеки Neurokit2.

Виклад основного матеріалу. З метою структурованого підходу до даних ЕКГ та їх аналізу необхідно побудувати математичну модель процесу. Модель будемо реалізовувати з використанням мови програмування Python, яка відзначається наявністю великої кількості бібліотек для аналізу даних. Крім того, Python має читабельний і зрозумілий синтаксис, що дозволяє сконцентруватися безпосередньо на процесі побудови алгоритмів та моделей.

На першому етапі опишемо базовий абстрактний клас який буде батьківським класом для всіх моделей ЕКГ. В деяких інших мовах цей клас можна назвати інтерфейсом.

```
from abc import ABC, abstractmethod
```

```
class IBaseEcgModel(ABC):  
    @abstractmethod  
    def load_signal(self, filename: str):  
        ...
```

```
@abstractmethod
def save_signal(self, filename: str):
```

```
...
```

```
@abstractmethod
def analyze(self):
```

```
...
```

```
@abstractmethod
def category(self):
```

В даному класі визначено чотири методи, які повинні бути у всіх його нащадків. Як видно з назв методів, основну увагу приділимо аналізу. Створимо нащадок цього абстрактного базового класу, який буде реалізувати описані вище методи використовуючи бібліотеку Neurokit для первинного пошуку піків (екстремумів) та інтервалів.

Нижче наведено оголошення такого класу:

```
class ECG(IBaseEcgModel):
    def __init__(self, raw_data=None,
sampling_rate=settings.DEFAULT_SAMPLING_RATE):
        self._raw_data = raw_data or []
        self._data = []
        self._sampling_rate = sampling_rate
        self._quality = []
        self._r_peaks = []
        self._ecg_r_peaks = {}
        self._rate = 0
        self._info = []
        self._signal = None
        self._waves = None
        self.ventricular = None
        self.supra_ventricular = None
        self.atrial_fibrillation = None
        self._hrv = None
```

Для ініціалізації екземпляру класу необхідно вказати дані ЕКГ у форматі довільного числового ряду та частоту сигналу. Даний клас реалізує декілька методів. Розглянемо реалізацію методу analyze.

```
def analyze(self):
    self.clean()
    self.r_peaks()
    self.process_delineate()
    self.process_ectopic_beats()
```

Процес аналізу розділений на кілька частин:

self.clean() - очищає та нормалізує сигнал;

self.r_peaks() - знаходить Р піки - найбільш характерні екстремуми ЕКГ, на основі яких визначаються інші ключові дані;

self.process_delineate() - розділяємо сигнал на хвилі - частини, що характеризують окремих серцевий удар.

В результаті початкового розділення отримуємо DataFrame, кожен рядок буде характеризувати серцевий удар, а стовпці будуть містити числову інформацію про індекс Р, Q, R, S, Т-піків. На основі цих даних визначаємо додаткові стовпці, такі як час серцевого скорочення (відстань між сусідніми Р піками), довжину QRS та QS-комплексів. А вже з використанням цих даних визначаємо підозрілі на ектопічність удари. Фрагмент реалізації наведено нижче:

```
def process_delineate(self):
    self._signal, _waves = nk.ecg_delineate(
        ecg_cleaned=self._data,
        sampling_rate=self._sampling_rate,
        rpeaks=self._ecg_r_peaks,
    )
    self._waves = pd.DataFrame(_waves)
    self._waves[settings.EGG_R_PEAKE_COLUMN] =
self._ecg_r_peaks.get(
    settings.EGG_R_PEAKE_COLUMN
)
    self._waves["ECG_RR"] =
self._waves[settings.EGG_R_PEAKE_COLUMN].diff()
    self._waves["ECG_RR_ms"] = self._waves["ECG_RR"] /
self._sampling_rate * 1000
    self._waves["ECG_HR"] = 60 * self._sampling_rate /
self._waves["ECG_RR"]
    self._waves["ECG_60"] = self._waves["ECG_HR"] <
settings.MIN_HEART_RATE
    self._waves["ECG_100"] = self._waves["ECG_HR"] >
settings.MAX_HEART_RATE
    self._waves["ECG_QRS"] = (
        self._waves["ECG_R_Offsets"] - self._waves["ECG_R_Onsets"]
    )
    self._waves["ECG_QS"] = self._waves["ECG_S_Peaks"] -
self._waves["ECG_Q_Peaks"]
    self._waves[settings.VENTRICULAR_COLUMN] =
self._waves["ECG_100"] & (
```


Пошук послідовних ударів реалізовано функцією find_repeat_beats:

```
def find_repeat_beats(data: List) -> RepeatBeatsBaseModel:
    repeat_beats = RepeatBeatsBaseModel()
    ct = 0
    for item in data:
        if item:
            ct = ct + 1
        else:
            if ct == settings.COUPLES_THRESHOLD_EQ:
                repeat_beats.couplets = repeat_beats.couplets + 1
            elif settings.SALVOS_THRESHOLD_MIN <= ct <=
settings.SALVOS_THRESHOLD_MAX:
                repeat_beats.salvos = repeat_beats.salvos + 1
            elif settings.TACHYCARDIA_THRESHOLD_MIN <= ct:
                repeat_beats.tachycardia = repeat_beats.tachycardia + 1
            ct = 0
    return repeat_beats
```

Додатково зазначимо, що межа між salvos та tachycardias визначається у налаштуваннях.

Пошук періодичностей реалізовано функціями find_bigeminies та find_trigeminies:

```
find_bigeminies = partial(find_regularity, frequency=2)
find_trigeminies = partial(find_regularity, frequency=3)
```

Ці функції є частинними випадками більш широкої функції find_regularity:

```
def find_regularity(data: List, frequency: int = 2) -> int:
    count_regularity = 0
    possible_regularity = False
    i = 0
    while i < (len(data) - 1):
        dd = data[i + 1 : i + frequency]
        if data[i] and not any(dd):
            if possible_regularity:
                count_regularity = count_regularity + 1
            else:
                possible_regularity = True
            i = i + frequency
        else:
            if possible_regularity:
                possible_regularity = False
            i = i + 1
    return count_regularity
```

Таким чином, на виході отримуємо об'єкт з полями total_beats, couplets, salvos, tachycardias, bigeminies, trigeminies. Навіть візуальний аналіз отриманих даних дасть змогу відповісти чи є підозра на виродженість серцевого ритму.

Результатом роботи є об'єкт у форматі json:

```
{
  "beats": 10000,
  "ventricular": {
    "couplets": 45,
    "salvos": 0,
    "tachycardia": 0,
    "total_beats": 120,
    "bigeminies": 0,
    "trigeminies": 0
  },
  "supra_ventricular": {
    "couplets": 0,
    "salvos": 0,
    "tachycardia": 0,
    "total_beats": 0,
    "bigeminies": 0,
    "trigeminies": 0
  },
  "atrial_fibrillation": {
    "couplets": 0,
    "salvos": 0,
    "tachycardia": 0,
    "total_beats": 4,
    "bigeminies": 0,
    "trigeminies": 0
  }
}
```

Даний об'єкт містить інформацію про загальну кількість ударів, можливі ектопічні удари. Кожна група ектопічних ударів має типову структуру і містить інформацію про кількість (total_beats) виявлених ектопічних ударів, кількість послідовних ектопічних ударів (couplets, salvos, tachycardia) та їх періодичність (bigeminies, trigeminies).

Висновки. Побудована модель дає можливість визначати як загальні випадки вироджених ударів, таких як вентрикулярні та суправентрикулярні ектопічні удари, так і більш частинні випадки, такі як миготлива аритмія (atrial fibrillation). Слід відзначити, що створена модель може просто розширюватись для додаткових параметрів, що є перспективним напрямом подальших досліджень.

Література:

1. Emrich, J., Koka, T., Wirth, S., & Muma, M. (2023), Accelerated Sample-Accurate R-Peak Detectors Based on Visibility Graphs. 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 1090-1094, doi: 10.23919/EUSIPCO58844.2023.10290007
2. Kalidas, V., & Tamil, L. (2017, October). Real-time QRS detector using stationary wavelet transform for automated ECG analysis. In 2017 IEEE 17th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE) (pp. 457-461). IEEE.
3. Lipponen, J. A., & Tarvainen, M. P. (2019). A robust algorithm for heart rate variability time series artefact correction using novel beat classification. Journal of medical engineering & technology, 43(3), 173-181.
4. Lourenço, A., Silva, H., Leite, P., Lourenço, R., & Fred, A. L. (2012, February). Real Time Electrocardiogram Segmentation for Finger based ECG Biometrics. In Biosignals (pp. 49-54).
5. Pan, J., & Tompkins, W. J. (1985). A real-time QRS detection algorithm. IEEE transactions on biomedical engineering, (3), 230-236.
6. Rodrigues, T., Samoutphonh, S., Silva, H., & Fred, A. (2021, January). A Low-Complexity R-peak Detection Algorithm with Adaptive Thresholding for Wearable Devices. In 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR) (pp. 1-8). IEEE.
7. T. Koka and M. Muma, "Fast and Sample Accurate R-Peak Detection for Noisy ECG Using Visibility Graphs," 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2022, pp. 121-126.
8. Zhao, Z., & Zhang, Y. (2018). "SQI quality evaluation mechanism of single-lead ECG signal based on simple heuristic fusion and fuzzy comprehensive evaluation". Frontiers in Physiology, 9, 727.

References:

1. Emrich, J., Koka, T., Wirth, S., & Muma, M. (2023), Accelerated Sample-Accurate R-Peak Detectors Based on Visibility Graphs. 31st European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 1090-1094, doi: 10.23919/EUSIPCO58844.2023.10290007
2. Kalidas, V., & Tamil, L. (2017, October). Real-time QRS detector using stationary wavelet transform for automated ECG analysis. In 2017 IEEE 17th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE) (pp. 457-461). IEEE.
3. Lipponen, J. A., & Tarvainen, M. P. (2019). A robust algorithm for heart rate variability time series artefact correction using novel beat classification. Journal of medical engineering & technology, 43(3), 173-181.
4. Lourenço, A., Silva, H., Leite, P., Lourenço, R., & Fred, A. L. (2012, February). Real Time Electrocardiogram Segmentation for Finger based ECG Biometrics. In Biosignals (pp. 49-54).
5. Pan, J., & Tompkins, W. J. (1985). A real-time QRS detection algorithm. IEEE transactions on biomedical engineering, (3), 230-236.
6. Rodrigues, T., Samoutphonh, S., Silva, H., & Fred, A. (2021, January). A Low-Complexity R-peak Detection Algorithm with Adaptive Thresholding for Wearable Devices. In 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR) (pp. 1-8). IEEE.
7. T. Koka and M. Muma, "Fast and Sample Accurate R-Peak Detection for Noisy ECG Using Visibility Graphs," 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2022, pp. 121-126.
8. Zhao, Z., & Zhang, Y. (2018). "SQI quality evaluation mechanism of single-lead ECG signal based on simple heuristic fusion and fuzzy comprehensive evaluation". Frontiers in Physiology, 9, 727.