A well-structured article on **biological age assessment using fractal dimension on RR-interval time series** should include the following sections:

1. **Introduction**

**Одні і ті самі індивіди можуть мати один і той самий хронологічний вік, проте різний стан підсистем організму (оцінєються біологічним віком). Біологічний вік визначається на основі біомаркерів старіння, які відображають функціональний стан організму. Few hypothesis on correspondence among BA, CA and BMs are given here [1]. Оцінка біологічного віку є важливою, оскільки** кожна система, кожна тканина має свої, тільки їй притмаманні особливості старіння. Біологічний вік, який відображає ступінь старіння організму як на рівні різноманітних підсистем, так і на клітинному рівні, може суттєво відрізнятися від календарного віку та надавати більш точну інформацію про загальний стан здоров'я та ризик розвитку різноманітних захворювань. Оцінка біологічного віку є важливою не тільки для клінічної медицини, але й для профілактичних заходів, а також для моніторингу ефективності різних антивікових втручань, використання геропротекторів. Визначення біологічного віку дасть змогу диференціювати геропротектори за ознакою уповільнення старіння на різних етапах онтогенезу і відбирати для подальшого вивчення ті з них, котрі в найбільшій ступені будуть відповідати ідеалу. У зв'язку з розвитком інформаційних технологій та швидким зростанням обсягів доступних даних, значної уваги набувають методи машинного навчання, які можуть бути використані для аналізу великих обсягів біологічної інформації та створення точних моделей прогнозування біологічного віку. Одним з методів оцінки біологічного віку людини може бути його визначення за допомогою ЕКГ.

Потреба в надійних методах оцінки біологічного віку зумовлена тим, що дані ЕКГ є досить поширеним та простим для отримання біомаркером старіння, який якісно та кількісно відображає функціональний стан серця. Відомо, що з віком варіабельність серцевого ритму (ВСР) змінюється. Оцінка певних параметрів часового ряду ВСР могла б дати змогу проаналізувати вік-залежні фактори.

Одним з методів для аналізу даних часових рядів RR-інтервалів є використання фрактальної розмірності (FD). FD methods (e.g., **Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Higuchi’s FD, Box-Counting FD**) allow for a **scale-invariant** and **system-wide** assessment of heart rhythm complexity. В даній роботі використовувалася фрактальна розмірність Хігучі. Fractal Dimension (FD) quantifies the complexity and self-similarity of a signal. It provides a measure of how a pattern changes across different scales, making it useful for analyzing physiological signals, such as RR-interval time series in heart rate variability (HRV). Biological signals, including heart rate dynamics, exhibit fractal properties due to the interplay of multiple regulatory mechanisms (e.g., autonomic nervous system, baroreflex). FD can capture the **loss of complexity** in aging and disease, which traditional linear methods may miss.  Healthy heart rate dynamics exhibit a fractal-like structure, meaning they are neither completely random nor entirely regular. With aging and certain diseases (e.g., cardiovascular disorders, diabetes), HRV tends to become more **regular (lower FD) or erratic (higher FD)**, reflecting a loss of adaptability. FD serves as a biomarker for biological aging, distinguishing **younger individuals (higher complexity) from older individuals (lower complexity).** It can be used in **predictive models** to estimate biological age based on HRV patterns.

* Метою даного дослідження є розробка алгоритму оцінювання біологічного віку людини на основі фрактальної розмірності за даними часового ряду RR-інтервалів ЕКГ. Увага буде приділена сучасним інформаційним технологіям, які дозволяють обробляти великі масиви даних, автоматизувати процеси аналізу.

1. **Related Work**

**Известно, что ряды RR-интервалов имеют фрактальную структуру, поэтому их можно исследовать с помощью мультифрактальных методов. [2].**

**В работе [3] приведена классификация 7 аритмий from ECG Using Fractal Dimensions. В роботі [4] наведена класифікація аритмій Using Fractal Dimensions and Neural Networks. В роботі [5] Artificial intelligence-estimated biological heart age using a**

**12-lead electrocardiogram predicts mortality and cardiovascular outcomes. Biological age, measured by ECG (defined as ECG-age), looks at the relative health of a patient’s cardiovascular system rather than a patient’s chronological age [5].**

* **Biological Age Models:** Overview of existing biological age assessment techniques (e.g., HRV-based, metabolic models).

**1. Heart Rate Variability (HRV)-Based Models**

HRV measures fluctuations in time intervals between heartbeats and is influenced by autonomic nervous system activity. It is commonly used as a biomarker of aging and health status.

**Key Features:**

**High HRV** is associated with better cardiovascular health and younger biological age.

**Low HRV** suggests increased sympathetic activity and accelerated aging.

**Measurement Tools:** Electrocardiograms (ECG), wearable sensors (e.g., smartwatches, chest straps).

**Examples of HRV-Based Age Models:**

**Autonomic Nervous System Age (ANSA):** Estimates biological age based on HRV metrics like SDNN (standard deviation of NN intervals) and RMSSD (root mean square of successive differences).

**AI-Powered HRV Models:** Machine learning models trained on HRV data can estimate biological age with high accuracy.

* **Fractal Analysis in Medicine:** Previous research on fractal dimension applied to physiological signals.
* **Fractal Properties of RR Intervals:** Prior studies on fractal complexity of heart rate variability (HRV) and aging.

**3. Methodology**

* **Data Acquisition:**
  + Describe the dataset (e.g., ECG signals, sample size, participant demographics).
  + Preprocessing steps (artifact removal, filtering, normalization).
* **RR-Interval Extraction:**
  + Explain how RR-intervals are derived from ECG signals.
* **Fractal Dimension Calculation:**
  + Methods used (e.g., **DFA (Detrended Fluctuation Analysis), Higuchi’s FD, Katz’s FD, Box-Counting Method**).
* **Feature Selection:**
  + Discuss key fractal parameters that may correlate with biological age.
* **Machine Learning Model (if applicable):**
  + Explain how fractal features are mapped to biological age.
  + Algorithms used (e.g., regression models, neural networks).

**4. Results**

* **Fractal Dimension vs. Age:**
  + Present findings on how FD changes with age.
* **Statistical Analysis:**
  + Correlation coefficients, significance tests (e.g., Pearson/Spearman correlation).
* **Performance Evaluation:**
  + If ML models are used, report RMSE, R², MAE, or classification accuracy.
* **Comparison with Other Methods:**
  + Compare FD-based age estimation with conventional methods.

**5. Discussion**

* **Interpretation of Results:**
  + Explain the physiological implications of fractal dimension changes with aging.
* **Limitations:**
  + Small sample size, noise in RR intervals, individual variability.
* **Future Directions:**
  + Improvements in feature extraction, deep learning applications, larger datasets.

**6. Conclusion**

* Summary of key findings.
* Practical implications for health monitoring and aging research.
* Potential applications in wearable health devices.

**7. References**

* Cite relevant research papers, books, and resources used in the study.

1. Klemera, P. and Doubal, S. (2006) ‘A new approach to the concept and computation of biological age’, *Mechanisms of Ageing and Development*, 127(3), pp. 240–248. doi:10.1016/j.mad.2005.10.004.
2. Кириченко Л., Радивилова Т. ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ. *International Journal "Information Content and Processing"*. 2018. Т. 5, вип. 2. С. 142–199.
3. Kiani, K. and Maghsoudi, F. (2019) ‘Classification of 7 arrhythmias from ECG using fractal dimensions’, *Journal of Bioinformatics and Systems Biology*, 02(03). doi:10.26502/jbsb.5107008.
4. Artificial intelligence-estimated biological heart age using a 12-lead electrocardiogram predicts mortality and cardiovascular outcomes / Y.-S. Baek та ін. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. URL: <https://10.3389/fcvm.2023.1137892>.
5. Spencer S. Heart disease risk associated with electrocardiogram-estimated age. *UMass Chan Medical School News*. *UMass Chan News*. 31.07.2023. URL: https://www.umassmed.edu/news/news-archives/2023/07/heart-disease-risk-associated-with-electrocardiogram-estimated-age/#:~:text=Biological%20age%2C%20measured%20by%20ECG,than%20a%20patient’s%20chronological%20age. (дата звернення: 06.02.2025).