

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

# МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР

по проблемам управления в технических системах  
имени А.А. Вавилова

28 мая 2025

## СБОРНИК ДОКЛАДОВ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

---

**Молодежная школа-семинар  
по проблемам управления в технических  
системах имени А. А. Вавилова**

**28 мая 2025**

Санкт-Петербург  
2025

УДК 681.5(08)

Библиографическое  
описание

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. Ежегод. журн. / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. 46 с. – Режим доступа к журн.: – <https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2025/sbornik.pdf> – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7629-3511-1

ISBN 978-5-7629-3511-1

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025

# Сравнение процессов биологической очистки сточных вод в моделях ASM1 и ASM2

А. В. Андреев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

a-sanya01@mail.ru

**Аннотация.** Исследуется моделирование биоочистки стоков с применением моделей ASM1 и ASM2. Приводятся причины в пользу выбора моделей, описывающих очистку от фосфора (ASM2 и ASM2d), после чего происходит сравнение моделей ASM1 и ASM2 относительно того, как они описывают состав стоков. Затем производится компьютерное моделирование и сравнение результатов моделирования данных двух моделей для показателей аммонийного азота, нитратного азота, биомассы автотрофов, щелочности, а также растворенного кислорода. В результате проведенного сравнительного анализа делается вывод в пользу дальнейшего исследования биологической очистки по моделям ASM2 и ASM2d.

**Ключевые слова:** модель ASM2; биомасса автотрофов; моделирование; фосфор; ферментация

## I. ВВЕДЕНИЕ

На предприятии «ИДАВАНГ Агро» присутствует необходимость очистки стоков. Внедренная на текущий момент система очистки, описанная в [1], является эффективной (параметры воды после очистки соответствуют предельно-допустимым концентрациям, или ПДК), но имеет недостаток в форме выделения в атмосферу здания аммиака. Данное явление негативно сказывается на элементах системы, периодически выводя их из строя, что приводит к остановке процесса очистки.

Биологическая очистка подобным образом не воздействует на элементы системы, потому было решено изучить возможность ее применения на предприятии. Изучение производилось путем математического моделирования при применении полученных с предприятия данных о концентрациях загрязняющих веществ в стоках за счет использования в качестве базы модели активного ила 1 (Activated Sludge Model No.1 или ASM1). В результате было выяснено, что при применении биологической очистки возможно добиваться удовлетворительного качества сбрасываемой с предприятия воды (концентрации загрязняющих веществ при сбросе не выходят за пределы ПДК) при использовании трехзонного реактора ДНД-типа с мембранным блоком. После было установлено, что в случае изменения входных концентраций стоков (т. е. действия т. н. возмущений) в систему необходимо вводить регулирование для сохранения концентраций в пределах ПДК в сбрасываемой воде. В результате осуществления регулирования удалось обеспечить концентрации в пределах ПДК на выходе системы для различного состава стоков, а не только состава по данным, изначально предоставленным предприятием (которые отражают состав стоков в один конкретный

момент времени). Подробнее результаты данных исследований описаны в [2] и [3].

К сожалению, модель ASM1 при моделировании процесса активного ила не учитывает такой вид загрязнений, как фосфор. Важно отметить, что на предприятии такой вид загрязнения не только присутствует, но и при сбросе очищенной воды его концентрация не превышает ПДК. Следовательно, предлагаемая система биологической очистки должна также рассматривать и очистку от фосфорных загрязнений, которые в свою очередь уже учитываются в более свершенных моделях ASM2 и ASM2d. Необходимо подчеркнуть, что модель ASM2d является более сложной, чем модель ASM2, но одновременно с этим она также является самым адекватным вариантом с точки зрения моделирования процессов. Потому с целью перехода в дальнейших исследованиях к использованию в качестве базы модели ASM2d возникает задача изучения поведения процессов сначала модели ASM2, что можно сделать путем сравнения процессов в моделях ASM1 и ASM2 при использовании одинаковых данных с предприятия о подаваемых на очистку стоках.

## II. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ И ДАННЫЕ

Как уже было отмечено, в качестве объекта исследования будут рассматриваться модели ASM1 и ASM2, которые описаны в [4, с. 1–38] и [4, с. 39–74], соответственно. В результате перевода данных моделей из матричных нотаций в форму нелинейных дифференциальных уравнений (НДУ) модель ASM1 состоит из 11 НДУ, а ASM2 – из 15 НДУ. Сами НДУ описывают изменение компонент состава стоков. Важно отметить, что определенные компоненты входят в обе модели, среди них:

- $S_{nh}$  – концентрация аммонийного азота,
- $S_{no}$  – концентрация нитратного азота,
- $S_o$  – концентрация растворенного кислорода,
- $S_s$  – концентрация растворенного биологически разложимого органического вещества (РБРОВ),
- $S_{alk}$  – щелочность,
- $X_{ba}$  или  $X_{aut}$  – концентрация биомассы автотрофов (бактерий-нитрификаторов),
- $X_{bh}$  или  $X_h$  – концентрация биомассы гетеротрофов,
- $X_s$  – концентрация взвешенного медленно разложимого органического вещества (ВМРОВ).

Компонентами, входящими только в состав первой модели, являются:

- $S_{nd}$  – концентрация растворенного органического азота,

$X_{nd}$  – концентрация взвешенного медленно разложимого органического азота,

$X_p$  – концентрация твердых продуктов распада биомассы.

Компонентами, входящими только в состав второй модели, являются:

$S_{po}$  – концентрация неорганического растворенного фосфора (в частности орто-фосфатов),

$S_a$  – концентрация продуктов ферментации, или ацетата,

$S_f$  – концентрация растворенного биологически разложимого ферментируемого вещества (РБРФВ),

$X_{MeOH}$  – концентрация металл-гидроксидов,

$X_{MeP}$  – концентрация металл-фосфатов,

$X_{PAO}$  – концентрация фосфат-аккумулирующих организмов (фосфор-аккумулирующих бактерий),

$X_{PHA}$  – концентрация полигидроксиалканоев (продукт внутреннего хранения клетки фосфат-аккумулирующих организмов),

$X_{PP}$  – концентрация поли-фосфатов,

$X_{TSS}$  – концентрация общего количества взвешенных частиц,

$X_i$  – концентрация взвешенного инертного органического вещества.

Очевидно, что в модель ASM2 кроме концентраций, рассматриваемых в модели ASM1 ( $S_{nh}$ ,  $S_{no}$ ,  $S_o$ ,  $S_{alk}$ ,  $X_{ba}$  или  $X_{aut}$ ,  $X_{bh}$  или  $X_h$ ,  $X_s$ ), добавляются концентрации связанные со связанными с фосфором процессами ( $S_{po}$ ,  $S_a$ ,  $S_f$ ,  $X_{MeOH}$ ,  $X_{MeP}$ ,  $X_{PAO}$ ,  $X_{PHA}$ ,  $X_{PP}$ ,  $X_{TSS}$ ). Кроме того, в модели ASM2 не рассматривается следующая концентрация из модели ASM1 –  $X_p$ , а концентрация  $S_s$  в модели ASM2 не имеет отдельного НДУ. Так, продукты распада биомассы  $X_p$  из модели ASM1 в контексте модели ASM2 рассматриваются как взвешенное инертное вещество  $X_i$ , поскольку при очистке от фосфора учитывается, что биомасса не распадается, а флокулируется на активный ил. В случае же компоненты РБРОВ  $S_s$  она присутствует в самой модели ASM2, но представляет из себя сумму компонент  $S_a$  (концентрация продуктов ферментации) и  $S_f$  (РБРФВ), а не как единое целое в модели ASM1. Поскольку согласно авторам модели ASM2 она требует дальнейшей доработки в области процессов ферментации и анаэробного гидролиза (что и является причиной существования более свершенной, но вместе с тем сложной, модели ASM2d), то в рассматриваемые 15 НДУ модели ASM2 не включены параметры биомассы гетеротрофов  $X_h$ , участвующих в анаэробном гидролизе, и РБРФВ  $S_f$ , участвующих в процессах ферментации. Как следствие, в данном исследовании не производится сравнение концентрации  $S_s$  из модели ASM1 с ее составляющей  $S_a$  в модели ASM2, поскольку она будет отражать лишь часть компоненты. В то же время, поскольку биомасса гетеротрофов влияет на рост концентрации ВМРОВ  $X_s$ , которая в модели ASM2 описывается, то по ее росту (или отсутствию роста) данной концентрации можно оценить растет ли в модели ASM2 биомасса гетеротрофов.

Система моделировалась с предположением, что она оперирует при постоянной температуре, составляющей

20 °С. Потому различные константы, коэффициенты, максимальные удельные скорости и их факторы для ASM1 и ASM2 были заимствованы из [4]. Однако для модели ASM1 была произведена корректировка пяти коэффициентов согласно [5] для обеспечения корректного установившегося режима у концентрации биомассы гетеротрофов на диапазоне различных значений скорости подачи стоков  $Q^{bx}$ . Разница до и после корректировки отражена ниже на рис. 1.

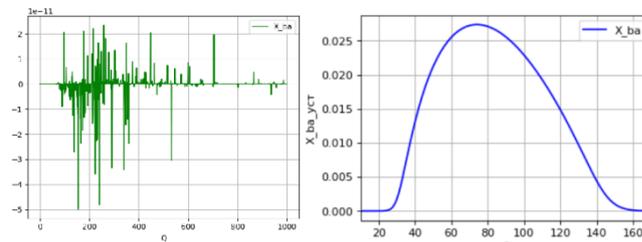


Рис. 1. Значения  $X_{ba}^{уст}$  на диапазоне различных  $Q^{bx}$  до и после корректировки коэффициентов модели ASM1

Для исследования использовались данные с предприятия, отраженные в [2, с. 16-17], которые использовались в обоих моделях. В то же время, для модели ASM2 данные были дополнены касаясь состава веществ, участвующих в реакции с фосфором:

$S_a^{bx} = 20 \text{ г/м}^3$  – входное значение растворенного биологически разложимого ферментирующего вещества (РБРФВ, применяется только в ASM2),

$S_{po}^{bx} = 3.5 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация неорганического растворенного фосфора (применяется только в ASM2).

Все остальные параметры на входе были приняты нулевыми. Из [6] также были взяты данные касаясь ПДК для трех контролируемых параметров:

$$S_{nh}^{пдк} = 2 \text{ г/м}^3, S_{no}^{пдк} = 10 \text{ г/м}^3, S_{po}^{пдк} = 3.5 \text{ г/м}^3,$$

причем на самом производстве концентрация неорганического растворенного фосфора уже находится в пределах ПДК, пусть и на самой границе. Ввиду нахождения данной концентрации на границе ее лучше в процессе очистки снизить еще дальше, поскольку измерительные приборы имеют определенную погрешность, т. е. фактически концентрация фосфора в измеренной пробе может быть выше ПДК.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Определившись с математическими моделями и их параметрами были сконструированы уже компьютерные модели в среде MATLAB и промоделированы процессы в моделях ASM1 и ASM2 при начальных условиях т.н. «сухой загрузки», т.е. когда в рассматриваемом реакторе для очистки в начальный момент времени отсутствуют стоки и находятся лишь организмы ила. Моделирование производилось при условии повышении концентрации растворенного кислорода в подаваемых стоках (т.е. добавлении кислорода поверх уже содержащегося в стоках) и при условии, что скорость подачи стоков постоянна и составляет  $Q^{bx} = 450 \text{ м}^3/\text{сут}$  (согласно исследованиям, описанным в [7], данная скорость подачи обеспечивает одновременный рост биомассы автотрофов и гетеротрофов). На рис. 2–3 представлены результаты моделирования для концентраций азота, биомассы

автотрофов, а также щёлочности (сверху – результаты модели ASM1, снизу – ASM2).

Как можно наблюдать на данных двух рисунках, повышение концентрации растворенного кислорода на входе  $S_o^{bx}$  реактора оказывает влияние на очистку стоков в обоих моделях, однако в модели ASM2 оно проявляется сильнее. Так, в модели ASM1 при  $S_o^{bx} = 20 \text{ г/м}^3$  концентрация аммонийного азота  $S_{nh}^{уст} \approx 34 \text{ г/м}^3$ . В то же время в модели ASM2 уже при  $S_o^{bx} = 16 \text{ г/м}^3$  аммонийный азот находится ниже значения  $30 \text{ г/м}^3$  и составляет  $S_{nh}^{уст} \approx 26 \text{ г/м}^3$ . Данное явление разумеется отражается и на биомассе автотрофов, которая в модели ASM2 с повышением кислорода устанавливается на более высоких значениях. Так, уже при  $S_o^{bx} = 8 \text{ г/м}^3$  биомасса автотрофов находится около значения  $0.25 \text{ г/м}^3$ , в то время как согласно модели ASM1 для достижения существования или роста биомассы автотрофов необходимо кол-во кислорода в  $S_o^{bx} = 12 \text{ г/м}^3$ . Однако, также ASM2 уступает предыдущей модели в качестве очистки нитратного азота, которая в модели ASM2 уже при  $S_o^{bx} = 8 \text{ г/м}^3$  составляет  $S_{no}^{уст} \approx 21 \text{ г/м}^3$ , в то время как в модели ASM1 даже при  $S_o^{bx} = 20 \text{ г/м}^3$  она не достигает и  $15 \text{ г/м}^3$ .

Наконец, в ASM2 щёлочность устанавливается на том же значении, которое было задано начальным – **6.5 рН**, а в модели ASM1 она повышается в рамках нейтрального диапазона.

Разумеется, ни одна из моделей не доставляет удовлетворительной очистки – аммонийный и нитратный азоты остаются в границах выше ПДК. В первую очередь это вызвано тем, что на текущей стадии моделирования обе модели рассматривают реактор односторонним и не учитывают мембранную фильтрацию перед сбросом стоков. Вместе с тем, использование ASM1 модели в качестве базы для моделирования трехзонного ДНД-реактора с мембранным блоком позволяет достигать удовлетворительной очистки по обоим видам азота, что отражено в [2] и [3].

Также, повышение кислорода не оказывает влияния на очистку от неорганического фосфора в установившемся режиме. На рис.4 отражено, что повышение концентрации кислорода приводит лишь к замедлению процесса, в то время как сама концентрация фосфора всегда устанавливается на входном значении  $S_{po}^{bx} = 3.5 \text{ г/м}^3$ .

Разное влияние кислорода в моделях ASM1 и ASM2 требует также обратить внимание на переходные процессы соответствующих концентраций, что отображено на рис.5 (слева – для модели ASM1, справа – для ASM2).

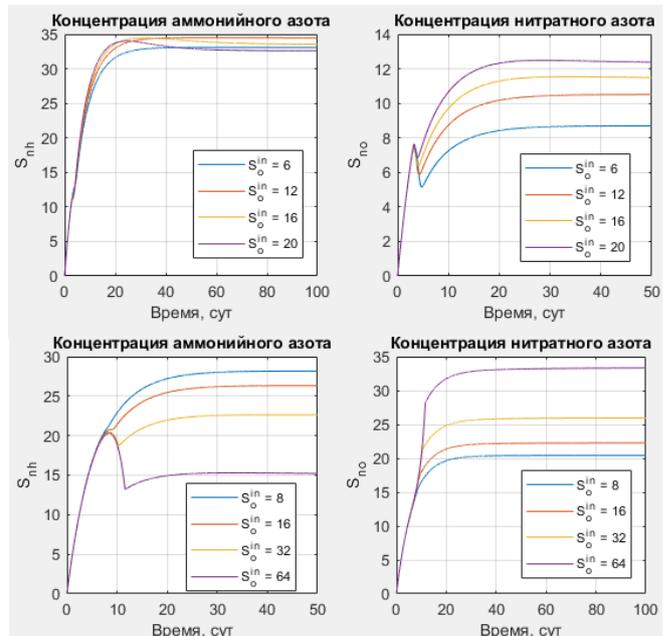


Рис. 2. Сравнение концентраций азотов в моделях ASM1 и ASM2

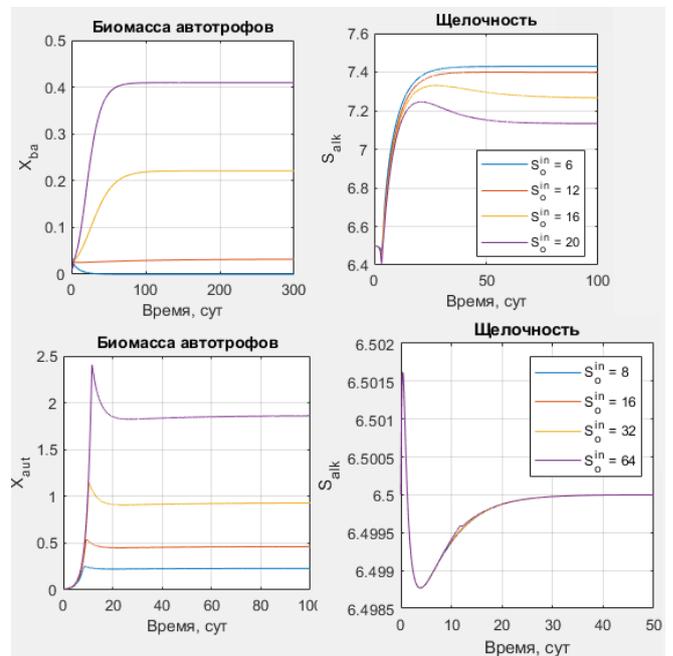


Рис. 3. Сравнение биомассы автотрофов и щёлочности в моделях ASM1 и ASM2

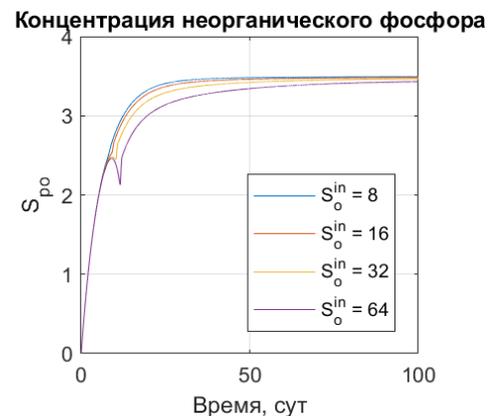


Рис. 4. Концентрация  $S_{po}$  в зависимости от  $S_o^{bx}$  при  $Q^{bx} = 450 \text{ м}^3/\text{сут}$

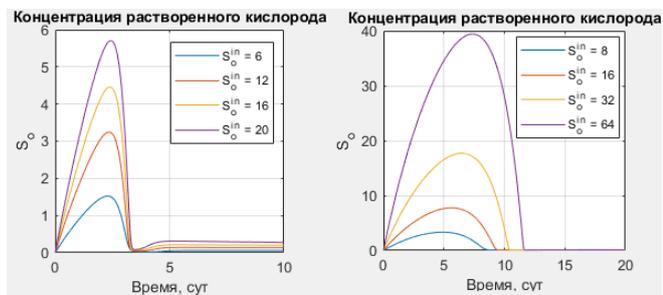


Рис. 5. Сравнение концентрации растворенного кислорода в моделях ASM1 и ASM2

Как можно наблюдать на приведенном рисунке, в случае модели ASM2 у кислорода вне зависимости от выбранного значения наблюдается более долгий переходный процесс. Кроме того, установившиеся значения кислорода на выходе системы значительно ниже в сравнении с моделью ASM1, что в дальнейшем при изменении параметров может означать проблемы с поддержанием биомассы автотрофов, поскольку для них отсутствие достаточного кислорода означает гибель, согласно [2].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнительного анализа моделей ASM1 и ASM2 по одним и тем же компонентам было выяснено, что модель ASM2 при меньших значениях растворенного кислорода позволяет достигать лучшего результата очистки от аммонийного азота путем достижения более высокой биомассы автотрофов. Одновременно же более высокое содержание автотрофов может приводить и к повышению концентрации нитратного азота. Наконец было установлено, что повышение концентрации кислорода не влияет на качество очистки от неорганического фосфора, только лишь на скорость достижения фосфора на выходе системы входной концентрации.

Вместе с тем, поскольку требуется учитывать очистку от фосфора и поскольку она позволяет достигать даже в однозонном реакторе результата очистки от

аммонийного азота лучше, чем по модели ASM1, то в дальнейшем планируется сделать более тщательное исследование модели ASM2 для понимания взаимодействия процессов и улучшения результатов моделирования перед переходом к применению модели ASM2d для более адекватного моделирования процессов очистки от одновременно и азота, и от фосфора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.]. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. С. 8-11. Режим доступа к журн. – [https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik\\_2021.pdf](https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbornik_2021.pdf) (дата обращения 30.04.2025)
- [2] Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е. Исследование биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» по компьютерным моделям // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 27 сентября-01 октября 2022 года. Нижний Архыз, 2022. С. 16-21. doi:10.18522/syssyn-2022-2
- [3] Андреев А.В., Грудяева Е.С., Душин С.Е. Исследование управления процессами биологической очистки на предприятии «ИДАВАНГ Агро» // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XII Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 23-29 сентября 2024 года. Нижний Архыз, 2024. С. 18-25. doi: 10.18522/syssyn-2024-2
- [4] Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing, 2000. 121 p. doi:10.2166/9781780402369
- [5] Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 231 с.
- [6] ГОСТ 16887-71. Разделение жидких неоднородных систем методами фильтрования и центрифугирования. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986.
- [7] Андреев А.В. Исследование биологической очистки на предприятии ИДАВАНГ Агро по моделям нитрификации, денитрификации и ASM1 // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.]. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. С. 11-14. Режим доступа к журн. [https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2022/sbornik\\_2022\\_merged.pdf](https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2022/sbornik_2022_merged.pdf) (дата обращения 30.04.2025)



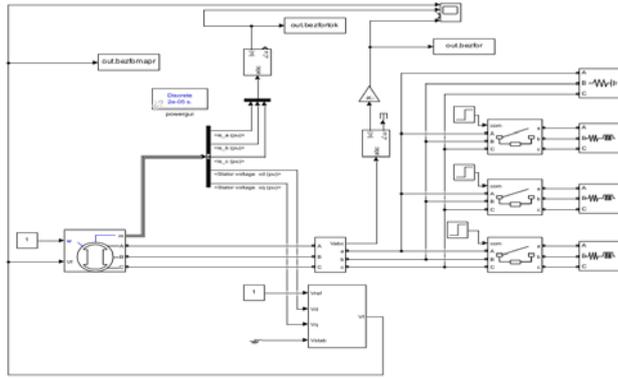


Рис. 2. Имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора без внешней форсировки

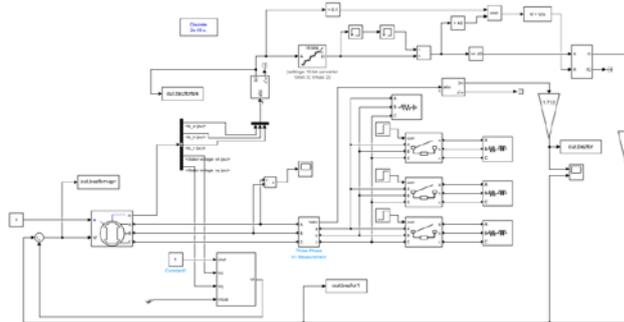


Рис. 3. Имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировки

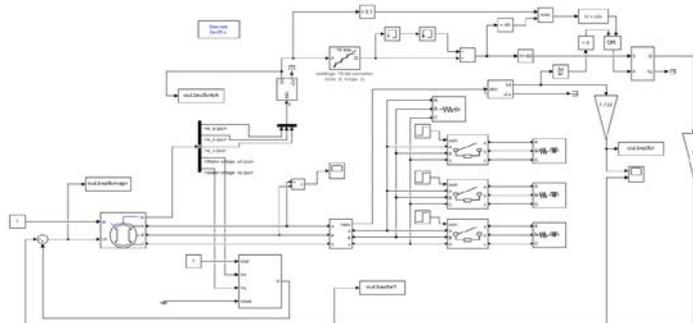


Рис. 4. Имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировки и контролем приращения напряжения

На рис. 5 приведены графические результаты зависимости напряжения возбуждения от подключения нагрузки 100% ( $P=61.2$  кВт,  $Q=45.9$  кВар,  $S= 85$  кВА) от мощности синхронного генератора.

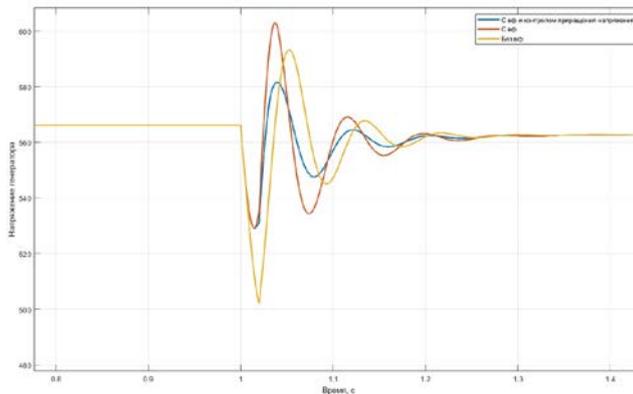


Рис. 5. Графические результаты зависимости напряжения возбуждения от подключения нагрузки 100% ( $P=61.2$  кВт,  $Q=45.9$  кВар,  $S= 85$  кВА) от мощности синхронного генератора

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе моделирования системы возбуждения без использования внешней форсировки было зафиксировано переходное отклонение напряжения на уровне  $-10,8\%$  при подключении нагрузки, эквивалентной  $100\%$  от номинальной. Установившееся отклонение напряжения при постоянной нагрузке составило  $8,06\%$ , что превышает допустимые значения, регламентированные стандартом ГОСТ 33115–2014.

На временной диаграмме отчётливо наблюдается резкий провал напряжения в момент подключения нагрузки. Введение внешней форсировки позволило частично устранить данный эффект: переходное отклонение снизилось до  $-6,6\%$ , а установившееся – до  $6,4\%$ . Однако при этом возникло выраженное перерегулирование, указывающее на то, что форсировка не отключается своевременно. Это снижает общую устойчивость системы и может привести к длительным колебаниям напряжения.

Для устранения данной проблемы в модель была добавлена функция контроля приращения напряжения (КПРН), обеспечивающая корректное и оперативное завершение форсирующего воздействия. Совмещённая схема с внешней форсировкой и КПРН показала улучшенные характеристики: переходное отклонение составило  $-4,8\%$ , а установившееся напряжение при неизменной нагрузке отклонялось лишь на  $3,7\%$ , что соответствует требованиям нормативных документов и свидетельствует о повышении качества регулирования.

В таблице приведены результаты моделирования всех трех систем.

ТАБЛИЦА I.

Модель	Установившееся отклонение напряжения при неизменной нагрузке, %	Установившееся отклонение напряжения при изменении нагрузки, %	Переходное отклонение напряжения, %	Время восстановления напряжения, сек.
Без ФВ	8.06	0.57	-10.8	0.52
С ВФ	6.4	0.57	-6.6	0.43
С ВФ и КПРН	3.7	0.57	-4.8	0.3
Допустимое отклонение	$\pm 5$	$\pm 2.5$	$\pm 10$	-

На основании приведенных выше моделей, а так же разработанной имитационной модели САРВ судового СГ с внешней форсировкой, математическая модель, описывающая САРВ судового СГ с ВФ можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} U_d = R_s * i_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \omega_r * \Phi_q; \\ U_q = R_s * i_q + \frac{d\Phi_q}{dt} - \omega_r * \Phi_d \\ U'_{fd} = R'_{fd} * i'_{fd} + \frac{d\Phi'_{fd}}{dt} + K_f \\ U'_{kd} = R'_{kd} * i'_{kd} + \frac{d\Phi'_{kd}}{dt} \\ U'_{kq1} = R'_{kq1} * i'_{kq1} + \frac{d\Phi'_{kq1}}{dt} \\ U'_{kq2} = R'_{kq2} * i'_{kq2} + \frac{d\Phi'_{kq2}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель САРВ с внешней форсировкой показала значительное улучшение динамических характеристик по сравнению с классической системой. Внешняя форсировка позволяет значительно уменьшить переходные отклонения и сократить время восстановления напряжения, что важно для надёжности электроснабжения судовых систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. [Джv-15.5М]. Ленинград - Москва: Государственное энергетическое издательство (Госэнергоиздат), 1950.
- [2] Сугаков В.Г., Тошев А.А., Зобов Л.В. Математическая и имитационная модель системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта 2019, № 58, С. 174-180.
- [3] Иванов И.И., Петров П.П. Исследование САРВ синхронных генераторов // Электротехника: теория и практика. 2023. № 4. С. 45–52.
- [4] Смирнов А.В. Автоматическое регулирование возбуждения генераторов. СПб.: Наука, 2019.
- [5] Касимовский Н.И. Разработка оксидного катализатора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1988. 16 с.
- [6] ГОСТ Р 51317-99. Качество электроэнергии. Общие нормы.

# Методика прогнозирования временных рядов с регулярным переобучением модели ARIMAX

М. А. Гореликов

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
gorelikov.matvey@mail.ru

В. А. Востров

Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН;  
АО «НПФ «Сургутнефтегаз»  
valeriy-v-mail@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлена практическая методика прогнозирования финансовых временных рядов на основе модели ARIMAX с учётом лагированных экзогенных параметров. Разработанный подход ориентирован на повышение точности и увеличение горизонта прогноза. Методика включает отбор экзогенных переменных с использованием корреляционного анализа и теста причинности Грейнджера, автоматическую настройку параметров базовой модели ARIMA, а также реализацию механизма регулярного переобучения. Программная реализация осуществлена на языке Python с использованием специализированных библиотек для обработки и моделирования временных рядов. Тестирование методики проведено на исторических данных по ценам акций крупных компаний за период 2021–2024 гг. Полученные результаты подтверждают эффективность модели ARIMAX при корректном выборе экзогенных факторов и соответствующих лагов, для прогнозирования биржевых цен. Результаты тестирования методики прогноза с периодическим переобучением модели ARIMAX демонстрируют применимость предложенного подхода к задаче прогнозирования биржевой цены акций.

**Ключевые слова:** временные ряды; прогноз; экзогенные переменные; лаг

## I. ВВЕДЕНИЕ

Очевидную практическую значимость представляет анализ исторических временных рядов экономических данных, а также задача прогнозирования экономических показателей. Прогнозы экономических данных позволяют оптимизировать прибыль компаний и минимизировать экономические риски. В данной работе разматривается задача прогноза биржевых цен акций компаний. Наиболее значимыми характеристиками временных рядов биржевых цен акций являются автокорреляция, тренды и выбросы. Экономические циклы влияют на цену акций умеренно, а сезонные колебания наименее выражены и в основном ограничены календарными аномалиями и внутридневными паттернами ликвидности [1, 2]. Изменения стоимости акций во многом связаны с внешними факторами – например, изменениями процентных ставок, валютных курсов, отраслевых индексов или макроэкономических показателей. Учет таких факторов позволяет повысить точность прогнозов, особенно в условиях, когда рынки быстро реагируют на поступающую информацию. При прогнозировании финансовых временных рядов желаемым результатом является максимально точный прогноз на максимально длинном горизонте, но как правило при увеличении горизонта прогноза его точность снижается.

В настоящее время для прогнозирования финансовых временных рядов используются как классические статистические модели, так и методы машинного обучения и глубокого обучения. Статистические модели обладают рядом преимуществ: они строго математически обоснованы, устойчивы при небольшом объеме данных и не требуют значительных вычислительных ресурсов. Эти качества особенно важны в тех случаях, когда необходимо регулярно обновлять прогнозы. Стоит отметить, что статистические модели, демонстрируют падение точности при увеличении горизонта прогноза. Использование методов машинного обучения, включая нейронные сети, частично решает эту проблему, но требует значительных вычислительных ресурсов и больших объемов данных [2, 3].

Одним из подходов, сочетающих простоту и возможность учитывать влияние внешних факторов, является использование модели ARIMAX [4, 5]. Модель ARIMAX является расширением модели ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) [5–9], позволяющим учитывать влияние внешних факторов с временными задержками (лагами). ARIMAX позволяет моделировать запаздывающее воздействие внешних факторов на цену актива и тем самым увеличивать горизонт прогноза.

Настоящая работа посвящена разработке и тестированию практической методики прогнозирования биржевых цен акций, которая включает в себя: исследовательский анализ данных для определения набора экзогенных переменных, модель ARIMAX и методику многошагового прогноза с регулярным переобучением модели.

## II. МОДЕЛЬ ARIMAX С ЛАГИРОВАННЫМИ ЭКЗОГЕННЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

Модель ARIMAX (AutoRegressive Integrated Moving Average with exogenous variables) – это расширение модели ARIMA, которое включает в себя внешние (экзогенные) переменные для улучшения качества прогноза [4, 5]. Модель ARIMA [5–9] позволяет работать как со стационарными, так и с нестационарными временными рядами, но только с такими, которые можно преобразовать в стационарный ряд. Экзогенные переменные в модели ARIMAX представляют собой внешние факторы (например, экономические показатели или индексы), которые влияют на прогнозируемую целевую переменную, но сами не зависят от её значений или зависят слабо. Экзогенные переменные должны быть релевантными, т. е. между целевой функцией и экзогенными переменными модели должны

присутствовать смысловая зависимость и статистическая значимость. В реальных задачах прогноза финансовых временных рядов будущие значения внешних параметров, как правило неизвестны. При этом, типичной является ситуация запаздывающего влияния внешних факторов на целевую переменную. Эффект запаздывающего влияния экзогенных переменных характеризуется их временным лагом.

Модель ARIMAX(p, d, q) для временного ряда  $\{y_t\}$ , учитывающая лаговые значения экзогенных параметров  $(x_{1,t-l_1}, \dots, x_{m,t-l_m})$  имеет вид:

$$\Delta^d y_t = \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d y_{t-i} + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + c + \sum_{k=1}^m \beta_k x_{k,t-l_k},$$

где:

$\Delta^d y_t$  –  $d$ -кратная разность ряда  $y_t$ , параметр  $d$  равен порядку разностного преобразования нестационарного исходного временного ряда, в результате которого получается стационарный ряд;

$\phi_1, \dots, \phi_p$  – коэффициенты авторегрессии (AR),  $p$  – порядок авторегрессии, который определяет количество предыдущих значений временного ряда, используемых для прогнозирования текущего значения;

$\theta_1, \dots, \theta_q$  – коэффициенты скользящего среднего (MA),  $q$  – порядок скользящего среднего, т.е. количество предыдущих значений ошибки, используемых в модели;

$\varepsilon_t$  – белый шум ( $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ ) – нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ ;

$c$  – постоянная, которая отражает детерминированный тренд ряда;

$\beta_1, \dots, \beta_m$  – коэффициенты экзогенных параметров,  $l_1, \dots, l_m$  – лаги экзогенных параметров.

В данной работе рассматривается вариант модели ARIMAX, в котором каждый экзогенный параметр представлен только одним лаговым значением. Если значения экзогенных параметров известны только до времени  $t-1$ , то максимальный горизонт прогноза  $h$  модели ARIMAX равен минимальному лагу, т.е.  $h = \min\{l_1, \dots, l_m\}$ .

### III. МЕТОДИКА ПРОГНОЗА

В работе предложена методика для серии последовательных краткосрочных прогнозов с использованием модели ARIMAX с лагами экзогенных параметров. При этом полный горизонт прогнозирования всей серии может существенно превышать горизонт краткосрочных прогнозов. Основной особенностью методики является регулярное переобучение модели, позволяющее адаптировать прогноз с учетом обновляющихся данных о значениях экзогенных переменных и целевой функции.

Для реализации описанной методики прогнозирования разработано программное обеспечение на языке программирования Python версии 3.11. Выбор Python обусловлен его универсальностью в области статистического моделирования, анализа данных и, а также возможностью эффективной интеграции с внешними источниками информации и доступностью

инструментов визуализации. Среда разработки представлена системой Jupyter Notebook версии 7.1.2, входящей в состав дистрибутива Anaconda версии 24.1.2.

Методика прогнозирования содержит следующие этапы.

#### A. Сбор данных и анализ предметной области

На первом этапе проводится исследовательский анализ данных (EDA) с целью поиска и отбора наиболее значимых экзогенных параметров. Например, это могут быть экономические, финансовые и отраслевые факторы, потенциально влияющие на цену акции. На этом же этапе проводится проверка качества собранных данных. Обнаруженные пропуски заполняются методами линейной интерполяции и прямым переносом предыдущих или последующих значений. Осуществляется проверка стационарности временных рядов с помощью теста Дики–Фуллера [7]. При выявлении нестационарности применяется разностное преобразование данных. Для оценки нормальности распределения исходных данных используется тест Шапиро–Уилка [6]; при необходимости применяется логарифмическое преобразование для нормализации данных.

#### B. Отбор и обработка экзогенных переменных для модели ARIMAX

Этап отбора экзогенных переменных начинается с корреляционного анализа, целью которого является выявление связи между потенциальными экзогенными показателями и целевой переменной (ценой акции). Далее проводится тест Грейнджера [10] для количественной оценки степени влияния экзогенных переменных на целевую переменную и определения соответствующих временных лагов. При выборе параметров нужно избегать включения в модель сразу нескольких внешних переменных с высокой корреляцией между собой, поскольку это может исказить оценки коэффициентов и тем самым, ухудшить точность прогноза.

На основании полученных результатов, принимается решение о включении конкретных внешних параметров в модель ARIMAX, при этом отдается приоритет параметрам с наиболее высокими значениями коэффициентов корреляции с целевой функцией и наибольшими значениями лагов. Горизонт краткосрочного прогноза устанавливается равным минимальному из лагов выбранных экзогенных переменных.

#### C. Подготовка и разделение исходного набора данных

Выбранные экзогенные переменные объединяются в один датасет с целевой функцией. Данные разделяются на обучающую и тестовую выборки, как правило в соотношении 80/20 или 75/25, что обеспечивает репрезентативный объем данных как для построения модели, так и для тестирования её прогнозной точности.

#### D. Построение модели ARIMAX

Параметры базовой модели ARIMA (p, d, q) оцениваются автоматически с помощью функции `auto_arima()` из библиотеки Python `pmdarima`. После этого в ARIMAX (p, d, q) включаются отобранные на предыдущем этапе экзогенные переменные, и модель обучается с использованием функции `fit()`.

### Е. Реализация прогнозирования с динамической адаптацией модели

Для обеспечения высокого качества прогноза методика предусматривает регулярное переобучение (оценку параметров  $p, d, q$ ) модели ARIMAX с периодичностью, равной горизонту краткосрочного прогноза. При каждом цикле переобучения модель заново перестраивается на актуализированных данных, после чего выполняется краткосрочный прогноз на следующий временной интервал. Такой подход позволяет повысить точность прогнозов цены акций за счет учёта актуальной рыночной ситуации и изменений внешних факторов.

### Ф. Оценка точности и визуализация результатов

Качество прогнозов оценивается по статистическим метрикам точности: средней абсолютной ошибке (MAE), среднеквадратичной ошибке (RMSE) и средней абсолютной процентной ошибке (MAPE) [4, 6]. Визуализация прогнозных и фактических значений цены акции осуществляется при помощи графиков динамики цены, которые могут быть дополнены техническими индикаторами.

### Г. Тестирование и применение методики на аналогичных наборах данных

Одним из основных этапов является тщательное тестирование метода на большом объеме исторических данных. Предложенная в работе методика многошагового прогноза с периодическим переобучением модели позволяет провести тестирование на большом временном интервале и дает возможность увидеть и проанализировать, как модель работает на временных интервалах с разным уровнем волатильности и зависимости от внешних факторов. Это в свою очередь позволяет сделать обоснованный вывод о правильности выбора экзогенных параметров, а также точности и надежности прогноза.

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Тестирование методики проводилось на исторических данных по цене акций компаний: ПАО «Сургутнефтегаз» (тикер: SNGS), ПАО «АЛРОСА» (ALRS), ПАО «МТС» (MTSS), ПАО «Сбербанк России» (SBER) за период с 1 января 2021 года по 31 декабря 2024 года. В качестве целевой переменной использовалась цена закрытия (Stock Close), полученная из CSV-файлов с биржевыми данными. Временной интервал тестовой выборки – 2024 год.

На рис. 1 представлены результаты тестирования методики многошагового прогноза с периодическим переобучением модели (раздел III), на примере цены акций ПАО «Сургутнефтегаз» за 2024 год. По результатам первичного анализа данных, в качестве экзогенных переменных модели ARIMAX были выбраны следующие показатели: значение индекса МосБиржи на момент закрытия торгов (IMOEX Close,  $k = 0.92, l = 7$ ), значение отраслевого индекса нефтегазового сектора MOEX Oil & Gas (MOEXOG Close,  $k = 0.82, l = 7$ ), официальный курс китайского юаня по отношению к российскому рублю (CNY Rate,  $k = 0.2, l = 10$ ), а также уровень потребительской инфляции в Российской Федерации, рассчитываемый в годовом выражении (Inflation,  $k = 0.26, l = 6$ ), здесь  $k$  – коэффициент корреляции с ценой акции,  $l$  – лаг. Горизонт

краткосрочного прогноза составил 6 дней. На рис. 1 показаны: динамика фактической и прогнозируемой цены акций, скользящее среднее (SMA) с окном 20 дней, верхняя и нижняя границы полос Боллинджера, соответствующие  $\pm 2\sigma$  от SMA; серым цветом выделена область волатильности, ограниченная диапазоном  $\pm 2\sigma$  от средней цены ( $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение).

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Компания	MAE	RMSE	MAPE	Экзогенные переменные и их лаги	Горизонт краткосрочного прогноза и шаг переобучения
ALRS	1.23	1.61	3.92%	Key Rate (10), USD Rate (10)	10 дней
MTSS	5.62	6.95	4.75%	RGBI Close (10), Oil Price (10)	10 дней
SBER	2.71	3.45	3.06%	VIX (7), CNY Rate (8)	7 дней
SNGS	0.56	0.71	2.35%	IMOEX Close (7), MOEXOG Close (7), CNY Rate (10), Inflation, (6)	6 дней

Если прогнозное значение попадает в указанный диапазон, это соответствует доверительному уровню 95%, при этом вероятность отклонения выше  $\pm 2\sigma$  составляет не более 5%. Прогнозная линия характеризуется высокой степенью соответствия реальной динамике цены и сохраняется в пределах  $\pm 2\sigma$  практически на всём тестовом интервале. Метрики прогнозной точности: MAE = 0.492, RMSE = 0.675, MAPE = 1.77%.

Для сравнения, на рис. 2 представлены аналогичные результаты прогноза на 2024 год моделью ARIMAX(1,1,1) с тем же самым набором экзогенных параметров и лагами, но без переобучения. Использование модели без переобучения продемонстрировало заметные отклонения прогноза от фактических значений, особенно в периоды высокой волатильности. Значения метрик прогнозной ошибки составили: MAE = 3.074, RMSE = 3.452, MAPE = 10.98%, что значительно хуже результатов многошагового прогноза с периодическим переобучением модели.

Результаты тестирования по всем рассмотренным компаниям сведены в таблицу. В таблице представлены значения метрик прогнозной ошибки (MAE, RMSE, MAPE), состав экзогенных переменных с указанием их лагов, а также шаг регулярного переобучения моделей.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты тестирования методики многошагового прогноза с периодическим переобучением модели ARIMAX демонстрируют применимость предложенного подхода к задаче прогнозирования биржевой цены акций. Обоснованный и корректный выбор значимых экзогенных параметров, а также применение регулярного переобучения модели обеспечивают её адаптацию к текущей экономической ситуации и позволяют повысить точность и надежность прогноза.

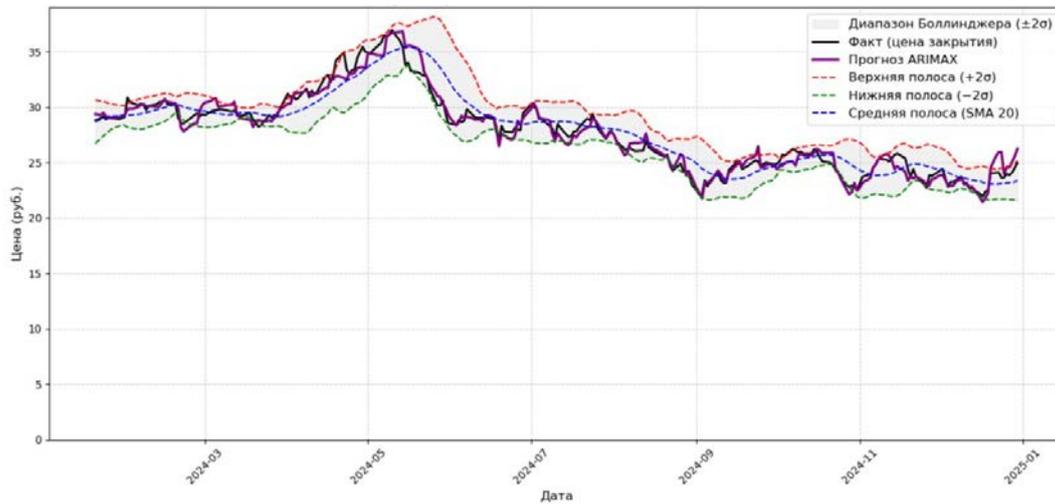


Рис. 1. Прогноз модели ARIMAX с лагированными переменными и регулярным переобучением, фактическая цена закрытия и полосы Боллинджера по акции SNGS, 2024 год

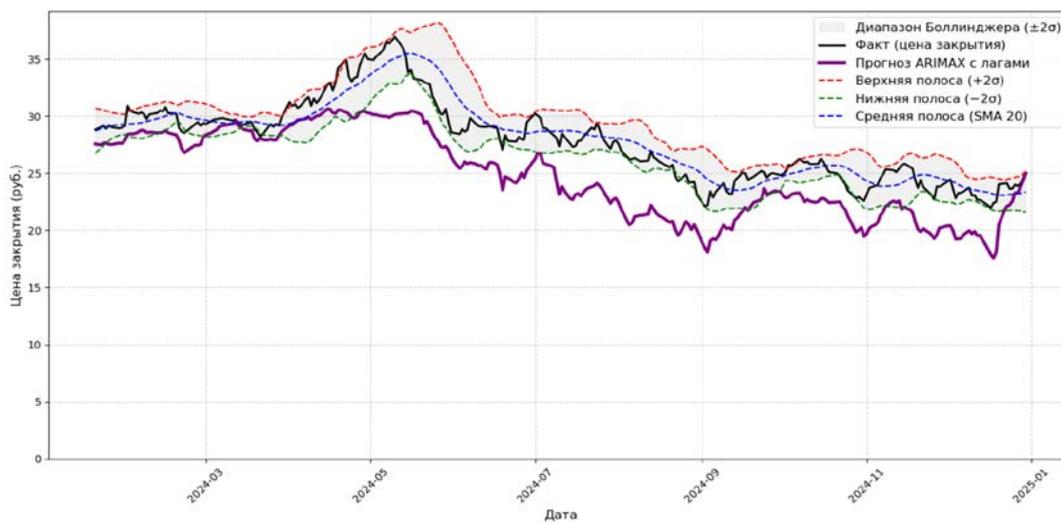


Рис. 2. Прогноз модели ARIMAX (1,1,1) с лагированными переменными (без переобучения), фактическая цена закрытия и полосы Боллинджера по акции SNGS, 2024 год

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Финансы и статистика, 2010. 320 с.
- [2] Нильсен Э. Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение / пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика», 2021. 544 с.
- [3] Брюс П., Брюс Э., Гедек П. Практическая статистика для специалистов Data Science / пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2021. 352 с.
- [4] Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne: OTexts, 2021. — Режим доступа: <https://otexts.com/fpp3/>, свободный.
- [5] Модели вида ARIMA [Электронный ресурс] // Yandex Education. — Режим доступа: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/modeli-vida-arima>, свободный.
- [6] Gujarati D.N. Basic Econometrics. 4th ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2004. 1002 p.
- [7] Davidson R., MacKinnon J.G. Econometric Theory and Methods. Oxford: Oxford University Press, 2004. 765 p.
- [8] ARIMA Model – Complete Guide to Time Series Forecasting in Python [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.machinelearningplus.com/time-series/arima-model-time-series-forecasting-python/>, свободный.
- [9] Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. 712 p.
- [10] Granger Causality Test in Python [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.machinelearningplus.com/time-series/granger-causality-test-in-python/>, свободный.

# Применение технологий машинного обучения для классификации музыки по эмоциям

М. К. Иванова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

m.k.ivanova314@gmail.com

**Аннотация.** В исследовании представлен обзор существующих подходов при решении задачи классификации музыки по эмоциям с использованием методов машинного обучения, а также проведён анализ эффективности различных подходов. Рассматривается связь данной задачи с теорией управления и предлагаются возможные варианты практического применения разработки.

**Ключевые слова:** машинное обучение; мел-спектрограмма; метрика; модель; классификация; нейросеть; эмпирирование; фильтр

## I. ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом расширяется спектр задач, решаемых с помощью методов машинного обучения. Оно проникло во все области деятельности человека. Работа с данными дает возможности построения прогнозов и классификаций, тонкой настройки моделей с помощью оптимизации параметров.

Данное исследование основывается на анализе аудиоданных, распределенных по эмоциональным кластерам: счастье, агрессия, подавленность, расслабленность.

Новизна заключается в использовании хромограммы – признака, достаточно редко используемого в подобных задачах, но способного выделить целый спектр числовых характеристик.

## II. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

При анализе звука используются различные характеристики, отражающие те или иные его свойства. Среди них можно выделить ключевые, используемые в данном исследовании: MFCC, Mel-спектрограмму и хромограмму.

### A. MFCC

MFCC (Mel-frequency Cepstral Coefficients) - Мел-частотные кепстральные коэффициенты [1]. Эта функция широко применяется в автоматическом распознавании речи. Она использует мел-шкалу, разработанную для имитации человеческого восприятия звука. В нижних частотах человек лучше улавливает звуковые колебания, поэтому в нижней полосе частот используется линейная шкала, в области же высоких частот (выше 1000 Гц) человеческое ухо теряет остроту восприятия, в связи с чем используется логарифмическая шкала. При обработке аудиосигнала происходит предварительное выделение высокочастотных компонент. Таким образом гарантируется сохранение всей необходимой информации для последующего анализа. Сигнал, который подается на вход функции разбивается на

сегменты длительностью 20-40 миллисекунд, после чего применяется оконная функция для сглаживания. С помощью БПФ (кратковременное преобразование Фурье) сигнал переводится в частотную область, где применяется Mel-фильтрбанк для извлечения энергии в разных частотных диапазонах. Полученные данные логарифмируются для учета восприятия интенсивности человеческим ухом, после чего проводится DCT (Дискретное косинусное преобразование) – декорреляция коэффициентов банка с выделением наиболее значимых особенностей звука в каждом кадре и эффективное представление признаков – получение кепстральных коэффициентов Mel-частоты.

### B. Mel-спектрограмма

Mel-спектрограмма – разновидность спектрограммы, широко используемой в задачах обработки аудиосигналов и в машинном обучении. Как и обычная спектрограмма, она отображает частотное содержание сигнала во времени. Основное отличие заключается в использовании мел-шкалы, имитирующей нелинейное восприятие звуковых частот человеческим ухом.

Алгоритм получения мел-спектрограммы включает STFT (Short-Time Fourier Transform) – преобразования Фурье с оконной функцией, позволяющего получить частотные спектры путём разбиения сигнала на короткие сегменты. Затем спектры проходят через мел-фильтр, который преобразует частотные компоненты в соответствии с мел-шкалой, соответствующей особенностям слухового восприятия.

Ряд моделей машинного обучения способен воспринимать визуальное представление спектрограммы в качестве входных данных и, после прохождения этапа обучения, генерировать соответствующие результаты на выходе.

### C. Хромограмма

Хромограмма, как и спектрограмма, представляет собой двумерную структуру. Однако, в то время как спектрограмма отражает частотное содержание сигнала во времени, хромограмма содержит информацию об интенсивности звука в контексте 12-ти классов частот. Каждый из этих классов соответствует одному из полутонов, составляющих хроматическую гамму: C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#.

Хромограмма позволяет выделять тональные характеристики музыки или речи. В зависимости от подхода к её построению различаются методы построения.

Кроме того, в рамках данного исследования полезную информацию может дать признак,

характеризующий меру времени в аудиокomпозиции – темп.

### III. СВЯЗЬ С ТЕОРИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Решение задачи MER (music emotion recognition) с помощью методов машинного обучения может быть представлено в контексте теории управления с помощью структурной схемы, отраженной на рисунке ниже (рис. 1).

В качестве задающего устройства (ЗУ) в данной системе выступают музыкальные инструменты, звуковые сигналы которых обрабатываются в измерительном элементе (ИЭ). Для извлечения необходимых признаков применяется библиотека librosa на языке программирования Python, предоставляющая встроенные методы цифровой обработки сигналов (ЦОС).

На этапе обучения признаки, предварительно размеченные человеком, передаются в объект управления (ОУ) – модель машинного обучения. Поскольку в рамках данной работы решается задача классификации, обучение относится к категории обучения с учителем (supervised learning). В роли управляющего устройства выступает учитель – источник обучающих данных, направляющий процесс формирования модели.

Процесс более тонкой настройки модели и дальнейшего подбора оптимальных гиперпараметров классификатора осуществляется с помощью регулятора, реализующего управление по обратной связи. Детализация процесса представлена на рис. 2. Функции наблюдателя в системе выполняет человек, осуществляющий оценку качества работы модели и принимающий решения о корректировке её параметров.

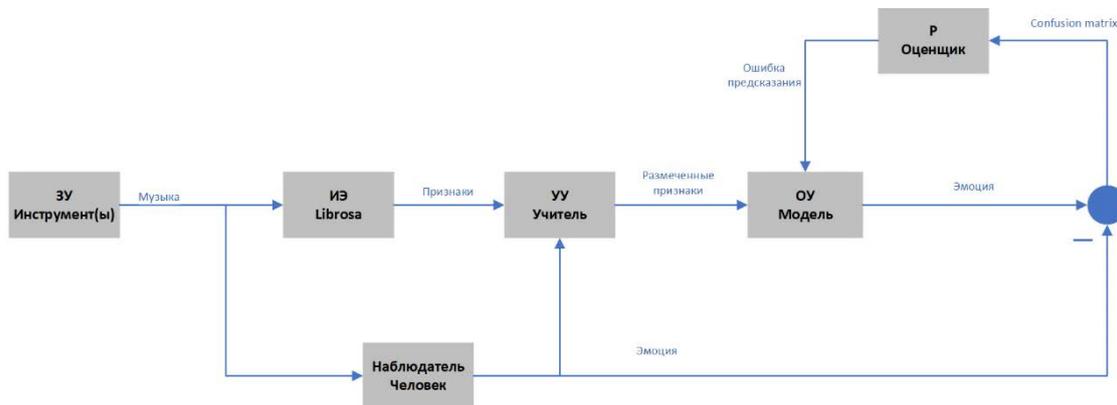


Рис. 1. Структурная схема MER

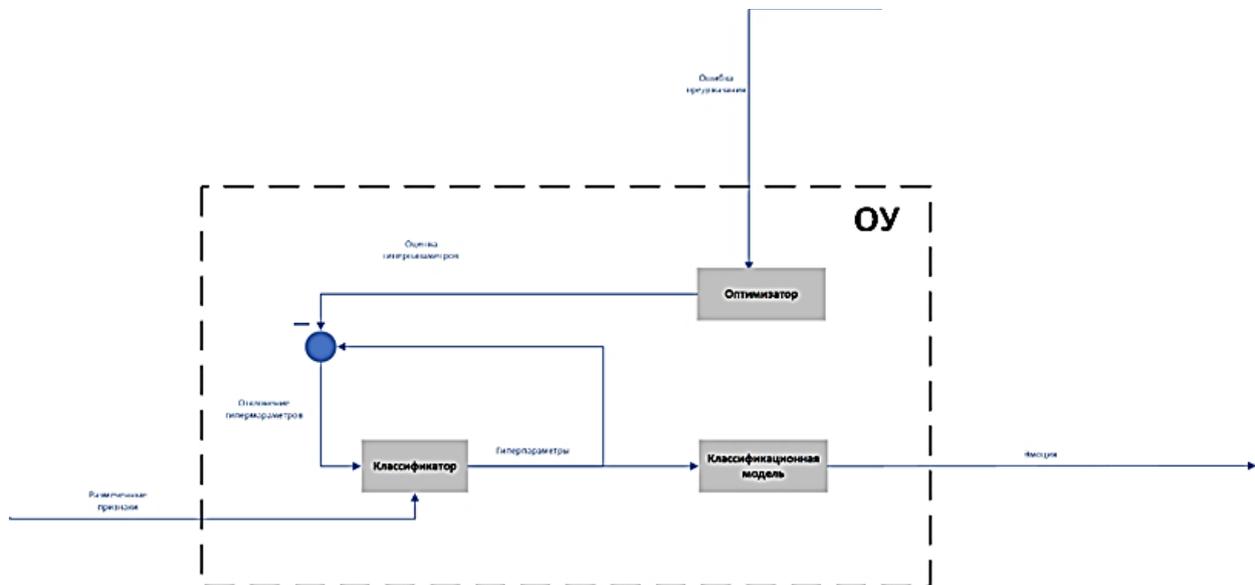


Рис. 2. Детализация ОУ

### IV. ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

В качестве непрерывной эмоциональной модели берется VA-модель Рассела [2]. Эта модель переводит все эмоции в двухмерное пространство, в котором значение по оси абсцисс отражает валентность (valence), а по оси ординат возбуждение (arousal). Положительные и отрицательные значения возбуждения и валентности

выделяют четыре типа эмоций: счастье, агрессия, подавленность и расслабленность (рис. 3).

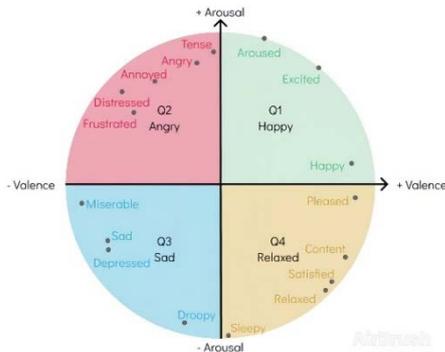


Рис. 3. VA-модель Рассела

Данные [3], взятые для исследования, представляют собой размеченный набор из 900 аудиообразцов, отнесенных к одному из четырех основных эмоциональных классов.

Из каждого аудиообразца извлекается ряд признаков: хромограммы CQT, STFT и CENS, мел-спектрограмма, мел-кепстральные коэффициенты и данные о темпе. Полученный таким образом датафрейм имеет размерность (900, 506).

#### V. ПОСТРОЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ML-МОДЕЛЕЙ

После построения методами машинного обучения различных классификаторов и тестирования всевозможных методов подбора гиперпараметров (от простого подбора по сетке GridSearchCV до автоматизированного инструмента Optuna) выделено несколько наиболее сильных моделей. Метрики, полученные после их настройки, сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I.

Модель	Accuracy
CatBoostClassifier	0.66
RidgeClassifier	0.66
RandomForestClassifier	0.70
XGBClassifier	0.72

Настроенные с помощью метода Optuna модели на основе случайного леса и градиентного бустинга демонстрируют лучший результат, что объясняется их устойчивостью к переобучению и хорошими адаптивными способностями.

Для оценки эффективности использования понижения размерности при решении задачи классификации в рамках исследования построены две классификационные модели на основе компонент, выделенных с помощью UMAP и PCA (Метода Главных Компонент). При оптимизации параметров так же используется инструмент Optuna. Результаты сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II.

Подход к понижению размерности	Число компонент	Классификатор	Accuracy
UMAP	5	RFC	0.61
PCA	25	RFC	0.62
		XGB-Classifier	0.64

При понижении размерности точность упала в среднем на 8–9%. Однако результаты остались приемлемыми. Полученные оценки сопоставимы с полученными при построении сложных моделей на основе первоначальных данных. Можно сделать вывод о том, что данный подход может быть применим к подобной задаче.

#### VI. ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ

С целью очистки звука и удаления высокочастотных шумов применяется цифровой БИХ-фильтр Баттерворта, обеспечивающий максимально плоскую АЧХ в полосе пропускания и не допускающий резких искажений.

Заданная в фильтре частота среза составляет 20% от частоты Найквиста (что соответствует примерно 4.4 кГц при 44.1 кГц дискретизации). Порядок фильтра равен 1, (достаточно мягкое затухание высоких частот). Фильтр настроен таким образом, чтобы пропускать низкие частоты и ослаблять высокие.

После фильтрации каждого аудиообразца и последующего извлечения из него информативных признаков строятся модели классификации. После их обучения и настройки, метрика accuracy принимает значения 0.60. Остальные показатели точности для классов сильно разнятся. Так, для второго класса recall принимает значение 0.82, в то время как эта же метрика для четвертого класса достигает лишь 0.46. При варьировании параметров фильтра ключевые показатели точности остаются неизменными.

Исходя из результатов эксперимента, можно заключить, что применение фильтра для решения данной задачи не является эффективным методом.

#### VII. СЭМПИЛИРОВАНИЕ ТРЕКОВ

Распространённый подход в задачах ЦОС – сегментирование аудиопотока на интервалы фиксированной длины и обучение модели на каждом из них. Итоговое предсказание сигнала формируется на основе агрегирования результатов для отдельных его сегментов. Подход позволяет увеличить объём обучающей выборки, снизить внутриклассовую вариативность признаков в пределах одного трека и, как следствие, улучшить обобщающую способность модели и повысить её точность.

В рамках исследования музыкальный образец делится на 5 фрагментов. Учитывая, что аудиотреки в используемом наборе данных имеют продолжительность порядка 30 с., длительность одного аудиофрагмента достаточна для выделения ключевых акустических признаков, характеризующих его эмоциональную окраску. После сегментирования размерность датафрейма составила (4500, 507), где 4500 – количество сгенерированных аудиофрагментов, а 507 – число признаков, извлечённых из каждого сегмента.

Для оценки способности моделей обучаться на сформированной таким способом выборке строятся базовые классификаторы на основе алгоритма случайного леса (Random Forest) и градиентного бустинга (XGBoost). Предсказание для каждого аудиотрека определяется большинством голосов по результатам классификации его сегментов. Достигнута точность 68%, что свидетельствует о заметном улучшении по сравнению с изначальными результатами.

При подборе гиперпараметров с использованием кросс-валидации достигнуть улучшения качества моделей не удается – напротив, наблюдается незначительное снижение точности по сравнению с результатами базовых моделей. Это свидетельствует о том, что более высокие значения метрик на предыдущем этапе обусловлены «удачным» случайным разбиением выборки, что приводит к переоценке реальной способности модели к обобщению.

После построения и обучения тех же моделей с агрегированием результатов методом взвешенного среднего для учета вклада каждого сегмента в общее предсказание точность достигает 70% для модели случайного леса и 68% для XGBoost. Оптимизация параметров с помощью Optuna приводит к улучшению точности классификации до 72% для обеих моделей. При этом precision для Q2 достигает 86–88%. Практически все ключевые метрики значительно выше 60%.

Можно сделать вывод об эффективности данного подхода. При том, что удалось только повторить лучший результат, полученный в предыдущих экспериментах, в данном случае он более стабилен.

### VIII. ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Перед построением CNN из аудиообразцов извлекаются хромограммы и преобразуются в изображения (рис. 4–7), на которых по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат высота звука. Диапазон частот охватывает 60 полутонов (5 октав). Большинство музыкальных произведений не выходят за эти границы. Таким образом, для каждого класса строится 255 изображений.

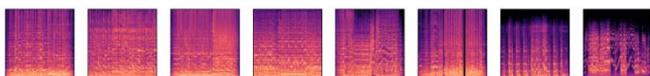


Рис. 4. Q1 (Счастье)

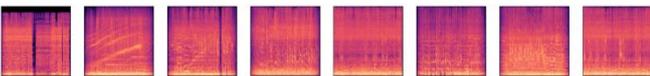


Рис. 5. Q2 (Агрессия)

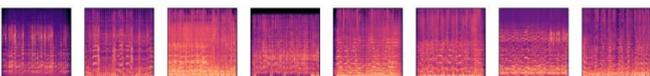


Рис. 6. Q3 (Подавленность)

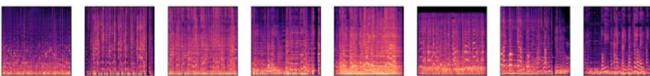


Рис. 7. Q4 (Расслабленность)

Изображения хромограмм для Q2 значительно отличаются от остальных, но в каждом классе есть квадраты схожие с квадратами чужого класса, что может привести к снижению точности работы нейросети.

После обучения на 20-ти эпохах CNN демонстрирует переобучение. На тренировочной выборке точность достигает 100%, на тестовой – всего 50%. Модель

запоминает особенности обучающих данных, но не способна эффективно обобщать информацию на новых.

По матрице ошибок (рис. 8) видно, что CNN плохо различает между собой третий и четвертый квадранты, отвечающие в VA-модели за эмоции со слабой степенью возбуждения (расслабленность и подавленность). Аналогично моделям классического машинного обучения лучше всего она идентифицирует счастье.

Реальное	Q1	25	18	17	8
	Q2	15	48	3	2
	Q3	11	3	30	23
	Q4	9	3	23	32
		Q1	Q2	Q3	Q4
		Предсказанные			

Рис. 8. Матрица ошибок CNN

Настройка позволяет повысить точность лишь на 5%. Учитывая наличие четырёх классов, результат, превышает случайное угадывание. Однако, в целом, можно заключить, что методы классического машинного обучения более эффективны, что может быть связано с недостаточным объемом обучающей выборки для полноценной работы моделей глубокого обучения.

### IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая небольшой объем входных данных для обучения и субъективность их разметки, можно утверждать, что полученный в рамках исследования результат является достаточно высоким. Лучший результат демонстрируют модели на основе случайного леса и градиентного бустинга.

Разработка обладает практической значимостью

- в психологии и медицине: при подборе музыки для психотерапии при лечении стрессовых состояний и психических расстройств;
- В социологии: при анализе влияния музыки на эмоциональное состояние общества и культурные тренды;
- в сфере ИИ: при автоматическом формировании музыкальных рекомендаций и плейлистов на стриминговых платформах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCC) for Speech Recognition // geeksforgeeks URL: <https://www.geeksforgeeks.org/mel-frequency-cepstral-coefficients-mfcc-for-speech-recognition/> (дата обращения: 24.04.2025).
- [2] A Novel Music Emotion Recognition Model Using Neural Network Technology // frontiers URL: <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2021.760060/full> (дата обращения: 10.05.2025).
- [3] MOODetector Datasets and Extracted Features 4Q audio emotion dataset // MIR.cisuc URL: <https://mir.dei.uc.pt/downloads.html> (дата обращения: 14.04.2025).

# Разработка библиотеки парсера для языка LibSL на языке C++

Н. М. Ларионов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

nlarionov347@gmail.com

**Аннотация.** В статье описывается процесс проектирования и разработки библиотеки парсера для языка спецификации библиотек LibSL. Приводится краткое описание языка LibSL и рассматриваются существующие подходы к использованию языка спецификации. Обосновывается важность разработки библиотеки парсера на языке C++ и перечисляются необходимые инструменты, выбранные для этой задачи. Описываются процессы проектирования, разработки библиотеки при помощи генератора парсеров antlr4 и тестирования, после чего указывается, как библиотека может быть в дальнейшем модифицирована, и в каких областях может использоваться.

**Ключевые слова:** спецификация библиотек; язык спецификации; парсер грамматики; генератор парсеров

## I. ВВЕДЕНИЕ

Использование сторонних библиотек является неотъемлемой частью процесса разработки современных программных продуктов. Однако, сторонние разработчики зачастую делают исходный код библиотек закрытым из-за чего у пользователя библиотеки не всегда есть возможность ознакомиться со всеми нюансами работы библиотеки. Это может быть связано с ограниченными временными ресурсами, предоставляемыми сотрудникам на ознакомление с документацией, или же сопровождающая документация может описывать библиотеку не в полном объеме. В таких случаях, применение библиотек далеко не всегда положительно складывается на техническом качестве программного продукта.

Альтернативным подходом спецификации библиотек является применение языков спецификации. Одним из языков спецификации является язык спецификации библиотек LibSL [1]. LibSL позволяет описывать поведение библиотеки в виде системы взаимодействующих расширенных конечных автоматов. Описание поведения библиотеки при помощи языка спецификации должно являться менее ресурсоемкой задачей, чем составление полноценной текстовой спецификации. Помимо этого, полученная спецификация библиотеки может быть использована в различных автоматизированных процессах, вроде поиска ошибок интеграции проекта с библиотекой [2] или автоматизированной миграции проекта с одной библиотеки на другую [3].

Для языка LibSL разработаны инструменты для его использования и интеграции в проекты. Для проверки грамматики файлов, содержащих спецификацию LibSL, разработаны парсер в формате библиотеки, написанный на языке Kotlin и плагин для Visual Studio, использующий данную библиотеку [4]. Однако для

работы они требуют наличия JVM с подходящей версией, что может вызывать трудности при интеграции парсера с проектом, использующим другую версию JVM или и вовсе другой язык программирования. Для расширения доступности применения языка спецификации LibSL была поставлена задача разработать библиотеку парсера языка LibSL на языке C++.

## II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ ПАРСЕРА

В соответствии с поставленной задачей были сформулированы требования, которые определяют дальнейшую структуру библиотеки и используемые для выполнения задачи инструменты. Так как работа направлена на расширение доступности языка LibSL, то основным требованием является универсальность библиотеки – использование библиотеки парсера должно минимально зависеть от особенностей применяемой операционной системы и среды разработки. Вторым требованием является простота использования библиотеки – расширение доступности языка LibSL должно обеспечиваться за счет упрощенного взаимодействия пользователя с библиотекой парсера. Завершающим требованием является удобство сопровождения библиотеки – структура библиотеки парсера должна быть составлена таким образом, чтобы пользователи имели возможность устранять возможные неточности библиотеки парсера и модифицировать ее с минимальными усилиями.

Исходя из определенных ранее принципов, был составлен следующий набор решений, используемый для реализации библиотеки. Компилятор был выбран из набора инструментов MinGW-w64, так как он поддерживает работу и на ОС Windows и на дистрибутивах ОС Linux. Кроме этого, MinGW-w64 имеет в своем составе линкер, среду выполнения и стандартные библиотеки. В качестве средства автоматизированной сборки было выбрано средство Ninja, которое также доступно и на ОС Windows и на ОС Linux. Для работы со сборочными файлами был выбран генератор сборочных файлов CMake, который предоставляет возможность гибкой настройки выполняемых сборочных процессов и имеет встроенную поддержку генерации сборочных файлов для Ninja, что позволяет значительно упростить сборку библиотеки парсера.

C++ позволяет реализовывать статические и динамические варианты библиотек. При использовании, статические библиотеки компилируются целиком вместе с использующей их программой, а динамические позволяют подгружать только вызываемые компоненты при их вызове. Однако, динамические библиотеки имеют

особенности, связанные с структурой заголовочных файлов, поэтому было принято решение разработать первичный вариант библиотеки парсера в статическом экземпляре для использования на ОС Windows.

### III. РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ ПАРСЕРА

Язык спецификаций библиотек LibSL описан при помощи языка описания грамматик ANTLR. Таким образом, сформировать файлы, описывающие логику парсера языка LibSL на языке C++ можно при помощи генератора парсеров ANTLR4, что значительно упрощает разработку библиотеки парсера. Полученный парсер языка LibSL состоит из двух компонентов – лексера и парсера. Лексер получает на вход поток данных на языке LibSL и преобразует его в поток лексических токенов. Парсер обрабатывает поток токенов, проверяет их на предмет совпадения с грамматикой и далее на их основе строит лексическое дерево.

Для работы такого парсера необходимы сторонние компоненты – библиотека, содержащая генератор парсеров и среда выполнения, необходимая для работы парсера. Для сборки готовой библиотеки парсера необходимо сгенерировать файлы с логикой парсера, собрать среду выполнения ANTLR4, скомпилировать главный класс библиотеки, который линкуется вместе со средой выполнения в единый исполняемый файл. Полученную структуру библиотеки можно рассмотреть на рис. 1.



Рис. 1. Структура библиотеки

На рисунке изображена структура библиотеки, используемой тестовой программой executable. Файлы библиотеки расположены в папке libsl-parser, состоящей из папок generated, grammar, include и runtime. Файлы, сгенерированные на основе файлов грамматики языка LibSL, содержащихся в папке grammar, хранятся в папке generated. Они генерируются при помощи библиотеки генератора парсера ANTLR, содержащейся в папке libs.

Классы LibSLLexer и LibSLParser обеспечивают работу лексера и парсера соответственно. Главный класс LibSL.cpp позволяет использовать методы из сгенерированных файлов. Файлы среды выполнения содержатся в папке runtime. Во время сборки библиотеки парсера, главный класс библиотеки парсера и сгенерированные файлы парсера линкуются вместе со средой выполнения runtime в единый исполняемый файл, подключаемый и используемый в тестовой программе. Тестовая программа может решать различные задачи, например проверять файлы спецификации на языке LibSL из папки examples на предмет их соответствия грамматике языка спецификации.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была разработана статическая библиотека парсера языка спецификации LibSL на языке C++ для использования на ОС Windows. Библиотека парсера позволяет пользователю работать пользователю со спецификацией на языке LibSL, обеспечивая проверку соответствия спецификации грамматике LibSL. Библиотека парсера может быть в дальнейшем доработана доступными средствами для использования на дистрибутивах ОС Linux. В случае необходимости, может быть разработан также динамический вариант библиотеки. Разработанная библиотека парсера может быть в будущем использована в различных проектах, например для проверки файлов спецификации, используемых для автоматизированной миграции приложения с одной библиотеки на другую.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю благодарность: доценту ИТМО, кандидату технических наук Владимиру Михайловичу Ицкуну – за предоставление темы и материалов для работы и за консультации по диплому; заместителю заведующего кафедрой АПУ, доценту, кандидату технических наук Юрию Анатольевичу Кораблеву – за оперативную организацию процессов, помощь в работе над дипломом и научными публикациями; старшему преподавателю кафедры АПУ Александру Владимировичу Ерошкину – за предоставление важных контактов, возможность сделать работу по интересующей меня теме и сопровождение рабочего процесса. Также благодарю своих однокурсников Волкова Ивана и Федора Вотякова за своевременную помощь в сложных моментах работы, когда мне это было необходимо.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ицкун В.М. LibSL-язык спецификации компонентов программного обеспечения // Программная инженерия. 2018. Т. 9. №. 5. С. 209.
- [2] Feofilaktov V., Itsykson V. SPIDER: Specification-Based Integration Defect Revealer // International Conference on Software Testing, Machine Learning and Complex Process Analysis. Cham : Springer Nature Switzerland, 2021. С. 107-119.
- [3] Alekseyuk A.O., Itsykson V.M. Semantics-driven migration of Java programs: a practical application // Automatic Control and Computer Sciences. 2018. Т. 52. С. 581-588.
- [4] Мартюшев В.Д. Плагин для VSCode для языка спецификации библиотек LibSL. URL: <https://nnov.hse.ru/ba/se/students/diplomas/925717980> (Дата обращения: 18.03.2025)

# Исследование процессов диагностики электропривода насосного агрегата по перекачке конденсата газового нестабильного

А. С. Мысик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

alexa.mysson@yandex.ru

**Аннотация.** Проведено исследование применимости нейронных сетей для задач диагностики состояния электропривода насосного оборудования по перекачке конденсата газового нестабильного. Проведены эксперименты по подбору оптимальной архитектуры нейронной сети для решения данной задачи. На базе полученной нейронной сети создано программное обеспечение для работы с ней.

**Ключевые слова:** конденсат газовый нестабильный, нейронные сети, программное обеспечение, вибрационная диагностика, прогнозирование неисправностей, насосное оборудование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия, особенно в условиях жёсткой конкуренции, предъявляют повышенные требования к надёжности и эффективности эксплуатации оборудования. В связи с этим разработка эффективных методов диагностики технического состояния электроприводов насосного оборудования является актуальной и востребованной задачей.

Традиционные методы диагностики, основанные на экспертных оценках и периодических проверках, зачастую являются субъективными, трудоёмкими и не позволяют выявить скрытые дефекты на ранних стадиях. В последние годы активно развивается направление, связанное с применением методов машинного обучения, в частности нейронных сетей, для решения задач диагностики технического состояния оборудования. В отличие от традиционных методов, нейронные сети могут анализировать большие объёмы данных, выявлять скрытые закономерности и предоставлять объективную информацию.

## II. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОГО АГРЕГАТА ПО ПЕРЕКАЧКЕ КОНДЕНСАТА ГАЗОВОГО НЕСТАБИЛЬНОГО

Диагностика электропривода насосного агрегата по перекачке конденсата газового нестабильного организована следующим способом. Вибрационные значения получают путем снятия показаний с 7 точек, указанных на рис. 1.

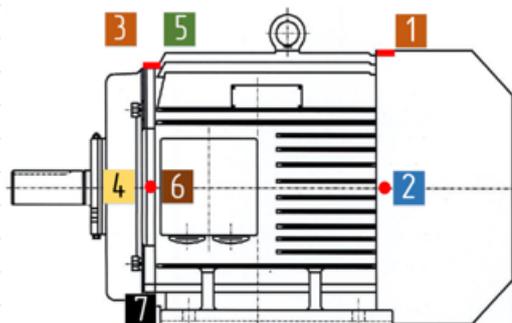


Рис. 1. Точки снятия вибрационных показаний с электропривода насосного агрегата

Данные в точках 1, 2, 5, 6, 7 получены с помощью переносного вибрметра. В точках 3 и 4 установлены стационарные датчики вибрации. В точке 7 осуществляется контроль над горизонтальной и вертикальной вибрацией.

Полученные от всех датчиков значения заносятся специалистом по диагностике в таблицу, приведенную на рис. 2.

	1	2	3(S05)	4(S06)	5	6	7	8
1500	0.9	0.6	1.22	0.79	1.4	0.7	0.4	0.7
1600	1.5	0.7	1.39	0.95	1.4	0.8	0.7	0.8
1700	1.6	0.8	1.39	0.95	1.6	0.8	0.3	0.6
1800	2.4	1.1	2.01	1.17	2.3	1.1	0.4	0.6
1900	2.2	1.1	2.15	1.19	2.3	1.1	0.4	0.6
2000	2.5	1.6	2.30	1.55	2.4	1.3	0.8	0.6
2100	3	1.4	2.56	1.73	2.8	1.6	0.6	0.8
2200	3.5	1.5	3.15	2.05	3.4	2	0.7	1.3
2300	4	1.9	3.82	2.38	4	2.3	0.7	1.1
2400	5.2	2.4	4.78	2.93	3.3	2.8	0.9	1.1
2500	6.7	4.6	5.52	4.28	6	4.2	1.2	1.8
2600	7.6	7.7	6.05	6.78	6.8	6.9	1.3	2.7
2700	8.8	5.9	6.69	5.86	7.1	6	1	2
2800	11	3.7	7.95	3.62	8.7	3.8	0.9	2.1
2900								

Рис. 2. Пример результатов измерения уровня вибрации

В заголовках столбцов указаны точки контроля, в заголовках строк – режимы работы электропривода насосного агрегата.

Данная таблица анализируется специалистом, в результате чего делает вывод о состоянии электропривода насосного агрегата, т.е. определяется одно из трех состояний: норма, предупреждение и авария.

Результат обработки вибрационных показаний приведен на рис. 3.

	1	2	3(S05)	4(S06)	5	6	7	8
1500	0.9	0.6	1.22	0.79	1.4	0.7	0.4	0.7
1600	1.5	0.7	1.39	0.95	1.4	0.8	0.7	0.8
1700	1.6	0.8	1.39	0.95	1.6	0.8	0.3	0.6
1800	2.4	1.1	2.01	1.17	2.3	1.1	0.4	0.6
1900	2.2	1.1	2.15	1.19	2.3	1.1	0.4	0.6
2000	2.5	1.6	2.30	1.55	2.4	1.3	0.8	0.6
2100	3	1.4	2.56	1.73	2.8	1.6	0.6	0.8
2200	3.5	1.5	3.15	2.05	3.4	2	0.7	1.3
2300	4	1.9	3.82	2.38	4	2.3	0.7	1.1
2400	5.2	2.4	4.78	2.93	3.3	2.8	0.9	1.1
2500	6.7	4.6	5.52	4.28	6	4.2	1.2	1.8
2600	7.6	7.7	6.05	6.78	6.3	6.9	1.3	2.7
2700	8.3	3.9	6.69	5.86	7.1	6	1	2
2800	11	3.7	7.95	3.62	8.7	3.8	0.9	2.1
2900								

Рис. 3. Пример результатов обработки измерений уровня вибрации

Процесс диагностики электропривода насосного агрегата приведен на рис. 4.

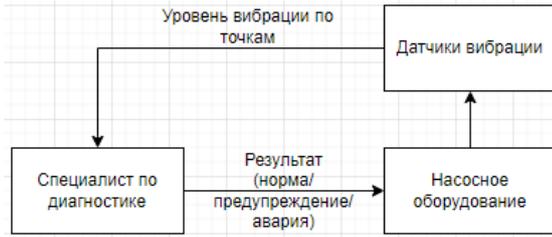


Рис. 4. Существующий процесс диагностики

В исследовании предложено изменить процесс обработки показаний датчиков. Новый процесс диагностики электропривода насосного агрегата представлен на рис. 5.



Рис. 5. Предлагаемый процесс диагностики

Как видно здесь произведена замена специалиста по диагностике на программное обеспечение (ПО) на основе нейронной сети (НС). Поскольку полученная в исследовании точность работы НС на данный момент не достигла 100%, в систему добавлен супервизор. Он контролирует работу ПО с НС.

### III. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ

Исходными данными для обучения НС стали специализированные акты измерения уровня вибрации в формате *Microsoft Excel*. В них представлена информация о дате и времени проведения измерений, данные об электроприводе насосного агрегата, с которого снимались показания, точки снятия показаний и данные об уровне вибрации, а также цветовая разметка о соответствии значения нормальному, предупредительному или аварийному уровню.

В исходных данных цвета ячеек обозначают следующее (рис. 3):

- белый – норма;
- зеленый – предупредительный уровень;
- красный – аварийный уровень.

Исходные данные из таблиц *Microsoft Excel* переведены в формат *TXT*. При этом данные по каждому столбцу переведены в два массива. Первый содержит 14 значений, каждое из которых соответствует значению ячейки таблицы, второй же содержит закодированное значение цвета соответствующей ячейки, где 0 – белый, 1 – зеленый и 2 – красный.

### IV. ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ЕЕ ОБУЧЕНИЕ

Для проведения экспериментов использовался ресурс *Google Collab* и библиотеки *TensorFlow*. В результате экспериментов планировалось получить оптимальные настройки, обеспечивающие наилучшую точность и эффективность обучения НС для поставленной задачи. При этом разработаны и обучены НС с различными конфигурациями, варьирующимися по следующим параметрам:

- количество слоев: один и два скрытых слоя;
- количество нейронов в каждом скрытом слое: для сети с одним скрытым слоем – от 10 до 50000 (10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000), а для сети с двумя скрытыми слоями количество нейронов в первом скрытом слое варьировалось от 10 до 50000 (10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000), а во втором скрытом слое – от 10 до 10000 (10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000);
- метод оптимизации: основной метод оптимизации – *Adam*. Кроме того, проведены эксперименты с использованием метода *Adadelta*;
- количество эпох обучения: от 50 до 250 (50, 100, 250) для каждой конфигурации сети.

В качестве метрики оценки производительности использовалась точность. Каждая конфигурация НС обучалась на одних и тех же данных, и результаты сравнивались для выявления наиболее эффективных вариантов.

### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБУЧЕНИЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Результаты экспериментов сведены в тепловые карты, представленные ниже. В них отображены значения функции потерь, достигнутые при различных архитектурах НС после 50, 100 и 250 эпох обучения.

На рис. 6 приведена тепловая карта результатов обучения НС с одним скрытым слоем с помощью метода *Adam*.

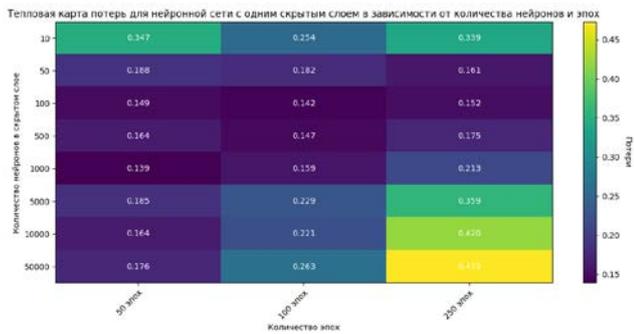


Рис. 6. Тепловая карта результатов обучения НС (*Adam*)

На рис. 7–9 приведены результаты обучения НС с двумя скрытыми слоями по методу *Adam* для 50, 100, 250 эпох.

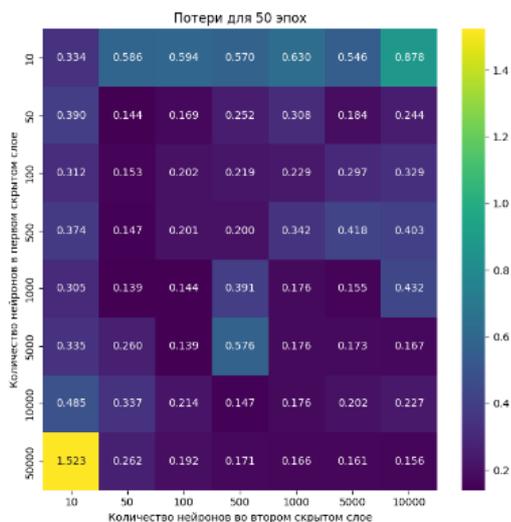


Рис. 7. Тепловая карта результатов обучения для 50 эпох

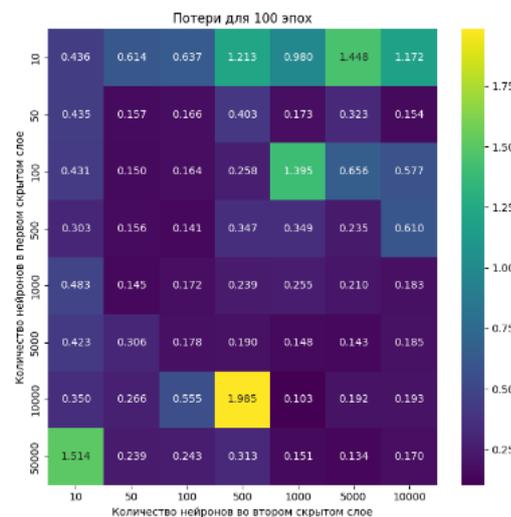


Рис. 8. Тепловая карта результатов обучения для 100 эпох

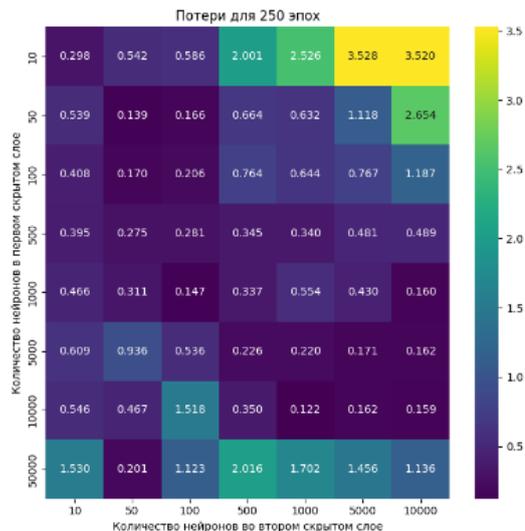


Рис. 9. Тепловая карта результатов обучения для 250 эпох

На рис. 10 приведена тепловая карта результатов обучения НС с одним скрытым слоем по методу *Adadelta*.

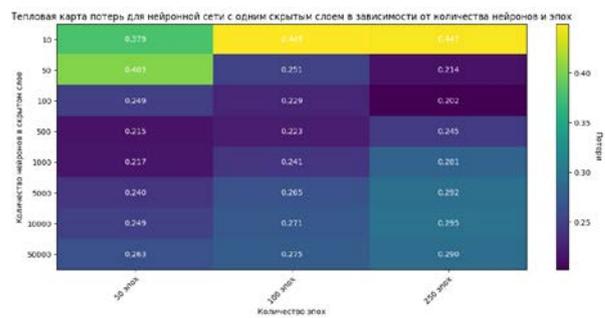


Рис. 10. Тепловая карта результатов обучения НС (*Adadelta*)

На рис. 11–13 приведены результаты обучения НС с двумя скрытыми слоями по методу *Adadelta* для 50, 100, 250 эпох.

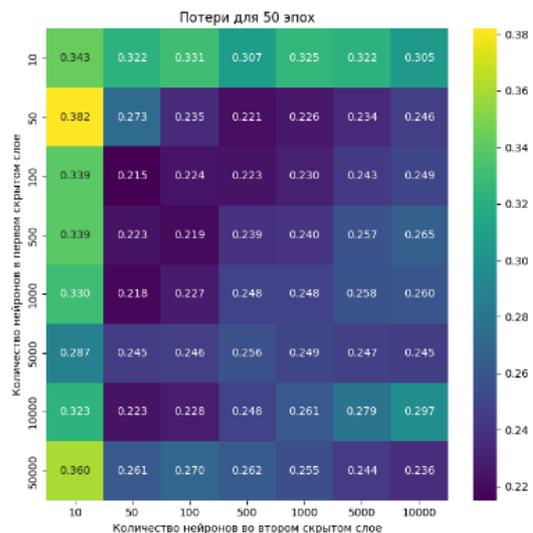


Рис. 11. Тепловая карта результатов обучения НС для 50 эпох

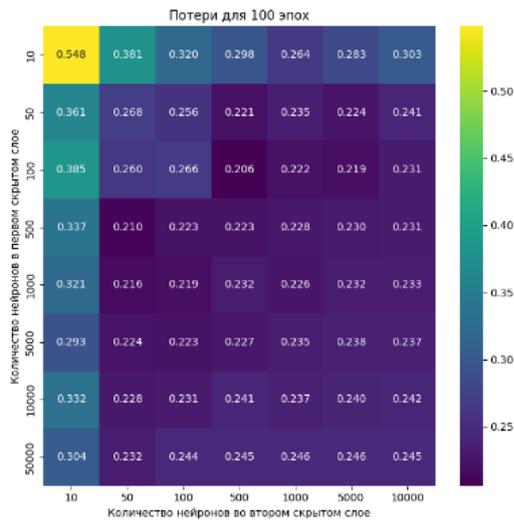


Рис. 12. Тепловая карта результатов обучения НС для 100 эпох

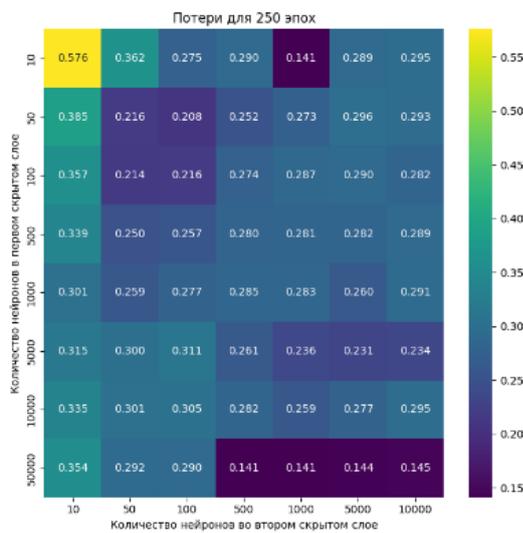


Рис. 13. Тепловая карта результатов обучения НС для 250 эпох

По результатам экспериментов архитектурой, показавшей наименьшее значение потерь равное 0.103, является НС с двумя скрытыми слоями с 10000 нейронами в первом скрытом слое и 1000 нейронами во втором слое, обученная методом *Adam* на протяжении 100 эпох.

#### VI. СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ С ОБУЧЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для создания программы на языке *Python* использовалась экспортированная из *Google Colab* обученная НС в формате *.h5*.

Программа имеет пользовательский интерфейс, приведенный на рис. 14.

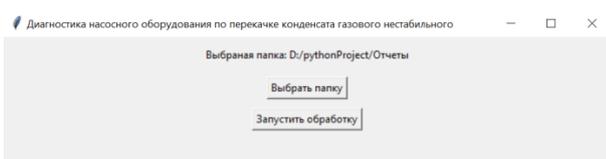


Рис. 14. Пользовательский интерфейс ПО

Пользователь с помощью этого интерфейса может выбрать папку, содержащую отчеты, которые необходимо обработать.

После работы ПО пользователь получает обработанный отчет, аналогичный представленному на рис. 2, и итоговый отчет по всем файлам, представленный на рис. 15.

71_Акт замера уровня вибрации.xlsx	17_ЭД..071	Аварийный останов
	18_ЭД..071	Аварийный останов
	19_ЭД..071	Аварийный останов
	20_ЭД..071	Аварийный останов
	21_ЭД..071	Аварийный останов
	22_ЭД..071	Аварийный останов
	23_ЭД..071	Аварийный останов
	24_ЭД..071	Аварийный останов
	27_ЭД..071	Аварийный останов
72_Акт замера уровня вибрации.xlsx	6) 17.02.2024	Аварийный останов
	7) 18.02.2024	Предупредительный уровень
	16_ЭД..072	Аварийный останов

Рис. 15. Пример итогового отчета

Программа соответствует заявленным требованиям. Доля ошибочных значений составила 0.103.

#### VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа источников и опираясь на информацию о реальных аспектах использования НС в диагностике разработано ПО, позволяющее проводить автоматическую диагностику электроприводов насосных агрегатов. Полученный результат удовлетворяет заявленным требованиям. На данный момент для контроля над обработкой данных, полученных в ПО с НС требуется супервизор, т.к. доля ошибочных определений значительна.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю благодарность доценту Сергею Евгеньевичу Абрамкину за предоставление исходных данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Коровин Я.С. Автоматизированная система онлайн мониторинга состояния фонда нефтедобывающих скважин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. С. 222-227.
- [2] Галуев Г.А., Коровин С.Я., Коровин Я.С. Принципы построения мультиагентных систем поддержки принятия решения для управления технологическими процессами нефтегазодобывающих предприятий // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2006. № 4/5. С. 116-121.
- [3] Коровин Я.С., Хисамутдинов М.В., Иванов Д.Я. Экспериментальные исследования методов нейросетевого анализа нефтепромысловых данных // Вестник науки и образования. 2019. № 1 (55). Ч.1. С. 26-31.
- [4] Коровин Я.С., Хисамутдинов М.В., Иванов Д.Я. Методы нейросетевого анализа нефтепромысловых данных // Вестник науки и образования. 2019. № 1(55). Ч. 1. 6 с.
- [5] Ткаченко М.Г., Коровин Я.С. Применение нейросетевого анализа данных в нефтегазодобывающей промышленности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. С. 172-178.
- [6] Ткаченко М.Г. Применение искусственной нейронной сети, оптимизированной генетическим алгоритмом, в задаче анализа состояния технологического оборудования нефтегазодобывающей промышленности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. С. 262-270.
- [7] Обзор применения нейросетей в области добычи и транспорта нефти и газа / И.И. Хасанов, З.Р. Хасанова, Р.А. Шакиров, О.И. Недельченко // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 3-4. С. 11-15. DOI:10.24412/0131-4270-2022-3-4-11-15
- [8] Assessment of the Condition of Pipelines Using Convolutional Neural Networks / Y. Vankov, A. Romyantsev, S. Ziganshin, T. Politova, R. Minyazev, A. Zagretidinov // Energies. 2020, 13, 618; doi:10.3390/en13030618

# Использование МРТ-сканирования для идентификации управляемого роста опухоли при онкологическом заболевании

Д. А. Прахов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

prakhov.daniil@gmail.com

**Аннотация.** Целью данного исследования является изучение возможностей использования современных технологий МРТ-сканирования для идентификации управляемого роста опухоли при онкологических заболеваниях. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ существующих методов МРТ-сканирования, выявить их преимущества и недостатки, разработать подходы к улучшению точности диагностики, а также оценить перспективы внедрения новых технологий в клиническую практику.

**Ключевые слова:** онкологические заболевания; нейронные сети (НС); диагностика; МРТ-сканирование

## I. ОБЗОР ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ МРТ-СКАНИРОВАНИЯ

МРТ-сканирование, или магнитно-резонансная томография, впервые было использовано в клинической практике в 1977 году, что стало значительным шагом вперед в медицинской визуализации. Этот метод основан на использовании магнитного поля и радиоволн для создания детальных изображений внутренних структур тела. На протяжении десятилетий технология МРТ развивалась, становясь более точной и доступной. Сегодня, благодаря её неинвазивному характеру и высокой разрешающей способности, МРТ широко используется для диагностики различных заболеваний, включая онкологические. Ежегодно проводится более 30 миллионов МРТ-сканирований по всему миру, что подчеркивает её значимость в современной медицине.

МРТ играет ключевую роль в диагностике онкологических заболеваний, предоставляя возможность визуализации опухолей с высокой точностью. Этот метод не только позволяет обнаруживать новообразования, но и оценивать их размер, форму и распространенность. Благодаря способности различать мягкие ткани, МРТ часто используется для диагностики опухолей головного мозга, позвоночника, печени и других органов. При этом МРТ также применяется для мониторинга изменений в опухоли в ответ на лечение, что делает его важным инструментом в управлении онкологическими заболеваниями. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к диагностике и лечению, где МРТ служит важным звеном в понимании процессов, происходящих в опухолевой среде.

## II. ПРОБЛЕМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Традиционные методы магнитно-резонансной томографии (МРТ), несмотря на их широкое применение

и значимость в медицинской визуализации, имеют ряд технических ограничений. Одним из главных недостатков является сравнительно низкая чувствительность при обнаружении мелких опухолей. Исследование, опубликованное в журнале 'Radiology' в 2020 году, указывает, что чувствительность стандартного МРТ составляет около 80 %, что может привести к пропуску некоторых патологических изменений. При этом качество изображений МРТ сильно зависит от используемого оборудования, что ограничивает возможности диагностики в условиях менее развитой инфраструктуры. Эти аспекты подчеркивают необходимость совершенствования существующих технологий. Кроме того, важно отметить, что мы сравниваем эффективность КТ и магнитно-резонансной томографии (МРТ) при оценке местной распространенности патологического процесса. Таким образом, комплексное использование различных методов визуализации может повысить точность диагностики и снизить вероятность пропуска патологических изменений.

Одной из основных проблем традиционных методов МРТ является сложность точной интерпретации полученных данных. В отчете Всемирной организации здравоохранения за 2021 год отмечается, что около 20 % диагностических ошибок в онкологии обусловлены ограничениями методов визуализации, включая МРТ. Это связано как с трудностями в идентификации мелких опухолей, так и с риском ложноположительных или ложноотрицательных результатов. Такие ошибки могут существенно повлиять на выбор стратегии лечения и прогноз для пациента.

## III. НЕОБХОДИМОСТЬ В НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ И МЕТОДАХ

Диагностика онкологических заболеваний представляет собой одну из наиболее сложных задач современной медицины. Несмотря на значительные успехи в технологиях визуализации, таких как МРТ, ряд вызовов продолжает препятствовать достижению максимальной точности и эффективности диагностики. Исследование, опубликованное в журнале Nature в 2020 году, указывает, что около 30 % случаев неправильной диагностики рака связано с ограничениями существующих методов визуализации. Эти ограничения включают недостаточную разрешающую способность для выявления мелких опухолей, сложности в интерпретации данных и зависимость от квалификации специалистов. Кривенцова и др. (2020) отмечают, что «основным критерием

включения в группу нормы было отсутствие в анамнезе гематологических заболеваний». Учитывая это, существует острая необходимость в разработке новых технологий, способных преодолеть указанные проблемы и обеспечить более точную и надежную диагностику. Данное исследование, проведенное Кривенцовым, получило одобрение комитета по этике ДГОИ им. Дмитрия Рогачева.

Современные исследования показывают, что использование новых технологий может существенно повысить точность диагностики онкологических заболеваний. Одним из перспективных направлений является применение МРТ с использованием контрастных агентов, что позволяет увеличить точность диагностики опухолей на 15–20 % по сравнению с традиционными методами. Это достигается за счет улучшения визуализации тканей и выявления даже небольших патологических изменений. Этот метод имеет ряд минусов, одним из которых являются интервалы между исследованиями. Специалисты утверждают, что без риска для здоровья может быть проведено одно КТ без вреда для здоровья пациента. При необходимости интервал обследований, может быть, уменьшен до 4–12 недель в зависимости от индивидуальных показателей человека. Кроме того, интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в процесс анализа МРТ-изображений открывает новые горизонты в диагностике. Такие подходы позволяют автоматизировать процесс интерпретации данных, минимизируя человеческий фактор и увеличивая скорость и точность диагностики. Эти достижения подчеркивают потенциал новых технологий в решении существующих проблем диагностики.

#### IV. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА МРТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

##### A. Выбор формата МРТ-снимка

Первое с чем предстояло определиться это формат, с которым предстоит работать. Изначально проблема, стоящая перед нами, требует от формата снимка несколько особенностей, это интерпретируемость, возможность визуально интерпретировать снимок, при этом сохраняя возможность его разбиения на отдельные сегменты для анализа. Ориентация в пространстве, для точной диагностики необходимо избежать смещений и неточностей в интерпретации координат при обнаружении опухоли. Последним требованием была возможность совместить несколько файлов, для хранения снимков в хронологической последовательности. Идеальным кандидатом стал формат, разработанный в 2003 году – Neuroimaging Informatics Technology Initiative (NIFTI). Дополнительным преимуществом было наличие библиотеки для работы с данным форматом на языке python, это значительно облегчило дальнейшую работу по разработке и настройке нейронной сети (НС).

##### B. Алгоритм U-Net и его применение в медицине

Алгоритм U-Net представляет собой архитектуру нейронной сети, разработанную специально для задач сегментации изображений, в частности, медицинских. Впервые представленный Олафом Роннебергером и его коллегами в 2015 году, U-Net использует подход энкодер-декодер, где энкодер извлекает характеристики

из изображения, а декодер восстанавливает его пространственное разрешение, обеспечивая точное выделение объектов. Такая структура позволяет эффективно анализировать изображения с высокой детализацией, что делает U-Net особенно полезным в медицинской области.

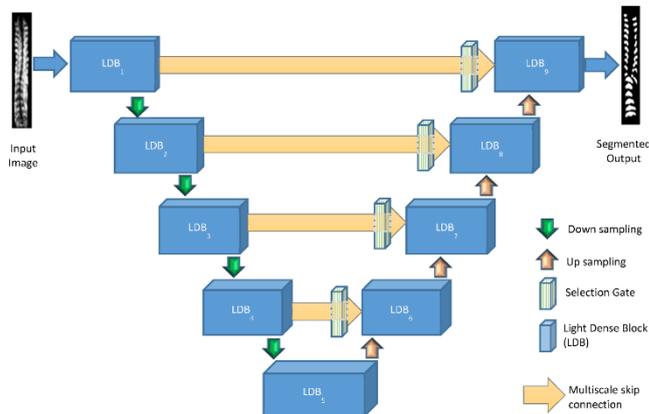


Рис. 1. Схема структура U-net

U-Net нашел широкое применение в анализе медицинских изображений, особенно в диагностике заболеваний. Он используется для сегментации тканей, выделения патологических областей и анализа структуры органов. В рамках проекта BraTS Challenge алгоритм используется для сегментации опухолей мозга на МРТ-сканах, что подтверждает его высокую точность и надежность.

Применение U-Net в онкологии предоставляет значительные преимущества. Алгоритм достигает точности до 95% при сегментации опухолей мозга, что подтверждается множеством исследований. Способность U-Net выделять мелкие и сложные структуры значительно улучшает диагностику и мониторинг состояния пациентов, что имеет особое значение в борьбе с онкологическими заболеваниями.

Среди успешных примеров применения U-Net можно отметить его использование в задачах сегментации опухолей в рамках BraTS Challenge. Здесь алгоритм показал свою эффективность в обработке большого объема медицинских данных, что позволяет ускорить процесс диагностики и повысить его точность.

##### C. Разработка числовой системы для мониторинга прогрессии заболевания

Современные методы диагностики и мониторинга онкологических заболеваний требуют как качественного, так и количественного подхода к анализу данных. Введение числовой системы для оценки прогрессии опухоли стандартизирует процесс диагностики, делая его более объективным. Это особенно актуально в условиях, когда необходимо отслеживать изменения состояния пациента на протяжении длительного времени. Использование количественных показателей для мониторинга опухолей может повысить точность диагностики до 85%, что подтверждает значимость внедрения таких систем в клиническую практику.

Разработка числовой системы для мониторинга прогрессии заболевания основывается на анализе данных, полученных с помощью МРТ-сканирования, и их интерпретации с использованием алгоритмов

машинного обучения. Например, алгоритм U-Net, впервые представленный в 2015 году, демонстрирует высокую точность при сегментации опухолей на МРТ-сканах, что делает его идеальным кандидатом для извлечения количественных показателей. Система должна учитывать такие параметры, как размер опухоли, её расположение и плотность тканей, что позволит создать универсальный индекс состояния пациента. Исследования 2020 года показали, что числовые модели, основанные на данных МРТ, могут предсказывать прогрессию опухоли с точностью до 90 %, что подтверждает их эффективность.

Применение числовой системы в клинической практике позволяет врачам принимать более обоснованные решения на основе объективных данных. Такие системы могут быть интегрированы в существующие медицинские платформы, что обеспечит их удобное использование. Например, числовые показатели могут использоваться для оценки эффективности терапии, определения стадии заболевания и прогноза его развития. Это особенно важно для пациентов с онкологическими заболеваниями, где своевременное и точное принятие решений может значительно повлиять на исход лечения.

## V. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ

Разработка нового метода анализа МРТ-изображений требует тщательной проработки нескольких ключевых этапов. Во-первых, необходимо определить цели и задачи метода, включая улучшение точности диагностики и мониторинга прогрессии опухолей. Затем следует этап проектирования алгоритма, который включает выбор подходящих моделей машинного обучения, в нашем случае U-Net, и их адаптацию к специфике медицинских изображений. После этого проводится обучение модели на данных, собранных из клинической практики. Из доступных воспользуемся выборкой BraTS2020, она содержит в себе уже проаннотированные профессиональными врачами маски опухоли. В нашем случае исключим из выборки файл t2se, он содержит контрастный МРТ-снимок, задача данной работы получение числовых данных без применения КТ. Данная выборка содержит формат снимков NIFTI, это 3D скан головного мозга, разбитый на слои. В 2021 году исследователи из Массачусетского технологического института показали, что такие модели могут повысить точность диагностики на 15 %, что подтверждает важность качественного этапа тестирования.

## VI. ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОВОГО МЕТОДА В ВЫЯВЛЕНИИ УПРАВЛЯЕМОГО РОСТА ОПУХОЛЕЙ

Новый метод идентификации управляемого роста опухолей с использованием МРТ-сканирования основывается на высокоточной визуализации тканей организма. Современные технологии функциональной МРТ не только фиксируют наличие опухоли, но и позволяют анализировать её активность и динамику роста. Это достигается благодаря способности МРТ выявлять минимальные изменения в структуре тканей, что делает возможным обнаружение опухолей размером до 1 мм. Такой подход существенно повышает точность диагностики, особенно на ранних стадиях заболевания, что критически важно для своевременного начала лечения. Кроме того, «с помощью МРТ можно

уменьшить общее количество необходимых для диагностики точек забора гистологического материала при увеличении точности биопсии простаты благодаря направленной инвазии в точно определенные участки простаты» [3]. Это подчеркивает значимость внедрения новых технологий для улучшения диагностических процедур и повышения эффективности лечения.

В отличие от традиционных методов диагностики, таких как рентгенографические исследования и УЗИ, МРТ-сканирование имеет ряд значительных преимуществ. Оно неинвазивно, что снижает риск осложнений и делает процедуру более безопасной для пациентов. Функциональная МРТ предоставляет информацию о метаболической активности опухоли, что невозможно при использовании традиционных методов, без применения позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Обладает аналогичными недостатками, характерными для КТ. Это позволяет не только выявлять наличие опухоли, но и оценивать её потенциальное развитие, что критически важно для определения стратегии лечения. Киселева в своей работе отмечает, что «после введения контрастного препарата неоднородность структуры опухоли увеличивается. На МРТ эти опухоли выглядят как слабо отграниченные от мозга образования, гетерогенные как на T1, так и на T2 изображениях» [6]. Таким образом, данный метод обеспечивает более глубокое и точное понимание состояния пациента.

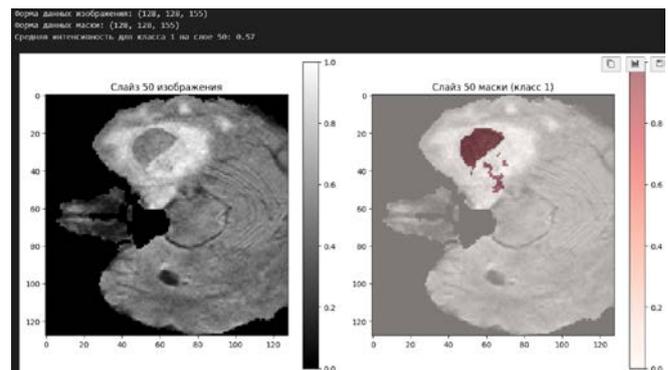


Рис. 2. Пример визуализации результата анализа среза МРТ-сканирования

## VII. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ

Перспективы применения нового метода идентификации управляемого роста опухолей с использованием МРТ-сканирования в клинической практике крайне обширны. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно диагностируется около 19,3 миллиона новых случаев онкологических заболеваний, что подчеркивает необходимость совершенствования методов диагностики и лечения. Внедрение современных технологий, таких как численная интерпретация МРТ, может существенно улучшить раннее выявление опухолей и мониторинг их роста. Это, в свою очередь, способствует своевременному принятию решений о лечении и повышению выживаемости пациентов. Численные данные в дальнейшем могут быть использованы для создания математических моделей прогнозирования и управления ростом опухоли. Кроме того, использование МРТ позволяет минимизировать инвазивные процедуры, что делает процесс диагностики более комфортным для

пациентов и снижает риски осложнений. Таким образом, дальнейшее развитие и интеграция МРТ-методов в клиническую практику являются важным направлением в онкологии.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была проанализирована роль МРТ-сканирования в диагностике и мониторинге управляемого роста опухолей при онкологических заболеваниях. Разработан метод численной интерпретации данных МРТ-снимков, для дальнейшего анализа и наблюдения развития опухоли. Этот метод снижает негативное воздействие КТ на пациентов и обеспечивает более целенаправленную терапию в зависимости от реакции опухоли и течения болезни.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаю благодарность доктору технических наук, профессору кафедры АПУ, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Сергею Евгеньевичу Душину за помощь в написании данной работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Айламазян Э.К., Щербук Ю.А., Ребекевша В.Г., Щербук А.Ю. Функция яичников у женщин после оперативного лечения аденом гипофиза // Оригинальные исследования. 2011. Т. LX, Вып. 2. С. 22–23.

[2] Араблинский А.В., Сдвижков А.М., Гетман А.Н., Панкина Н.В. Компьютерная и магнитно-резонансная томография в диагностике и оценке местной распространенности опухолей полости носа, придаточных пазух и верхней челюсти // Медицинская визуализация. 2002. № 3. С. 74.

[3] Ахвердиева Г.И., Санай Э.Б., Панов В.О., Губский И.Л., Тюрин И.Е., Долгушин Б.И., Матвеев В.Б., Камолов Б.Ш. Мультипараметрическая МРТ в диагностике рака предстательной железы // Российский электронный журнал радиологии. 2013. Том 3, № 4. С. 109–110.

[4] Древис Дж. VEGF и ангиогенез: значение в терапии рака молочной железы // Современная онкология. 2008. Т. 10, № 4. С. 32–33.

[5] Земляной В.П., Трофимова Т.Н., Непомнящая С.Л., Дементьева Т.В. Современные методы диагностики и оценки степени распространенности рака ободочной и прямой кишки // Практическая онкология. 2005. Т. 6, № 2. С. 71–72.

[6] Киселева А.Е. Опухоли головного мозга у детей (патоморфология, клиника, диагностика, лечение): учеб.-метод. пособие. Минск: БГМУ, 2008. 16 с.

[7] Кривенцова Н.А., Куприянов Д.А., Меньщиков П.Е., Терещенко Г.В. МР-биомаркер изменений костного мозга у детей с острым лимфобластным лейкозом // Russian Electronic Journal of Radiology. 2020. Т. 10, № 4. С. 159–168. DOI:10.21569/2222-7415-2020-10-4-159-168.

[8] Крючков И.А., Чехонацкая М.Л., Россоловский А.Н., Кондратьева О.А., Николенко В.Н., Чехонацкий А.А., Бобылев Д.А., Чураков А.А., Кондратьева Д.А. Сравнительный анализ данных компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии в выявлении метастатического поражения костей при почечно-клеточном раке // Russian Electronic Journal of Radiology. 2019. Т. 9, № 2. С. 130–132. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-130-132.

[9] Петровская Н.А., Возмитель М.А., Хоружик С.А., Истомин Ю.П. Мультимодальное лечение перитонеального канцероматоза в эксперименте // Онкологический журнал. 2011. т. 5, № 4. С. 60–68.

[10] Семенов И.И., Зайцев А.Н., Крживицкий П.И., Пономарева А.И. Методы диагностики и оценки степени распространения процесса при саркомах мягких тканей // Практическая онкология. 2013. Т. 14, № 2. С. 87–88.

# Разработка системы управления качеством электроэнергии на судне

И. А. Приходько

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: vanyanets@gmail.com

З. М. Абдуллаева

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

E-mail: zmabdullaeva@etu.ru

**Аннотация.** В работе исследуются различные подходы к повышению качества генерируемой на судне электроэнергии посредством комплексной координации систем электропривода и синхронной генерации, а также внедрения пассивных фильтров. Регулирование скорости асинхронного двигателя короткозамкнутого типа реализовано на основе скалярного U/f-управления, обеспечивающего поддержание постоянного магнитного потока. Для стабилизации напряжения судового генератора применена система автоматического возбуждения (AVR), позволяющая быстро и точно поддерживать его терминальное напряжение в заданных пределах.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, асинхронный генератор, U/f-управление, Matlab Simulink, фильтры

## I. ВВЕДЕНИЕ

Управление асинхронным двигателем короткозамкнутого типа выполнено по простому U/f-методу с PI-регулятором скорости, что позволяет сохранять постоянный магнитный поток и обеспечивать предсказуемое время разгона. В качестве развязки и демпфирования гармоник между генератором и преобразовательным блоком установлен трансформатор «звезда-треугольник», за которым последовательно подключены LC-фильтры и дроссели: они эффективно сглаживают пульсации выпрямленного и инвертированного напряжений. Для автоматического поддержания номинального уровня напряжения синхронного генератора применена система возбуждения (AVR) с тонко настроенными PI-коэффициентами, что обеспечивает быстрый отклик на изменение нагрузки и минимальные искажения в стационарном режиме. Такая архитектура, объединяющая скалярное управление машиной, фильтрацию и адаптивное возбуждение, гарантирует стабильность электрической сети судна как при штатной работе, так и при резких изменениях нагрузки.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Модель системы реализована в среде Simulink с привлечением компонентов из библиотеки Simscape Electrical. В её основе — блок Asynchronous Machine (pu-Units) для представления АД КЗ, управляемый при помощи блока PI Controller (Simulink → Discrete), реализующего скалярную стратегию U/f посредством Three-Phase Sine Wave Generator и PWM Generator. Между выходом генератора и выпрямителем размещён блок Three-Phase Transformer (звезда-треугольник), далее последовательно с дополнительными дросселями Series RLC Branch (реализация дросселей). Инверторная часть представлена блоком Universal Bridge для управления IGBT-мостом, за которым установлен второй LC-фильтр. Питание синхронного генератора моделируется блоком Synchronous Machine, снабжённым встроенным Excitation System (Specialized Power Systems → Machines → Excitation System), настроенным PI-регулятором возбуждения. Вся конфигурация объединена через Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter для перехода между физическими и управляющими сигналами.

## III. СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Сигнал создаваемый ГС представляет собой 3 синусоиды с разностью фаз в 120 градусов, с постепенно нарастающими частотой и амплитудой. Значение частоты умножается на коэффициент  $k = U_n / (U_{dc} * f_n)$ , где  $f_n$  — номинальная частота двигателя,  $U_n$  — номинальное напряжение двигателя,  $U_{dc}$  — значение напряжения на выходе выпрямителя. На рис 1 представлена структурная схема скалярного управления.

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $w(t)$  — значение скорости вращения ротора асинхронного двигателя,  $f(t)$  — номинальное значение скорости вращения, АРУ — автоматическое регулирующее устройство (в данном случае ПИ-регулятор), ФНЧ — фильтр нижних частот,  $k$  — коэффициент нарастания амплитуды, ГС — генератор сигнала,  $u(t)$  — опорный сигнал для ШИМ-генератора.

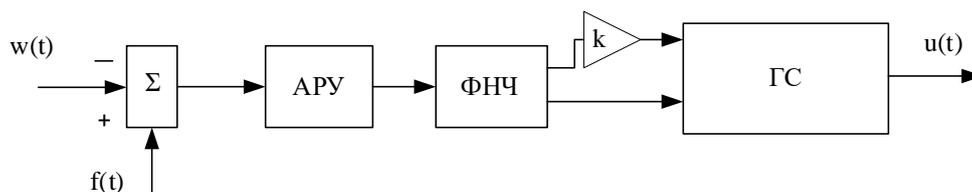


Рис. 1. Структурная схема скалярного управления

На рис. 2 приведена общая модель системы.

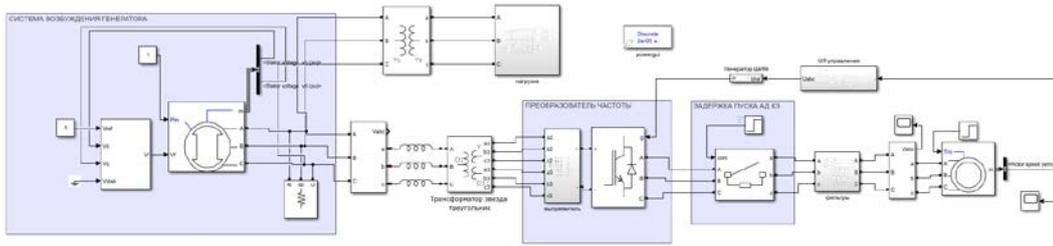


Рис. 2. Модель судовой системы

На рис. 3 представлена модель вторичных потребителей на судне.

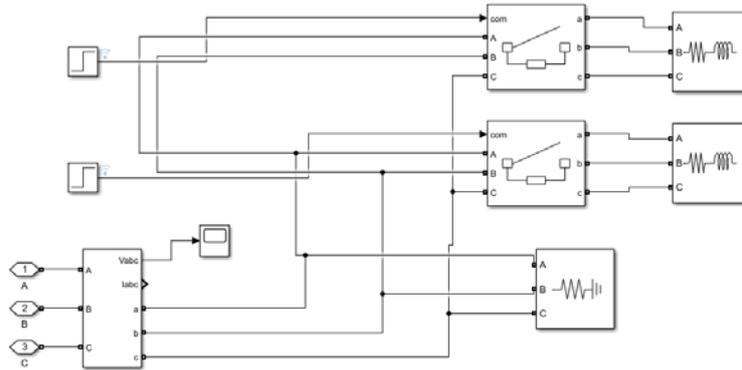


Рис. 3. Модель вторичных потребителей.

На рис. 4 представлен график скорости асинхронного двигателя.

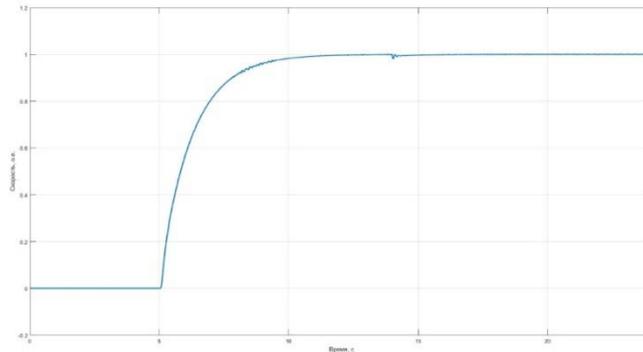


Рис. 4. График скорости асинхронного двигателя

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате моделирования подтверждена высокая эффективность предложенной структуры управления. При скалярном U/f-регулировании скорость асинхронного двигателя достигала заданного уровня 1 о.е., также после подключения момента сопротивления скорость вернулась на нужный уровень. Установленный трансформатор «звезда-треугольник» и последующие LC-фильтры с дросселями обеспечили сохранение синусоидальной формы напряжения генератора. Автоматическое регулирование возбуждения генератора (AVR) удерживало терминальное напряжение в номинальном при динамической нагрузке, что свидетельствует об устойчивости и точности работы всей энергосистемы судна. На рис. 5 приведен график напряжения на выходе генератора.

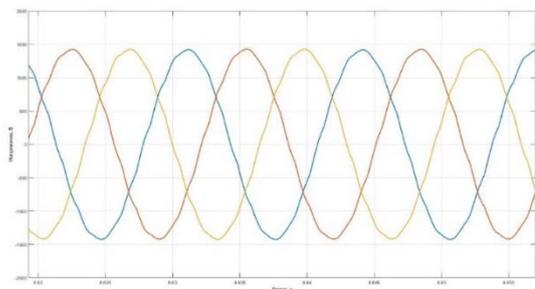


Рис. 5. График напряжения на выходе генератора после запуска двигателя

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчёт входного LC-фильтра производился на основе допустимого уровня пульсаций и характеристик нагрузки: при номинальном токе  $\approx 109$  А и допустимой

пульсации  $\Delta U \leq 2,5\%$  ( $\approx 27,5$  В) на частоте выпрямления 12-пульсного моста  $f_{rip}=600$  Гц ёмкость конденсатора определялась по формуле

$$C = \frac{I_n}{\Delta U * f_{rip}} \quad (1)$$

и составила около 1 050 нФ. Частота среза фильтра выбиралась на уровне  $f_c = \frac{f_{sw}}{10} = 135$  Гц, что позволяет эффективно ослаблять гармоники ШИМ при 1 350 Гц, а индуктивность рассчитывалась из соотношения

$$f_c = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}}, L \approx 1,3 \text{ мГн}. \quad (2)$$

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что предложенная многоуровневая структура управления, объединяющая скалярное U/f-регулирование асинхронного двигателя, PI-автомат возбуждения синхронного генератора и рассчитанные пассивные фильтры, позволяет обеспечить на судне требуемые показатели качества электроэнергии. Скорость привода стабилизируется в заданном диапазоне без значимых колебаний и с минимальным

перерегулированием, а форма и амплитуда синусоиды генератора сохраняются в пределах допусков (THD <8%). Комплексное применение трансформатора «звезда–треугольник», LC-фильтров и оптимизированных PI-контуров обеспечивает высокую устойчивость системы при переходных процессах и динамических изменениях нагрузки, что подтверждается результатами моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Агунов А.В. Методология и принципы построения систем управления параметрами качества электрической энергии в судовых электроэнергетических системах с нелинейными элементами: дис. ... д-ра техн. наук. / Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 2004 г.
- [2] Калачев Ю.Н., Александров А.Г. Преобразователи автономных источников электроэнергии (и их модели): практикум по моделированию систем автоматического регулирования. М.: ДМК Пресс, 2021. 80 с.
- [3] Романовский В.В., Бежик А.С. Методы повышения качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем // Электротехнические системы судов и кораблей: сб. статей. ФГБОУ ВО КГМТУ, 2021; 13, № 1. 87-101 с. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2021-13-1-87-101>

# Разработка системы управления судовым краном

К. Ф. Салихов, К. А. Порохненко, Д. Тарасова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

karim-salikhov@mail.ru, kaporokhnenko@etu.ru, danikniss@mail.ru

**Аннотация.** Для моделирования результата используется математическая модель судового крана с жесткой стрелой, которая описывает движение груза (подвеса), которая представлена в виде структурной схемы, созданной в программной среде имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** *судовой кран, система управления, нок стрелы*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Основная задача судовых кранов заключается в перемещении грузов в пространстве судна или в его окрестностях без применения физической силы человека, что существенно упрощает процессы загрузки и разгрузки судов и значительно их ускоряет.

Судовые краны можно классифицировать по различным признакам. По степени перемещения их можно разбить на две группы. Стационарные краны жестко закреплены в одном месте, следовательно радиус их действия ограничен, но при этом за счет фиксированного основания прочность конструкции выше, чем у передвижных кранов, которые имеют возможность перемещаться вдоль или поперек палубы и поэтому могут использоваться для разгрузки или погрузки грузов в разных частях судна. Передвижные краны часто оснащаются рельсовыми или колесными опорами.

По типу стрелы краны можно разделить на несколько категорий.

Существуют краны с жесткой стрелой. В них стрела выполнена из сварной конструкции балочного типа. Простота конструкции обеспечивает прочность и надежность, что подходит для работы с тяжелыми грузами

Другой вид кранов с телескопической стрелой. Стрела состоит из нескольких секций, которые выдвигаются и убираются с помощью гидроцилиндров. Очевидным преимуществом такой стрелы является возможность регулировки длины стрелы, что делает их универсальными. Такие краны широко применяются в контейнерных терминалах и для работы в ограниченном пространстве.

Также распространенный вид – это краны-манипуляторы. Тут стрела состоит из шарнирных секций, которые могут складываться и разворачиваться, а последняя часть стрелы может быть телескопической для покрытия большого радиуса действия.

Кроме того, существуют краны со складной стрелой. Стрела состоит из двух или более шарнирно соединенных частей и может только подниматься и опускаться. Это применяется в ситуациях, где требуется

компактное хранение стрелы (например, на небольших судах).

Для организации спуска и подъема водных транспортных средств существуют шлюп-балки, специализированные краны для спуска и подъема шлюпок.

Стрела фиксированной длины и конструкции, которая отличается простой конструкцией и надежностью в разных внештатных ситуациях.

Кроме того, бывают еще мостовые краны – это тип кранов, которые состоят из горизонтальной балки, которая перемещается вдоль поддерживающих рельсов и предназначена для подъема и перемещения грузов в пределах заданной рабочей зоны.

Такие краны широко применяются в различных отраслях, например, склады, грузовые терминалы, судостроительные заводы, а также для работы в больших производственных помещениях.

Подъем и опускание грузов осуществляются с помощью специального механизма, включающего в себя лебедку, барабан, трос и грузозахватное устройство.

Таким устройством бывает крюк, грейфер или магнитная платформа. Эти механизмы приводятся в действие электрическим или гидравлическим приводом, которые способны обеспечивать высокую точность и плавность работы.

Для того, чтобы стрела могла передвигаться вокруг вертикальной оси предусмотрена система поворота, которая также работает с помощью гидравлического или пневматического привода.

Существующие системы управления краном включают в себя пульт управления, датчики и обязательно элементы системы безопасности, которые обеспечивают безопасную эксплуатацию, а также способны предотвратить перегрузку системы. К таким элементам относят датчики положения стрелы, ограничители грузоподъемности.

Система управления, используя датчики и программные алгоритмы, последовательно выполняет цикл операций:

1. Захват контейнера с палубы или трюма.
2. Подъем груза с заданным ускорением для исключения рывков.
3. Перемещение стрелы крана к зоне разгрузки (например, на причал или на транспортный конвейер).
4. Опускание груза в строго заданное место.
5. Возврат стрелы в исходное положение для следующего контейнера.

Контроль перемещений и позиционирование осуществляется автоматически с использованием датчиков положения, камер и других средств контроля.

На рис. 1 представлена упрощенная модель судового крана, на которой указаны основные углы необходимые для описания движения подвешенного груза.

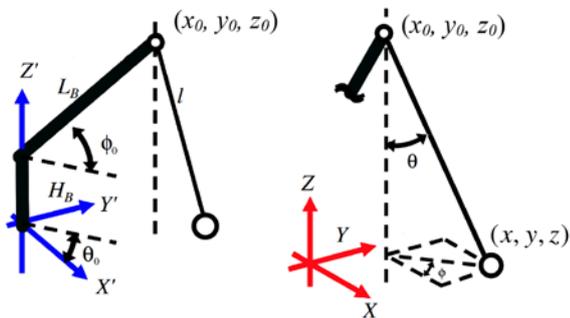


Рис. 1. Модель судового крана

Задачей управления для данного объекта является стабилизация груза относительно точки подвеса. Если рассматривать относительное положение точки подвеса и груза и их динамику, то целью управления можно назвать то состояние, когда координаты груза совпадают с координатами точки подвеса. Для достижения такого состояния кинематика подвеса должна быть как на рис. 2.

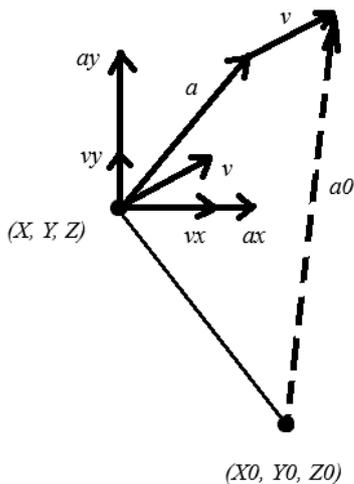


Рис. 2. Схема желаемой кинематики точки подвеса и груза

Для данного проекта в качестве основного управляющего действия был выбран ПЛК S7 1517-3 PN/DP. и программная среда TIA Portal V18.

На рис. 3 представлена конфигурация преобразователя частоты. Он состоит из 5 модулей. Первый и главный модуль – модуль управления C320. Этот модуль в отличие от его предшественника C310 способен одновременно управлять двигателями в количестве вплоть до 6 единиц. Это упрощает масштабируемость системы управления, что для выполнения данной работы очень полезно. Таким образом вместо трех модулей c310 для каждого из механизмов крана используется один модуль c320.

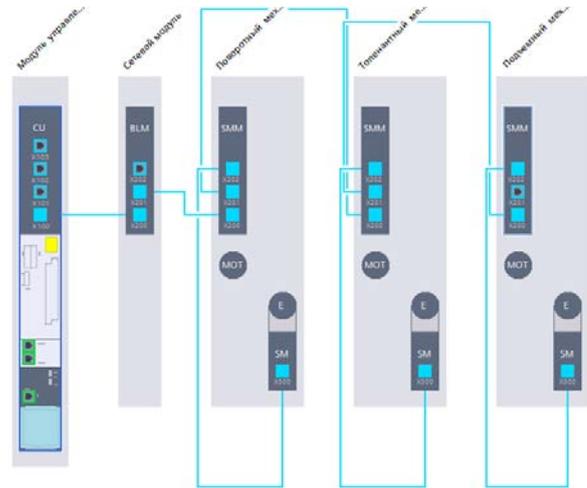


Рис. 3. Конфигурация преобразователя частоты

Следующий модуль – сетевой. В данном случае используется базовый линейный модуль формата Booksize. Количество портов DRIVE-CLiQ: 3. Основные характеристики: 20 кВт, 34.5 А, 3-х фазный переменный ток 380-480В, пассивное охлаждение. Для данной задачи не обязательно добавлять этот модуль в конфигурацию устройства в самой программе, но он был продемонстрирован для наглядности структуры.

Далее идут три модуля для управления двигателями всех механизмов. Они абсолютно идентичны, это тот же самый формат Booksize. Все модули одномоторные с 3 портами DRIVE-CLiQ. Основные характеристики: 4,8 кВт, 9 А, постоянный ток 510–720 В, внутреннее воздушное охлаждение.

Хотя модули двигателей одинаковы, механизмы выполняют разные задачи, поэтому характеристики двигателей должны соответствовать конкретным целям. В разрабатываемой системе есть три механизма: поворотный – обеспечивает вращение стрелы крана вокруг его основной оси, топенантный – осуществляет движение стрелы, и, наконец, подъемный – отвечает за поднятие и опускание груза. В зависимости от вероятных нагрузок были подобраны асинхронных двигателей с нужными параметрами.

Наибольшая нагрузка выпадает на топенантный механизм, в силу того, что ему требуется компенсировать вес и стрелы, и груза, поэтому для него был выбран асинхронный двигатель INNOMOTICS 1LE1 1LE1001-0EA42-2xGx мощностью 2.2 кВт и скоростью вращения 2890 об/мин. На нем установлен датчик температуры KTY84. Два оставшихся двигателя также принадлежат к формату 1LE1, поэтому далее будет упоминаться только серия модели.

Для подъемного механизма подойдет менее мощный представитель – 1LE1001-0EA02-2xFx мощностью 1.5 кВт, скоростью вращения 2885.00 об/мин и с тем же датчиком температуры.

Самый нетребовательный механизм в данном случае – поворотный. Это объясняется высоким редукторным числом – соотношение оборотов оси двигателя к оборотам главной оси крана может достигать 100 к 1, поэтому для такой задачи подходит 1LE1001-0DC22-2xFx мощностью 0.37 кВт и скоростью вращения 925 об/мин.

ПЛК, ПЧ и НМІ панель оператора общаются по протоколу Profinet, связи всех устройств продемонстрированы на рис. 4.

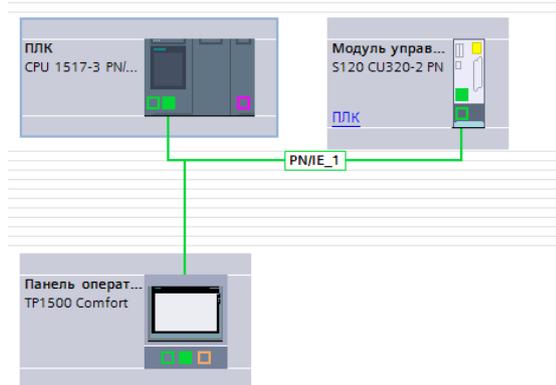


Рис. 4. Сеть Profinet

НМІ панель является так называемым пультом управления крана она представляет собой сенсорный экран с определенным набором кнопок, полей ввода и вывода и необходимой информацией. Интерфейс НМІ панели представлен на рис. 5.



Рис. 5. Панель НМІ

Для управления каждым двигателем в зависимости от механизма создается технологический объект в виде оси позиционирования.

Данный объект позволяет тщательно настроить взаимодействие программы и преобразователя частоты.

В первую очередь выбирается тип оси, перемещение нагрузки может быть линейным или вращательным.

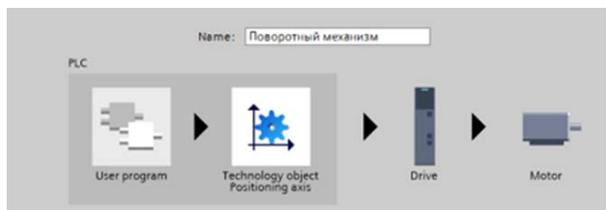


Рис. 6. Выбор типа оси

Далее идет самый важный этап настройки – информация о преобразователе частоты и двигателе. На рис. 7 видно, что для общения ПЛК и ПЧ, кроме того, ниже заносятся данные о характеристике двигателя, соответствующего настраиваемому механизму.

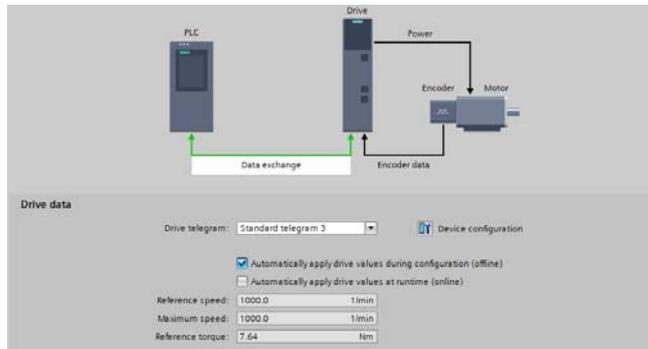


Рис. 7. Выбор типа общения и указание характеристик двигателя

Результат работы системы записывается в виде графиков положения.

Рис. 8 демонстрирует график работы первого автоматического режима. На графике поворотного механизма виден результат использования циклической системы координат, при которой одна или несколько координат являются углами с повторяющимся периодом, поворотного механизма (скачок с 0 до 360 градусов).

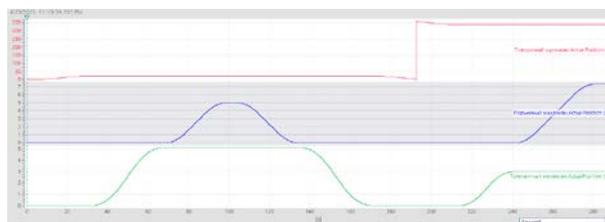


Рис. 8. Работа устройства при работе автоматического режима №1

Рис. 9 отражает графики работы второго автоматического режима.

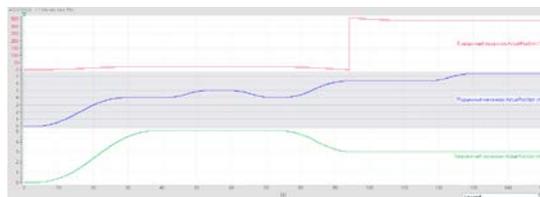


Рис. 9. Работа устройства при работе автоматического режима №2

Результаты моделирования демонстрируют изменение задействованной рабочей площади при работе в режиме №1, что позволяет применять такой режим работы в условиях различного рода препятствий при движении стрелы крана.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ПЛК в системе управления судовым краном обеспечило реализацию необходимых алгоритмов управления и дало возможность применить такую систему для устройства с необходимой грузоподъемностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вайсон А.М. Подъемные краны. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1988. 432 с.
- [2] Воробьев А.Ф. Электропривод судовых механизмов. Ленинград: Судостроение, 1984. 288 с.
- [3] Miskinis C. Explaining the Definition of Digital Twin and How It Works. <https://www.challenge.org/insights/what-is-digital-twin>, 2018.

# О мониторинге состояния воздуха в помещении

Н. И. Султанов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

sultanown@yandex.ru

**Аннотация.** Поддержание качества воздуха в производственных помещениях, закрытых паркингах и аналогичных объектах рассматривается как управляемый технологический процесс. Это позволяет применять методы теории управления для разработки систем автоматического управления загазованностью. В условиях ограниченной информации о состоянии объекта и малого разнообразия воздействий на объект управление, как правило, осуществляется на основе алгоритмов с четкой логикой. В статье представлена концептуальная модель системы.

**Ключевые слова:** качество воздуха; загазованность; автоматическое управление; мониторинг; система контроля; автоматизация

## I. ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМА МОНИТОРИНГА ЗАГАЗОВАННОСТИ ПОМЕЩЕНИЙ

Неотъемлемой частью обеспечения стабильной и эффективной работы любого вида промышленности является качество воздуха в рабочих и производственных помещениях. Качество воздуха напрямую влияет на обеспечение пожарной безопасности.

Особое внимание уделяется загазованности помещений объектов нефтегазовой отрасли, производственные объекты которой представляют собой комплексы технологических установок и сооружений с высокой концентрацией горючих веществ, материалов и оборудования. Аварии с пожарами и взрывами могут привести к катастрофическим последствиям, ликвидация которых может потребовать привлечения огромных сил и средств.

Важно обеспечить пожарную безопасность опасных и технически сложных производственных объектов, расположенных в удаленных районах. Одним из примеров является дистанционный мониторинг уровня загазованности компрессорных цехов магистральных газопроводов и боксов газоперекачивающих агрегатов. Следует заметить, что меры по снижению температуры воздуха в отсеках газотурбинных приводов центральных компрессоров путем вентиляции одновременно уменьшают и степень их загазованности.

Примерами, где важен автоматизированный контроль качества воздуха, являются системы мониторинга уровня загазованности подземных паркингов. В условиях работы двигателей внутреннего сгорания во время передвижения автомобилей по территории и прогрева после запуска возникают пары угарного газа и тяжелых металлов, что создает риски для здоровья человека. В закрытых паркингах датчики концентрации угарного газа (СО) устанавливаются на уровне дыхания человека. Детекторы загазованности имеют два порога срабатывания угарного газа. Первый порог 20 мг/м<sup>3</sup> – предельно-допустимая концентрация (ПДК) угарного

газа в течение рабочего дня. При достижении этой концентрации устройство включает световую сигнализацию. Второй порог – 100 мг/м<sup>3</sup> газа в течение 30 мин. Данная концентрация является опасной для жизни человека. Включается световая и звуковая сигнализация. Систему контроля загазованности интегрируют с системой вентиляции.

Значительный вклад в теорию и практику уменьшения недопустимой загазованности закрытых автостоянок внесли отечественные исследователи: А.М. Гримитлин, А.В. Свердлов, А.П. Волков [1]–[9], С.П. Калмыков, В.М. Есин [10]–[13], зарубежные исследователи: J. Vissnik, C. Voget [14] и многие другие.

К противоположному направлению мониторинга качества воздуха в помещениях относится создание искусственной «загазованности», относятся одоризация природного газа, поддержание технологий напыления в электронной промышленности, создание климата в помещениях, например, в медицинских целях и др.

Следует отметить, что многие публикации имеют описательный характер – это патенты на устройства, вопросы контроля и оповещения или рекламы фирм. Трудно назвать публикации, посвященные системному подходу к проблеме управления загазованностью помещений, моделям, методам анализа систем и синтеза алгоритмов управления.

Необходимо развивать теоретические основы автоматического управления загазованностью помещений.

## II. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

Широта распространения задач мониторинга загазованности качества воздуха в помещениях позволяют рассматривать эти объекты как особый управляемый технологический процесс поддержания качества воздуха (ТП КВ). Это создает предпосылки для применения методологии теории управления, математического моделирования, мощных методов и инструментов расчета и компьютерной имитации для разработки систем автоматического контроля и управления загазованностью помещений. Это позволяет использовать мощный арсенал методов и инструментов расчета и компьютерной имитации для разработки систем автоматического контроля и управления загазованностью помещений.

Система автоматического контроля загазованности (САКЗ) помещений – комплекс технических средств, направленных на обеспечение безопасности путем непрерывного мониторинга уровня концентрации опасных газов. САКЗ включает в себя датчики для обнаружения различных типов газов, устройства для обработки сигналов и системы оповещения, которые

активируются при превышении установленных пороговых значений. Применение САКЗ позволяет оперативно реагировать на возможные угрозы, снижая вероятность возникновения аварийных ситуаций и обеспечивая безопасность персонала и оборудования. Такие системы находят применение не только на производственных объектах, но и в других местах, где существует риск накопления опасных газов, например, в подземных паркингах, лабораториях и т. д.

Систему автоматического управления качеством воздуха в закрытом помещении иллюстрирует рис. 1. Источником загазованности помещения, например, подземного паркинга, являются случайные по времени и интенсивности выхлопы автомобилей. Загазованность паркинга должна поддерживаться не выше допустимого уровня.

Очевидно, ТП КВ как динамический объект устойчив. Управление (регулирование) необходимо для ослабления влияния возмущений на уровень загазованности. Управляющее воздействие – искусственное вентилирование воздуха.

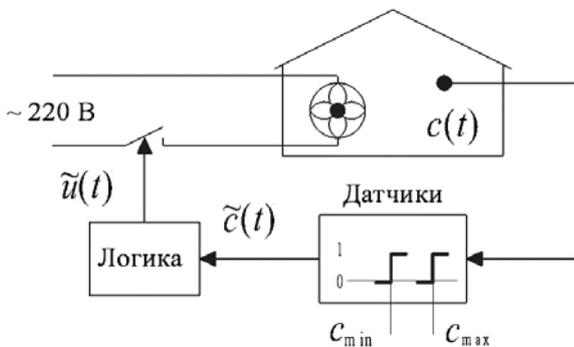


Рис. 1. Принципиальная схема системы управления качеством воздуха

Критерий выбора алгоритма управления (регулирования) – минимизация потребления электроэнергии на вентилирование при ограничении уровня загазованности. Загазованность подземного паркинга должна поддерживаться на допустимом уровне, но не ниже. Эта особенность требований учитывается при выборе (синтезе) алгоритма управления и заданного (целевого) значения загазованности.

Особенность управления загазованностью заключается в малой информации о состоянии объекта и малом разнообразии управляющих воздействий. На рис. 1 показано, что датчики загазованности  $c$  (информационная часть системы) сигнализируют о достижении пороговых значений  $c_1$  и  $c_2$ , выделяя три ситуации (события):  $c < c_{min}$ ;  $c_{min} \leq c \leq c_{max}$ ;  $c > c_{max}$ . Управляющее воздействие на объект  $u$  – напряжение на входе привода вентилятора (исполнительной части системы) принимает значения:  $u_1 = 0$  В и  $u_2 = 220$  В. Таким образом, входом и выходом объекта управления ТП КВ оказываются символы. В этих условиях контроллер реализует логические алгоритмы управления.

В силу малой определенности возмущений целесообразно принять принцип управления по следствию – принцип обратной связи. Концептуальная модель системы автоматического управления загазованностью на рис. 2 представлена в виде контура

причинно-следственной связи: собственно объекта управления ОУ (помещения, в котором поддерживается допустимая концентрация газа); измерительного элемента Д, исполнительного органа В – вентилятора и управляющего устройства УУ.

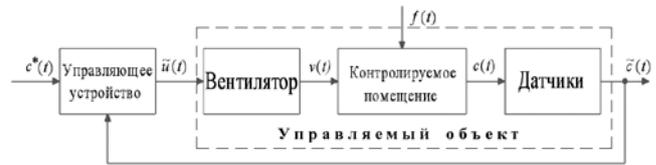


Рис. 2. Концептуальная модель САУКВ

Переменные системы:  $c(t)$  – управляемая переменная,  $f(t)$  – возмущение среды (утечки газа из различных источников),  $u(t)$  – управляющее воздействие,  $c^*(t)$  – заданное значение загазованности.

Расширенный объект – это последовательность ИМ (вентилятора с приводом), собственно ОУ (вентилируемое помещение) и ИЭ (Д). Таким образом, входом и выходом объекта управления ТП КВ оказываются символы. В этих условиях контроллер реализует логические алгоритмы управления [15].

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ САУ КВ

Методы теории автоматического управления базируются на математическом описании управляемого объекта, среды его функционирования и требований к процессам достижения цели.

Модели САУ КВ относятся к классу гибридных систем [16]–[18], так как в системе одновременно присутствуют непрерывные и дискретные по уровню сигналы. Наиболее распространенная модель гибридной системы с обратной связью Нероде–Кона [16] состоит из непрерывной части, описываемой дифференциальными уравнениями, и дискретной части в виде конечного автомата, которые взаимодействуют посредством интерфейса в виде аналого-символьного и символично-аналогового преобразователей (рис. 3).



Рис. 3. Гибридная модель Нероде–Кона

Математической моделью символического преобразователя является конечный автомат (КА). Автомат может находиться в конечном числе внутренних состояний. При изменении символа на входе автомат переходит в новое состояние, зависящее от исходного, а выходы принимают соответствующие значения.

Автомат задается пятеркой  $\langle S, \Upsilon, X, \delta, \lambda \rangle$ , где:  $S, \Upsilon, X$  – конечные множества состояний, выходов и входов автомата;  $\delta$  – функция переходов;  $\lambda$  – функция выходов.

Например, блок «Логика» на рис. 1 – это КА с входным алфавитом  $X = \{(0\ 0); (1\ 0); (1\ 1)\}$  из трех символов и выходным алфавитом  $Y = \{0; 1\}$  из двух символов. В случае единственного порогового датчика множество  $X = \{0; 1\}$ . Следовательно, информация о состоянии управляемого объекта (уровня загазованности помещения) минимальна (равна 1 бит). Единственный вентилятор с постоянной частотой вращения обеспечивает минимальное разнообразие управляющих воздействий  $Y = \{0\text{ («Выкл»)}; 1\text{ («Вкл»)}\}$ .

В силу малой информации о состоянии управляемого объекта и малого разнообразия воздействий, установившиеся режимы САУ КВ обычно оказываются автоколебательными. Увеличение числа сигнализаторов пороговых значений загазованности, а также числа вентиляторов, вообще говоря, создает условия для улучшения качества процессов – уменьшения смещения, амплитуды и частоты колебаний.

#### IV. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ САУ КВ

В гибридных системах, относящихся к существенно нелинейным, разнообразие движений много богаче, чем в линейных системах – отсутствие или, наоборот, множественность положений равновесия, автоколебания и др. Это ограничивает методы исследования – не применимы методы, базирующиеся на аналитическом решении уравнений.

Для анализа процессов в САУЗ по гибридным моделям используются численные методы. Однако методы компьютерной имитации дают конкретные процессы, пригодные для констатации конечных результатов анализа синтезированных систем. Синтез по ним обычно сводится к перебору.

Гибридную модель в форме Нероде–Кона для скалярных переменных предложено представить в виде релейной статической характеристики (СХ) [19]. Это позволяет применить для анализа процессов методы анализа, разработанные для релейных систем (см., например, [20], [21]) – метод фазовой плоскости (для непрерывной части второго порядка), и метод гармонического баланса – для приближенного исследования автоколебаний в случае систем высокого порядка. Релейные автоматические системы в разное время становились предметом изучения многих специалистов в области теории управления и регулирования в нашей стране и за рубежом.

Приближенный частотный метод гармонического баланса [21], [22] применим к системам высоких порядков, линейные части которых удовлетворяют гипотезам фильтра или резонанса.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поддержание качества воздуха в производственных помещениях, закрытых паркингах и аналогичных объектах рассматривается как управляемый технологический процесс. Это позволяет применять методы теории управления для разработки систем автоматического управления загазованностью. В условиях ограниченной информации о состоянии объекта и малого разнообразия воздействий на объект управление, как правило, осуществляется на основе алгоритмов с четкой логикой.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своему научному руководителю проф. Д.Х. Имаеву за постановку задачи и обсуждение подходов к ее решению. Автор глубоко признателен М.Ю. Шестопалову и Ю.А. Кораблеву за постоянное внимание и поддержку исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Свердлов А.В., Волков А.П. Анализ европейских и российских правил проектирования традиционных канальных систем противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа // АВОК Вентиляция. Отопление. Кондиционирование. 2017, № 6. С. 34–37.
- [2] Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Гордеева Э.А., Волков М.А. Проектирование систем противодымной вентиляции современных автостоянок закрытого типа с использованием математических моделей на основе числа Фруда // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2018 № 1 С. 47–56.
- [3] Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Волков М.А. Реверсивная струйная вентиляция и рекуперация как новое энергоэффективное проектное решение для крупных многоуровневых автостоянок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 1 С. 9–16.
- [4] Волков А.П., Свердлов А.В., Рыков С.В., Волков М.А. Фактор энергоэффективности при выборе параметров системы вентиляции автостоянки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2015 № 3 С. 27–36.
- [5] Волков А.П., Свердлов А.В., Рыков С.В. Экология и расчет воздухообмена подземных автостоянок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014 № 3 С. 9–16.
- [6] Вишневский Е.П., Волков А.П. Противодымная защита крытых и подземных автопарковок, оборудованные струйной (импульсной) вентиляцией // Мир строительства и недвижимости. 2012, № 44, С. 54–56.
- [7] Волков А.П., Гримитлин А.М., Рыков С.В. Методика расчета вентиляционной системы парковки закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2014 № 2 (15). С. 45–57.
- [8] Гримитлин А.М., Дацок Т.А., Денисихина Д.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
- [9] Свердлов А.В., Волков А.П., Рыков С.В., Климович М.В., Волков М.А. Расчетные методы проектирования продольных струйных систем вентиляции автостоянок закрытого типа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016, № 4. С. 23–32.
- [10] Калмыков С.П. Численное моделирование работы системы струйной вентиляции закрытой автостоянки // Пожаровзрывобезопасность. 2007 Т. 16 № 1 С. 58–63.
- [11] Есин В.М., Калмыков С.П. Обоснование основных параметров, обеспечивающих эффективную работу системы дымоудаления и вентиляции автостоянки закрытого типа при помощи струйных вентиляторов // Пожаровзрывобезопасность. 2007 Т. 16 № 3 С. 54–62.
- [12] Есин В.М., Калмыков С.П. Эффективность применения струйных вентиляторов для целей противодымной вентиляции автостоянок закрытого типа // Промышленное и гражданское строительство. 2008, № 5 С. 56–57.
- [13] Калмыков С.П. Моделирование процессов тепло- и массопереноса при работе системы струйной вентиляции автостоянок закрытого типа: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.26.03. М., 2008. 24 с.
- [14] Vissnik J, Voget C. Ventilation in underground garages. Experience of Germany // World of construction and real estate. 2012, No. 43. P. 58.
- [15] Петров Б.Н., Старикова М.В. Приближенное исследование колебательных процессов в автоматических системах с конечными автоматами // Автоматика и телемеханика. 1969. №8. С. 140–145.

- [16] Nerode A., Kohn W. Models for hybrid systems: Automata, topologies, stability // Hybrid Systems/ Editors R. L. Grossman et al. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 736. Berlin: Springer-Verlag, 1993. P. 317-356.
- [17] Branicky V.S., Borkar V.S., Mitter S.K. A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory // IEEE Trans. AC-43. 1998. No. 1. P. 31-45.
- [18] Antsaklis P.J., Stiver J. A., Lemmon M. Hybrid System Modeling and Autonomous Control Systems// Hybrid Systems/ Editors R.L. Grossman et al. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 736. Berlin: Springer-Verlag, 1993. P. 366-392.
- [19] Имаев Д.Х. Дискретные системы управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. 148 с.
- [20] Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. М.: Наука, 1974. 576 с.
- [21] Вавилов А.А. Частотные методы расчета нелинейных систем. Л.: Энергия, 1970. 324 с.
- [22] Теория автоматического управления: Учеб. для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев, Н.Н. Кузьмин, В.Б. Яковлев. Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высш. шк., 2009. 567 с.

# Разработка системы управления движением промышленного манипулятора

Е. Н. Ульянова, М. М. Копычев, К. А. Порохненко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

frodort@mail.ru, mmmkorichev@etu.ru, kaporokhnenko@etu.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается разработка системы, получающая информацию о фигуре с помощью технического зрения и управляющая траекторией движения схвата.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, промышленный манипулятор, система управления, траекторное движение схвата

## I. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Манипуляторы имеют множество применений в различных областях: медицине, автомобильной и химической промышленности, сельском хозяйстве и других. Они активно внедряются для автоматизации производств, могут работать в неблагоприятной для человека среде. Одной из самых актуальных является задача интеграции в роботизированные системы компьютерного зрения и машинного обучения, чтобы манипуляторы могли лучше реагировать на непредвиденные факторы.

Основным преимуществом использования роботизированных манипуляторов является снижение производственных затрат.

А основным недостатком можно назвать высокую стоимость, но это компенсируется увеличением количества выпускаемой продукции. Еще одним недостатком является необходимость получения услуг только от фирм-производителей, которые часто находятся за рубежом. Но в то же время такие манипуляторы отличаются высокой надежностью [9].

Первые роботы-манипуляторы появились в 1960-х годах и были одними из первых когда-либо созданных роботизированных устройств. В то время роботизированные манипуляции состояли из тщательно прописанных последовательностей движений, которые робот выполнял бы, не имея возможности адаптироваться к изменяющейся среде.

С течением времени роботы постепенно обрели способность автоматически генерировать последовательности движений, опираясь на искусственный интеллект и автоматизированное мышление. Роботы научились расставлять коробки в соответствии с размером, весом и другими параметрами, что выходит за рамки геометрических расчетов. Эта задача также требовала, чтобы роботы справлялись с ошибками и неопределенностью при измерении во время выполнения задания, учитывая, что малейшая неточность в расположении и ориентации сложных коробок может привести к обрушению всей башни [4].

Методы теории управления также сыграли важную роль в том, что позволили роботам справляться с

естественной неопределенностью окружающей среды, позволяя им адаптировать приложенную силу при контакте. Способность стабильно изменять усилие расширила возможности роботов по выполнению более сложных задач, таких как забивание колышков в отверстия или работа молотком. Однако ни одно из этих действий по-настоящему не демонстрировало возможности точной манипуляции руками, и они обычно выполнялись с помощью простых двухпалых захватов [4].

Динамика роботов-манипуляторов, как правило, нелинейна и сложна. Таким образом, традиционные контроллеры с линейной обратной связью и фиксированным коэффициентом усиления не способны эффективно управлять движениями многосуставных роботов-манипуляторов при различных требованиях к расстоянию, скорости и нагрузке.

В зависимости от сферы применения роботизированной системы требуются различные типы рабочих органов.

Для одной из самых распространенных операций, захвата, необходимы специальные для этого рабочие органы. Их так и называют, захваты или схваты. Скорость манипулирования, форма объекта, вес и другие характеристики являются важными факторами при выборе их типа.

Целью работы являлась разработка системы управления промышленным манипулятором с применением компьютерного зрения.

Объектом управления системы является рабочий орган промышленного манипулятора.

На рис. 1 представлена предполагаемая структурная схема для системы управления траекторным движением схвата промышленного манипулятора.

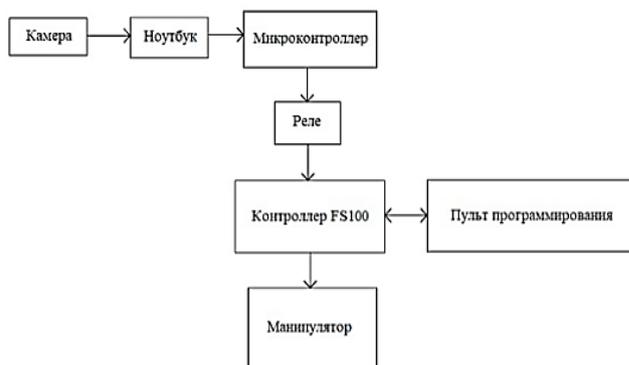


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы

Ноутбук выводит изображение с камеры на свой экран и распознает тип нарисованной на листе бумаги фигуры: в данном случае для удобства рассматриваются квадрат и круг. После этого данные передаются на плату с микроконтроллером, который управляет расширением с четырьмя электромеханическими реле. В блоке входов/выходов контроллера FS100 подается сигнал на соответствующий вход, и манипулятор выполняет один из записанных в него заранее набор инструкций. Пульт программирования используется для создания и модификации этих программ. В результате манипулятор рисует маркером на листе бумаги перед собой распознанную с камеры фигуру.

В целях удобства для распознавания круга и квадрата используется встроенная камера ноутбука. Программа для вывода изображения на экран написана на языке python, широко применяемом в разработке приложений, прикладном программном обеспечении, обработке больших данных и машинном обучении. В основном использовались две его библиотеки: библиотека алгоритмов компьютерного зрения с открытым кодом OpenCV (Open Source Computer Vision Library) и библиотека для работы с Serial-портом PySerial.

Функции OpenCV позволяют захватывать цветное изображение с камеры ноутбука, обрабатывать его и вычислять контуры фигуры для последующего определения ее типа.

Библиотека PySerial необходима для настройки параметров передачи данных по последовательному COM-порту (сокращенно от communications port), по-другому называемому Serial-порт, а также для самой отправки информации. Информация по этому интерфейсу передается бит за битом, в отличие от параллельного порта.

Данные между ноутбуком и платой микроконтроллера передаются с помощью кабеля USB (Type A – Type B). Расшифровывается как Universal Serial Bus – «универсальная последовательная шина» – другой последовательный интерфейс для подключения периферийных устройств к ноутбуку. Этим же кабелем обеспечивается и питание платы с микроконтроллером.

Ввиду удобства и доступности была выбрана плата Arduino Uno R3 с микроконтроллером ATmega328P, представленная на рис. 2. Напряжение питания платы – 5 В.



Рис. 2. Плата с микроконтроллером

Для согласования операций внутри микроконтроллера используются тактовые сигналы. Количество выполняемых в секунду тактов называется тактовой частотой, для ATmega328P она составляет 16 МГц.

Работа велась с 6-осевым манипулятором Yaskawa Motoman MH5LF.

Грузоподъемность этой модели составляет 5 кг, горизонтальная досягаемость 895 мм, а повторяемость и точностью при позиционировании 0,03 мм. Манипулятор считается компактным, может быть закреплен на полу, потолке или стене, оснащен тормозами на всех осях. Приблизительная масса робота – 29 килограмм.

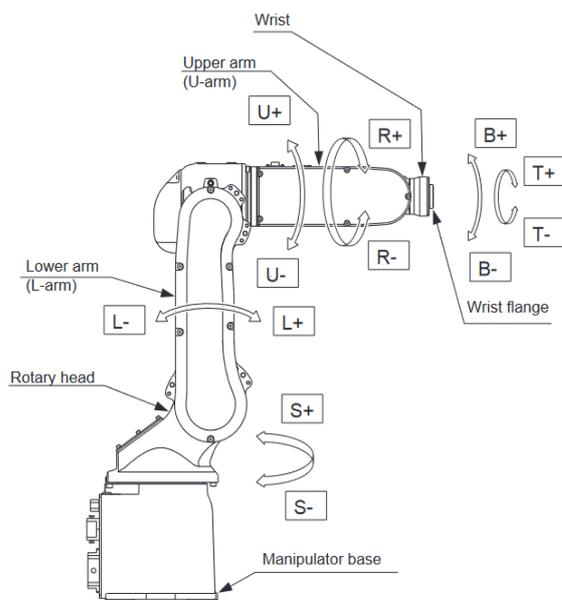


Рис. 3. Оси манипулятора

Для управления движением манипулятора используется шедший в комплекте с роботом контроллер Yaskawa FS100. Его операционная система многозадачная и не основана на Windows.

Параллельное управление вводом-выводом (Concurrent I/O control) – это функция управления вводом-выводом FS100 независимо от работы манипулятора (параллельно). Обработка операций робота и ввода-вывода могут выполняться одновременно.

Пульт программирования (Programming Pendant) оснащен сенсорным экраном.

С помощью пульта можно как просто передвигать манипулятор, так и создавать программы (jobs) для последующего воспроизведения.

Пульт автоматически запускается после включения контроллера. Для его соединения с блоком управления требуется нажать кнопку «Connect to FS100» на экране, после появления сообщения необходимо нажать «Enable Switch» на задней стороне пульта и отжать его при смене сообщения.

Пульт программирования и манипулятор должны быть подключены к контроллеру с помощью специальных кабелей, как показано на рис. 4.

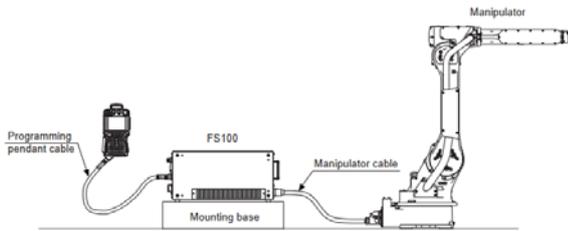


Рис. 4. Схема подключения

Для коммутации входов FS100 необходимо 24 В, а максимальное выходное напряжение платы Arduino Uno R3 составляет 5В. Поэтому между ними используется 4-канальная плата расширения Relay Shield с электромеханическими реле.

Реле используются для коммутации и переключения электрических цепей при заданных изменениях электрических или неэлектрических входных величин. Они нужны, когда необходимо управлять электрической цепью с помощью сигнала малой мощности или когда несколько цепей должны управляться одним сигналом.

К фланцу запястья манипулятора прикреплен держатель для маркера.

Удобство такой конструкции заключается в том, что для рисования фигур на бумаге могут использоваться обычные недорогие маркеры для доски, которые легко найти. Их легко заменить, например, после засыхания. Верхняя часть держателя соединена с нижней с помощью двух пружин, а также перемещается по направляющей. Такое устройство рабочего органа нужно для защиты стержня маркера от выдавливания.

С помощью функции cv2.VideoCapture библиотеки OpenCV захватывается изображение с камеры. В цикле while функция cap.read покадрово считывает изображения. Далее с помощью cv2.cvtColor кадр переводится в черно-белое изображение для последующей обработки.

Код для микроконтроллера написан на языке Си. Для принятия данных по протоколу UART используется его аппаратная реализация.

Передача начинается стартовым битом и заканчивается стоповым, данные передаются младшим битом вперед.

Приемник и передатчик должны быть настроены на одинаковую скорость передачи данных. Скорость измеряется в битах в секунду, по-другому – в бодах (Baud). В данном случае выбрана скорость в 19200 бод. Приемник информации – микроконтроллер, передатчик – ноутбук.

При тактовой частоте 16 МГц и скорости 19200 бод возможная ошибка скорости составляет 0.2%. Для задания такой скорости в микроконтроллере ATmega328P необходимо записать значение 51 в регистр UBRRn.

За передачу отвечает линия TXD, за прием – RXD. Два устройства связываются посредством прямого подключения ножки TXD одного устройства к ножке RXD другого и, наоборот, ножку RXD первого устройства соединяют с ножкой TXD второго. Таким образом, данные с выхода одного устройства попадают во вход другого.

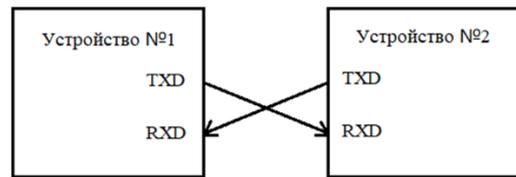


Рис. 5. Подключение двух устройств по протоколу UART

На экран ноутбука для удобства выводятся два изображения: оригинальное с выделенными цветом контурами и бинарное с границами. Контур, не отнесенный ни к кругу, ни к квадрату, выделяется зеленым. Круги – синим цветом, квадраты – красным.

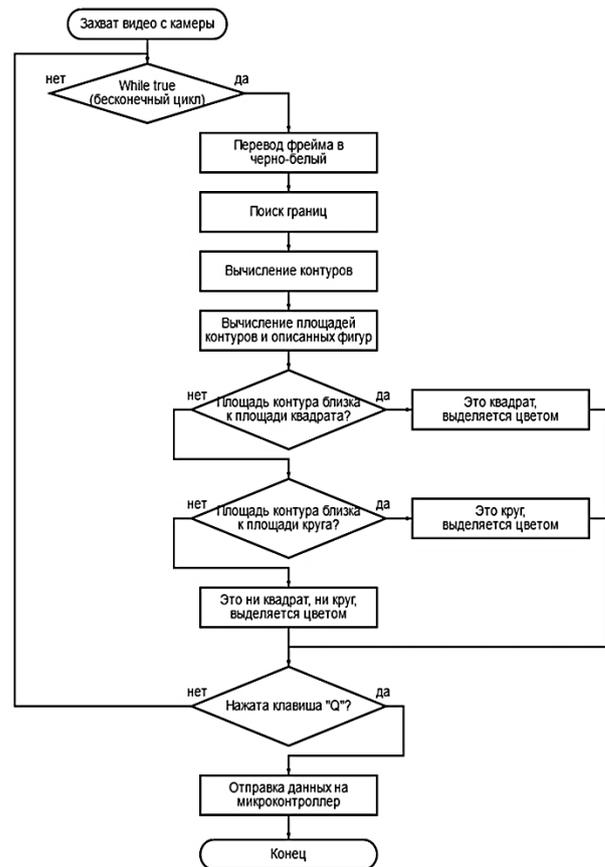


Рис. 6. Блок-схема программы по определению типа фигуры

При нажатии «Q» на клавиатуре заканчивается захват видео с камеры (cap.release) и закрываются окна на экране (cv2.destroyAllWindows).

Далее с помощью функций serial.Serial, ser.write и ser.close начинается передача данных по COM-порту на микроконтроллер.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определена структура создаваемой системы управления и выполнен подбор компонентов. Написаны программы для распознавания типа фигуры с помощью компьютерного зрения и передачи этой информации по протоколу UART. Робот-манипулятор рисует необходимую фигуру с помощью маркера на листе бумаги. В работе также рассмотрена экономическая составляющая.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Samadikhoshkho Z. Zareinia K. Janabi-Sharifi F. A Brief Review on Robotic Grippers Classifications // IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering, CCECE, Edmonton, 5-8 May 2019, с. 0–4. DOI:10.1109/CCECE.2019.8861780
- [2] Cubero S. Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control. М.: Advanced Robotic Systems International, 2007. 951 с.
- [3] Norberto Pires, J., Loureiro A., Godinho T., Ferreira P., Fernando B., Morgado J. Welding robots // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2003, С. 45–55.
- [4] Billard A., Kragic D. Trends and challenges in robot manipulation // Science. 2019, вып. 364 (6446). С. 1–8.

# Разработка системы стилистического анализа текстов на основе LLM

М. А. Харитонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

maestr0o.mario@yandex.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается система стилистического анализа текстов с применением больших языковых моделей (LLM). Такая система позволяет пользователям автоматизировать анализ текстовых источников на соответствие пользовательским критериям, что в свою очередь может быть полезно в широком круге задач, начиная от быстрого поиска или анализа настроений для маркетинговых исследований и заканчивая оптимизацией или фильтрацией контента в соответствии с предпочтениями. В условиях, когда объемы информации продолжают стремительно расти, ручной анализ становится неэффективным, что подтверждает востребованность разрабатываемой системы.

**Ключевые слова:** NLP, LLM, RAG, BERT, PEFT, LoRA, RSS, дообучение, нейронные сети, стилистический анализ

## I. АКТУАЛЬНОСТЬ

Стилистический анализ представляет собой часть возможных операций по анализу текста [8], основной из которых является его классификация по критериям. Такой анализ требует глубокого понимания характеристик текста, причем значимы не только статические параметры, такие как жанр или формат, но и динамические аспекты, включая изменение текста в зависимости от контекста. Без полного прочтения и изучения источников такая задача становится крайне трудоемкой.

Важно отметить, что такой анализ применим не только к одному виду текстов, но и к любым информационным источникам, будь то статьи на сайтах, сообщения в переписках или другие формы текстового контента. С увеличением объема данных возрастает и значимость анализа для практического применения. Однако возможности исследователей по обработке текстов остаются ограниченными, что делает ручной анализ неэффективным и ресурсозатратным.

В качестве решения предлагается система визуализации, трансформации и анализа информации на основе LLM. Такой подход позволяет значительно ускорить процесс обработки текстов, повысить точность анализа, снизить затраты на исследования и увеличить практическую ценность соответствующих методов, что особенно актуально в условиях растущего объема информации.

## II. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕКСТА

Перед тем как перейти к основным методам анализа текстов необходимо рассмотреть подготовку данных к машинному анализу. Преобразование текста является ключевым этапом в NLP (Natural Language Processing) и включает в себя ряд методов и подходов, направленных

на приведение текстовых данных к формату, пригодному для дальнейшего анализа и обработки.

Несмотря на многочисленность методов преобразования текста, основными в системе, прежде всего, являются векторизация и токенизация.

### A. Векторизация текста (Embedding)

Векторизация (рис. 1, [5]) позволяет определить семантическую близость между конкретными единицами текстов (словами, предложениями и т.д.). Для этого части текста преобразуются в числовой формат при помощи методов, таких как Bag of Words (BoW), TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) или современных подходов на основе word2vec, GloVe и BERT. Эти и другие методы позволяют представить текст в виде числовых векторов, сохраняя его семантические и синтаксические особенности.

### B. Токенизация

Токенизация является процессом разбиения текста на отдельные элементы, такие как слова, предложения или символы. Этот этап является основополагающим при работе с LLM, так как дальнейшая обработка текста зависит от корректного выделения его структурных единиц. Она реализует обратную совместимость слов различных языков с LLM. Токенами также ограничивается размер входных и выходных данных.

## III. БОЛЬШИЕ ЯЗЫКОВЫЕ МОДЕЛИ (LLM)

В отличие от классических методов вроде наивного байесовского классификатора [1], которые либо не учитывают контекст в тексте вообще, либо используют только его малую часть без семантической связи между отдельными словами, LLM получают гораздо большую информацию о контексте.

Основное нововведение, которое позволяет им эффективнее обрабатывать информацию, состоит в дополнении своей структуры трансформерами (transformers) и связанными с ними механизмами внимания (attention) [2].



Рис. 1. Двухмерная проекция векторизаций для слов и фраз на английском языке.

Также, с использованием нейронных сетей, такие модели позволяют обучаться на больших объёмах данных и используют так называемый процесс предобучения (pretraining), благодаря которому могут получать знания о внешнем мире, прежде чем обучаться решать конкретные задачи.

### III. ДООБУЧЕНИЕ

Предобученную LLM можно настроить для решения конкретной задачи с помощью дообучения (рис. 2, [5]). В нашем случае – это генерация по запросу ответов в формате JSON со следующими полями:

- Предсказанный класс.
- Пары ключ-значений слов/словосочетаний, принадлежащих некоторому классу.
- Пары ключ-значения предсказаний вероятности класса (значения от 0 до 1 для каждого класса, в сумме дающие 1).

Для задач, где желательна экономия памяти и вычислительных ресурсов, но при этом необходима гибкость и производительность лучше всего подходят методы эффективного дообучения (PEFT, Parameter-Efficient Fine-Tuning): Prompt Tuning [4] и LoRA (Low-rank adaptation) [5].

Преимуществом LoRA является наибольшая эффективность по сравнению с другими методами в обмен на достаточный объём данных, а Prompt Tuning не влияет на веса модели, но позволяет заранее «подсказать» LLM, каким должен быть ответ на запрос, уменьшая зависимость от предобучения и дообучения весовых коэффициентов.

Благодаря использованию формата JSON, ответы не ограничены приведённой формой и могут гибко подстраиваться под различные условия, однако тогда могут потребоваться дополнительные усилия по дообучению модели, либо модель должна обладать достаточной точностью в zero-shot/few-shot сценариях [3], чему способствует RAG (Retrieval Augmented Generation) [5].

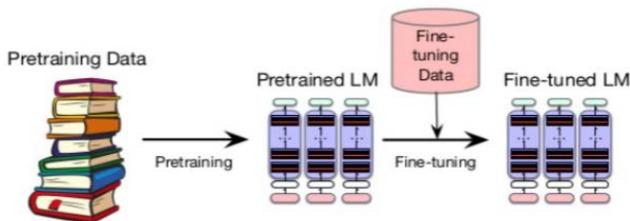


Рис. 2. Связь предобучения с дообучением

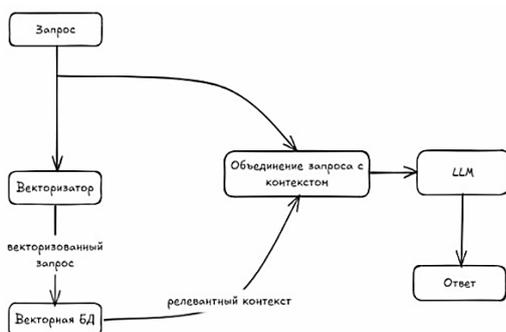


Рис. 3. Принцип работы RAG

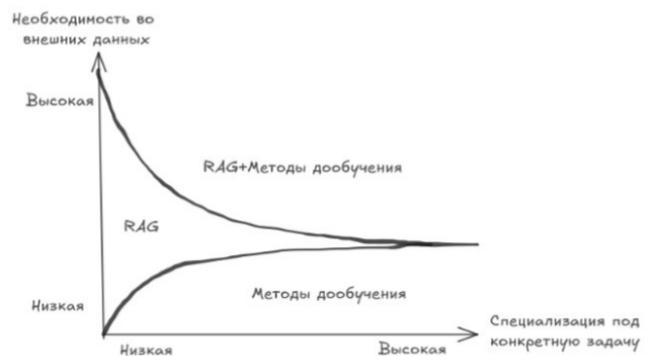


Рис. 4. Использование RAG и дообучения

### IV. ПРИМЕНЕНИЕ RAG И ГИБРИДНЫЙ ПОДХОД

RAG — это гибридная архитектура, которая сочетает в себе методы извлечения информации и генерации текста. Она была предложена для улучшения качества генерации текста за счёт использования внешних источников данных, и по сути является развитием метода Prompt Tuning.

#### A. Принцип работы RAG

На рис. 3 показан принцип работы RAG и состоит из следующих этапов:

- Переданный запрос подается векторизатору.

В качестве векторизатора для системы был выбран bert-base-multilingual-cased. Он работает со 104 языками с достаточной точностью и при этом показывает лучшую скорость работы по сравнению с некоторыми из выбранных моделей с высокой точностью по рейтингу MTEB [7].

ТАБЛИЦА I.

Модель-кандидат	Время обработки (с)
sentence-transformers/paraphrase-mpnet-base-v2	4.98 ± 0.00
nomic-ai/nomic-embed-text-v1.5	3.32 ± 0.00
google-bert/bert-multilingual-cased	0.87 ± 0.01

*Методика тестирования:* командой оболочки Python `%%timeit -r 4` запускались ячейки с приведёнными моделями, которые 4 раза запускали обработку 4 небольших предложений, после чего возвращались усреднённые значения.

- Обработчик контекста (векторизатор и векторная БД) находит наиболее релевантные документы или фрагменты текста с помощью некоторой меры близости с запросом. Наиболее популярной мерой является косинусное сходство между векторами запроса и контекста:

$$\begin{aligned} \text{similarity} = \cos(\theta) &= \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}} \end{aligned}$$

- LLM использует контекст вместе с информацией о запросе для генерации ответа.

#### B. Гибридный подход

Важно отметить, что из-за необходимости во внешних данных для получения контекста и специализации под задачу ответов для анализа в строго

заданном формате, имеет смысл использовать гибридный подход (рис. 4).

Для анализа источников по определённым категориям можно выполнить запрос к векторной базе данных для поиска соответствующих материалов (например, пары запрос-ответ), а затем передать найденные данные языковой модели для дальнейшей обработки и генерации аналитических выводов. Так у модели будет больше информации, чтобы дать релевантный ответ, соответствующий ожиданиям. Однако стоит учитывать и большую ресурсоёмкость такого запроса, поэтому желательно, чтобы модель уже обладала достаточными знаниями о мире.

Результаты такой обработки впоследствии получают обратную связь от пользователей посредством разметки данных через веб-интерфейс приложения (рис. 5).

Таким образом, можно одновременно получать внешнюю оценку качества результатов модели (по соотношению размеченных/не требующих разметки данных), и на основе результатов с меткой `labeled=True` дообучать не всю модель, а лишь часть, определённую в LoRA-адаптерах, причем такие адаптеры аддитивны к весам основной модели (рис. 6, [6]), что делает систему более гибкой для подстраивания к новым требованиям.

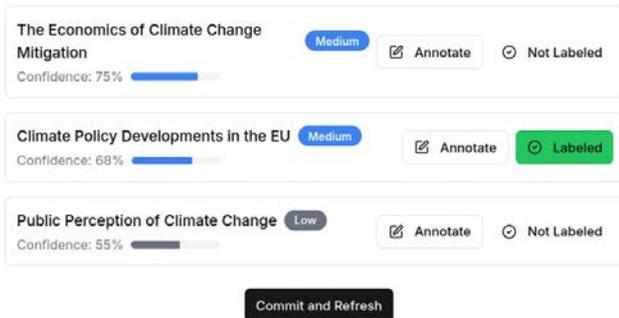


Рис. 5. Интерфейс разметки ответов модели

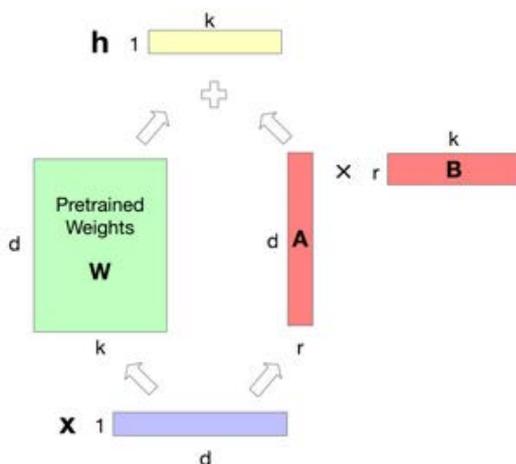


Рис. 6. Принцип работы LoRA

## V. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Рассмотрим компоненты архитектуры системы и выполняемые ими задачи.

Так как система нацелена на анализ пользовательских источников, основными компонентами в ней являются краулер (поисковой робот), обработчик документов, API языковой модели и база данных.

- Краулер (поисковой робот) – осуществляет поиск, извлечение и обновление данных с конкретных веб-страниц или RSS-фидов (Rich Site Summary), передавая их в БД.
- Обработчик документов – загружает, анализирует и структурирует текстовую информацию из файлов пользователей (.txt, .docx, .pdf).
- API модели – предоставляет интерфейс для вызова языковой модели из БД артефактов и выполнения анализа текстов.
- База данных – не только хранит все данные об источниках и пользователях, но и реализует тип Vector (расширение pgvector для PostgreSQL) для хранения результатов обработки векторизатором, что позволяет реализовать RAG.

Чтобы поддерживать оптимальную и согласованную работу анализа источников, в систему также входят вспомогательные компоненты, среди которых:

- Оркестратор – планирует и запускает процессы сбора данных, их разметки, анализа и вызова модели, обеспечивая синхронизацию компонентов системы.
- Система дообучения модели и БД артефактов моделей – представляет собой связку из HuggingFace (библиотеки Transformers, Datasets, PEFT) и MLflow. Такая связка позволяет проводить мониторинг обучения, версионирование и хранение моделей с возможностью последующего дообучения.
- Модуль разметки – позволяет пользователям вручную размечать данные, сохраняя результаты для последующего дообучения модели.

На рис. 7 зеленым фоном отмечены архитектурные шаблоны, использованные в системе. На основе карты позиционирования можно оценить объем проделанной работы, так и рассмотреть потенциальные возможности для развития системы.



Рис. 7. Карта позиционирования архитектурных шаблонов систем на основе LLM

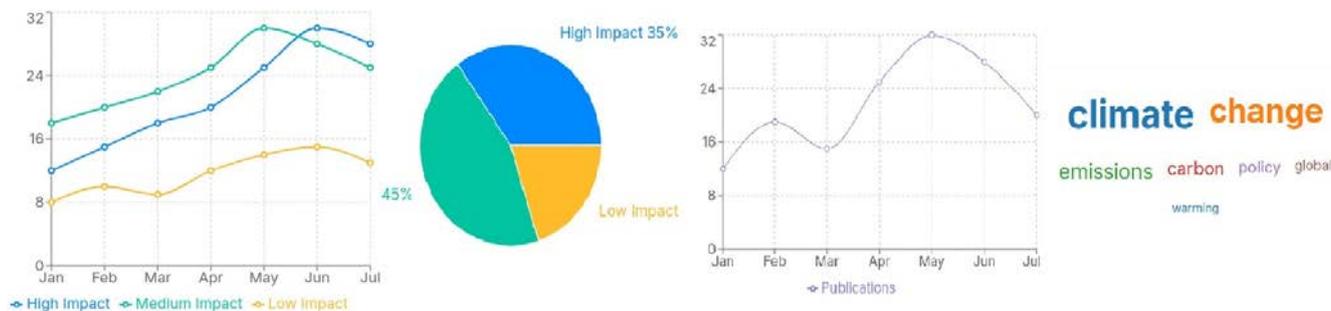


Рис. 8. Страница результатов анализа. Раздел визуализаций

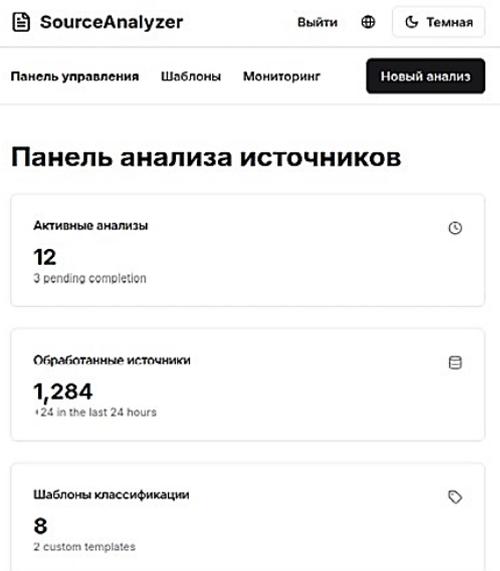


Рис. 9. Главная страница приложения

## VI. ВЕБ-ИНТЕРФЕЙС

Система обладает интуитивным интерфейсом с адаптивным дизайном в тёмном и светлых исполнениях на русском и английском языках. На рис. 9 представлена белая тема главной страницы приложения в формате для небольших экранов. На ней представлена актуальная информация по действующим анализам. С этой страницы пользователь может перейти на страницу создания нового анализа, страницу «Шаблоны» и страницу «Мониторинг».

Самой важной страницей является «Результат анализа», на которую пользователь попадает при нажатии на любой из действующих анализов страницы «Мониторинг». На ней пользователь может переходить между следующими разделами:

- Раздел «Визуализация» (рис. 8) с графиком динамики пользовательских категорий, круговой диаграммой процентного распределения категорий, графиком числа публикаций и облаком слов источников.
- Раздел «Источники», где по уровню выраженности категорий ранжируются источники, принимавшие участие в анализе.

Источник можно найти через форму поиска и изучить, перейдя по ссылке.

- Раздел «Разметка данных» (рис. 5), где пользователь, нажав на кнопку «Разметить» может заниматься разметкой данных через интерфейс модального окна. В этом окне предложение разделяется на слова и каждому слову можно назначить его категорию.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система стилистического анализа на базе LLM отвечает вызовам современного информационного перенасыщения, позволяя автоматизировать обработку больших объёмов текстов с высокой эффективностью. Интеграция современных методов дообучения и RAG одновременно с использованием мониторинга LLM и оркестрации делает её мощным и гибким инструментом для решения практических задач. Также важно отметить большие возможности для дальнейшего развития такой системы со стороны улучшения пользовательского опыта и дальнейших экспериментов с методами по улучшению как качества ответов LLM, так и функциональности самой системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rish I. et al. An empirical study of the naive Bayes classifier // IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence. 2001. T. 3. №. 22. С. 41-46.
- [2] Vaswani A. Attention is all you need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. arXiv:1706.03762 [cs.CL]
- [3] Rahman S., Khan S., Porikli F. A unified approach for conventional zero-shot, generalized zero-shot, and few-shot learning // IEEE Transactions on Image Processing. 2018. T. 27. №. 11. С. 5652-5667.
- [4] Schick T., Schütze H. Exploiting cloze questions for few shot text classification and natural language inference // arXiv preprint arXiv:2001.07676. 2020.
- [5] Lewis P. et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks // Advances in neural information processing systems. 2020. T. 33. С. 9459-9474.
- [6] Daniel Jurafsky, James H. Martin. Speech and Language Processing. 3rd ed. Stanford 2025. 599 p.
- [7] Hugging Face. MTEB: Massive Text Embedding Benchmark [Электронный ресурс] // Hugging Face Blog. 2023. URL: <https://huggingface.co/blog/mteb> (дата обращения: 15.03.2025)
- [8] Чернышова Т.В. Стилистический анализ как основа лингвистической экспертизы конфликтного текста // Юрислингвистика. 2000. No. 2. С. 207-214.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Сравнение процессов биологической очистки сточных вод в моделях ASM1 и ASM2</i> А. В. Андреев (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	3
<i>Системы автоматического регулирования возбуждения судового синхронного генератора с внешней форсировкой</i> А. Д. Вдовин, З. М. Абдуллаева (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	7
<i>Методика прогнозирования временных рядов с регулярным переобучением модели ARIMAX</i> М. А. Гореликов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), В. А. Востров (Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, АО «НПФ «Сургутнефтегаз») .....	10
<i>Применение технологий машинного обучения для классификации музыки по эмоциям</i> М. К. Иванова .....	14
<i>Разработка библиотеки парсера для языка LibSL на языке C++</i> Н. М. Ларионов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	18
<i>Исследование процессов диагностики электропривода насосного агрегата по перекачке конденсата газового нестабильного</i> А. С. Мысик (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	20
<i>Использование МРТ-сканирования для идентификации управляемого роста опухоли при онкологическом заболевании</i> Д. А. Прахов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	24
<i>Разработка системы управления качеством электроэнергии на судне</i> И. А. Приходько, З. М. Абдуллаева (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	28
<i>Разработка системы управления судовым краном</i> К. Ф. Салихов, К. А. Порохненко, Д. Тарасова (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	31
<i>О мониторинге состояния воздуха в помещении</i> Н. И. Султанов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	34
<i>Разработка системы управления движением промышленного манипулятора</i> Е. Н. Ульянова, М. М. Копычев, К. А. Порохненко (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	38
<i>Разработка системы стилистического анализа текстов на основе LLM</i> М. А. Харитонов (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	42

---

Молодежная школа-семинар по проблемам управления  
в технических системах имени А. А. Вавилова

28 мая 2025

Санкт-Петербург

**WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU**

Кафедра автоматки и процессов управления  
197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, лит. Ф, корп.1, пом. 1204  
+7 812 234-37-98 Shestopalov\_08@mail.ru

