

ВЫДЕЛЕНИЕ ТРЕНДА ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ОРТОГОНАЛЬНО-БАЗИСНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ПРОЕКЦИОННОГО АЛГОРИТМА

Аверкина Д.А.¹, Беляускене Е.А.², Глазырин А.С.³

Научный руководитель: Боловин Е.В.⁴

¹ НИ ТПУ, ИШЭ, 5A17, daa43@tpu.ru

² НИ ТПУ, ИЯТШ, ст. преподаватель, eam@tpu.ru

³ НИ ТПУ, ИШЭ, профессор, д.т.н., asglazyrin@tpu.ru

⁴ НИ ТПУ, ИШЭ, доцент, к.т.н., orange@tpu.ru

Аннотация

Статья посвящена проблеме выделения тренда полезного сигнала в динамических системах. Решение, основанное на применении ортогонально-базисной регрессии с использованием проекционного алгоритма, успешно апробировано на зашумлённой модели объекта первого порядка.

Ключевые слова: выделение тренда полезного сигнала, метод наименьших квадратов, метод Качмажа, ортогонально-базисная регрессионная модель.

Введение

В моделировании любого технологического процесса, использующего электропривод, ключевую роль играет выделение тренда полезного сигнала. Сигналы, поступающие от датчиков тока, напряжения, мощности, скорости и других (в зависимости от специфики процесса), служат основой для создания систем идентификации параметров двигателей, управления электроприводом, прогнозирования потребления электроэнергии и диагностики состояния как отдельных компонентов, так и всего процесса в целом. Важно учитывать, что точность данных, получаемых от датчиков, ограничена, и зачастую полностью устранить стационарные и импульсные помехи в измерительной системе не представляется возможным [1,2]. Именно эти факторы обуславливают необходимость выделения тренда полезного сигнала на основе данных, полученных от датчиков и прочих измерительных устройств.

Основная часть

Построение ортогонально-базисной регрессионной модели. При разработке метода выделения тренда полезного сигнала необходимо руководствоваться следующими принципами:

1. Метод должен быть максимально простой в реализации, чтобы его можно было воссоздать на основе микропроцессов любой вычислительной мощности.
2. Полученный тренд не должен иметь фазового сдвига относительно реального сигнала.
3. Полученный тренд не должен иметь амплитудного ослабления или усиления относительно реального сигнала.
4. Метод должен иметь точность выделения тренда допустимую в инженерной практике.
5. Метод должен позволять получать аналитическую математическую запись сигнала, тем самым позволяя кроме выделения тренда получать и производные и/или интегралы от сигнала, что необходимо при построении и работы систем идентификации, диагностики, прогнозирования.

При этом необходимо понимать, что большинство электроустановок работают от трехфазной сети, в которой происходит передача и преобразование переменного тока и/или напряжения. Эта априорная дополнительная информация об объекте может быть использована при разработке математической модели выделения полезного тренда. На основании вышесказанного был разработан метод, построенный на объясняющей

ортогонально-базисной регрессионной модели [1], реализованной на тригонометрическом многочлене первой степени:

$$F(t, A1, A2) = A1 \sin(\omega t) + A2 \cos(\omega t), \quad (1)$$

где $F(t, A1, A2)$ – объясняющая модель, t – время, $A1$ и $A2$ – неизвестные коэффициенты (параметры модели), ω – частота рассматриваемого сигнала.

Подбор параметров $A1$ и $A2$ объясняющей модели осуществляется так, чтобы минимизировать сумму квадратов отклонений объясняющей модели от экспериментальных входных данных

$$S(A1, A2) = \sqrt{(F(t_i, A1, A2) - Ishum1_i)^2},$$

где $Ishum1$ – экспериментальные входные данные, i – текущая итерация процесса выделения тренда. При этом использовался метод Качмажа, так как он имеет ряд преимуществ, самые важные из которых – это сходимость итерационного процесса при любом начальном условии.

Результаты

Для апробации метода и анализа его эффективности была построена математическая модель RC -цепочки и получены в аналитическом виде переходные процессы тока и напряжения (рис. 1). Данные модели имеют следующие параметры: активное сопротивление $R = 10$ Ом, индуктивность $C = 0.0001$ Ф, входное напряжение, подаваемое на RC -цепочку $U(t) = U_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$, где $U_{\max} = 10$ В – амплитудное значение входного напряжения, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, $f = 50$ Гц – частота входного напряжения. На переходный процесс тока был наложен 10-процентный «белый» шум [1] (рис. 2). Выбор такого уровня шума обусловлен данными приведенными в [4, 5]. Задачей является выделение тренда из такого зашумленного сигнала.

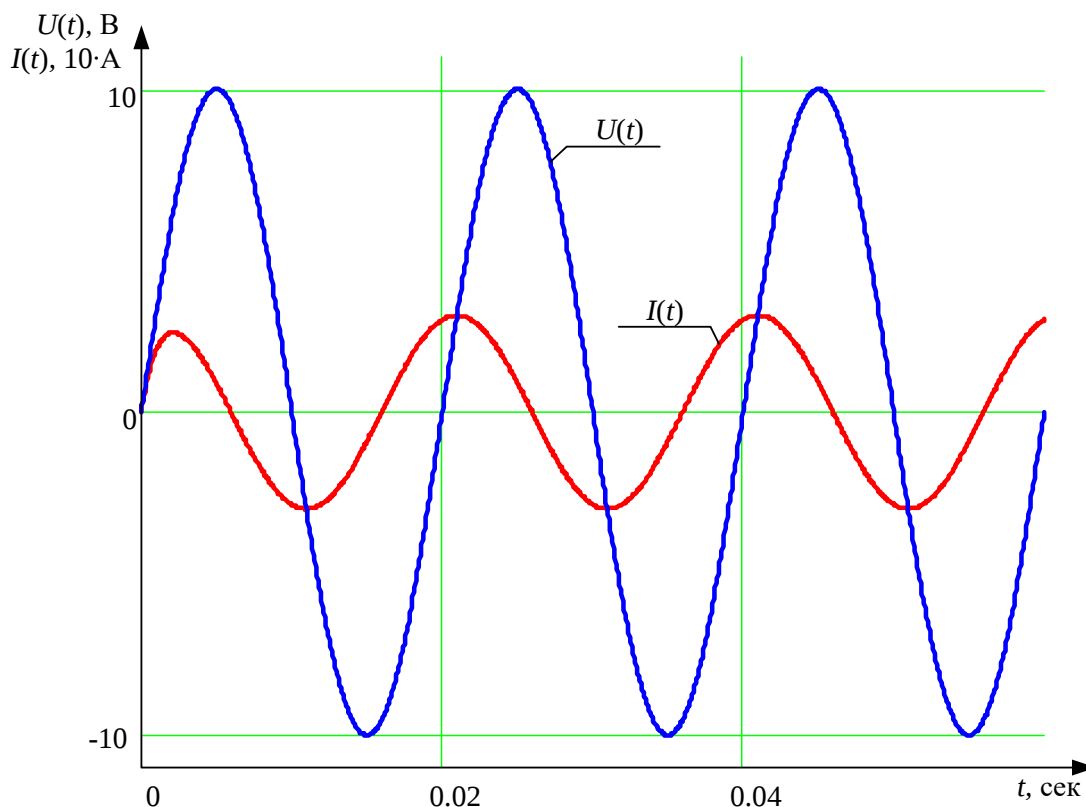


Рис. 1. Переходные процессы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ протекающим в RC -цепочке

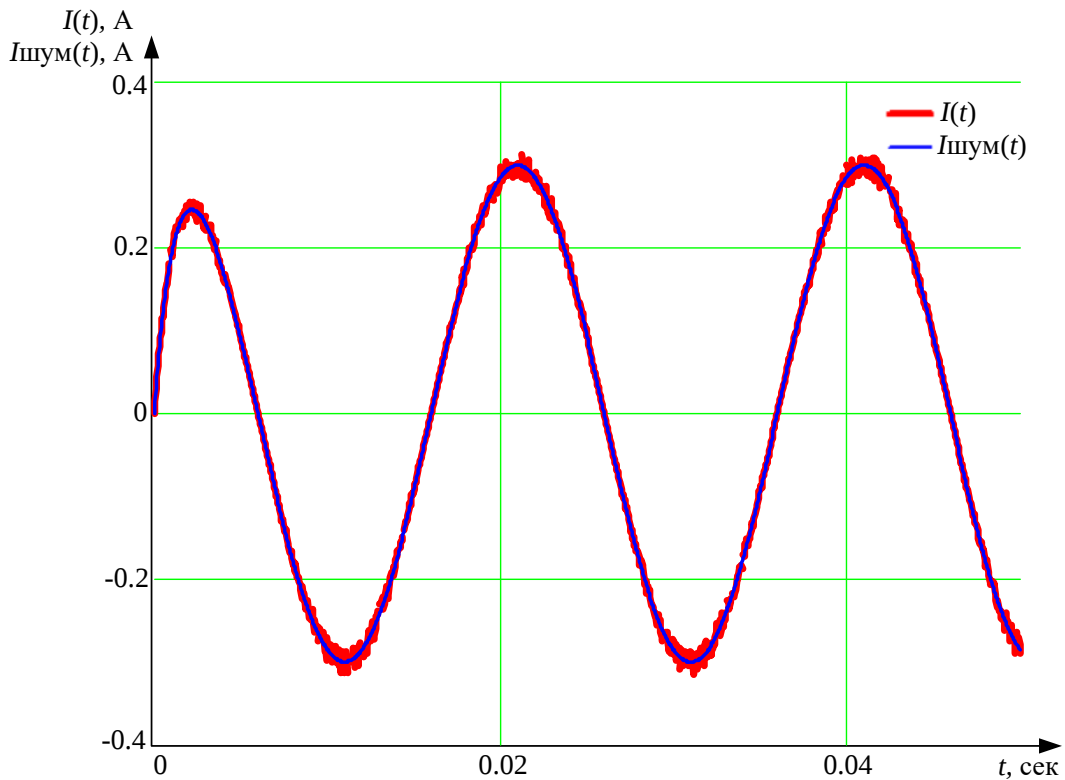


Рис. 2. Переходные процессы тока $I(t)$ и тока с наложенной 10-ти процентной шумовой составляющей $I_{шум}(t)$

На рисунке 3 представлена реализация в виде листинга программы для нахождения параметров $A1$ и $A2$ объясняющей модели $F(t, A1, A2)$, где $F(t, A1, A2)$ имеет вид (1). Для решения этой задачи используется метод Качмажа.

```
(A1 A2) := for i ∈ pp..NNB
|
|   
$$FUNCothe_{i-1} \leftarrow \frac{\sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s) \cdot Ishum1(t_s)) - \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s))^2 \cdot A1_{i-1} - \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s) \cdot \cos(\omega \cdot t_s)) \cdot A2_{i-1}}{\left[ \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s))^2 \right]^2 + \left[ \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s) \cdot \cos(\omega \cdot t_s)) \right]^2}$$

|
|   
$$A1_i \leftarrow A1_{i-1} + FUNCothe_{i-1} \cdot \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s))^2$$

|   
$$A2_i \leftarrow A2_{i-1} + FUNCothe_{i-1} \cdot \sum_{s=i-pp}^i (\sin(\omega \cdot t_s) \cdot \cos(\omega \cdot t_s))$$

|
| (A1 A2)
```

Рис. 3. Листинг разработанного метода выделения тренда

Входными данными $Ishum1$ – является зашумленный ток, «окно» – окно просмотра, на котором происходит подбор неизвестных параметров модели методом Качмажа на текущей итерации процесса выделения тренда (25 точек или 0.025с), h – шаг дискретизации между итерациями равный 0.1 мс, с учетом h период входного сигнала равен 0.02с (20 точек), $T_{обуч}$ – период нахождения параметров $A1$ и $A2$ (20000 точек или 2с). На рисунках 4 и 5 представлены итерационные процессы нахождения параметров $A1$ и $A2$. Значения на последней итерации

составили $A1=0.091$ и $A2=0.283$, что и является решением поставленной задачи. Однако на данных рисунках видно, что значение $A1$ и $A2$ варьируются относительно математического ожидания. В связи с этим, для восстановления исходного сигнала наиболее корректно брать среднее значение найденного параметра за последние 10 шагов. На рисунке 6 представлены полученный переходный процесс тока в RC -цепи $I(t)$ и выделенный тренд полезного сигнала $\hat{I}(t)$.

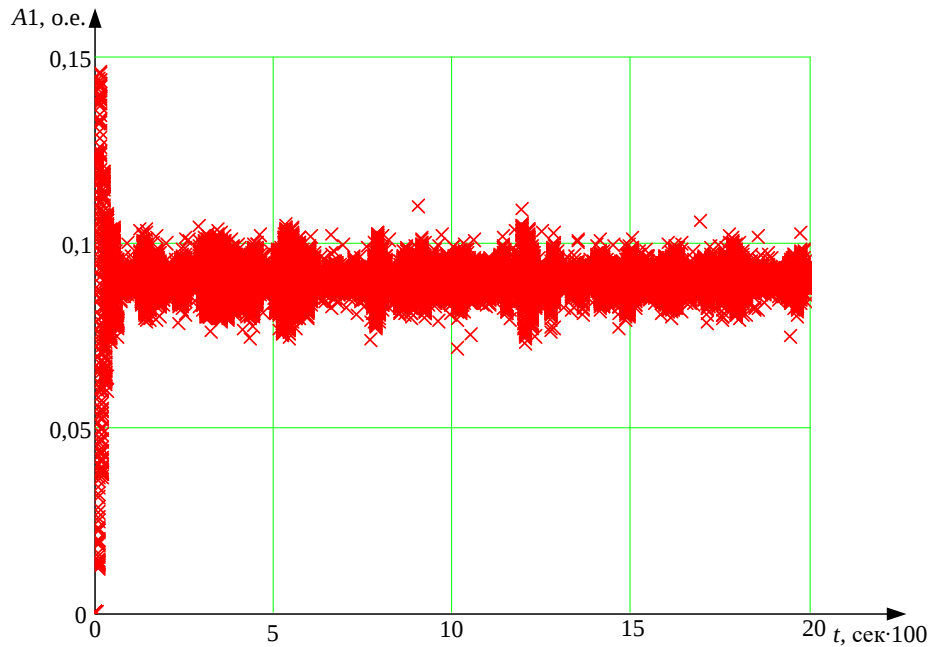


Рис. 4. Итерационный процесс нахождения параметров $A1$ объясняющей ортогонально-базисной регрессионной модели

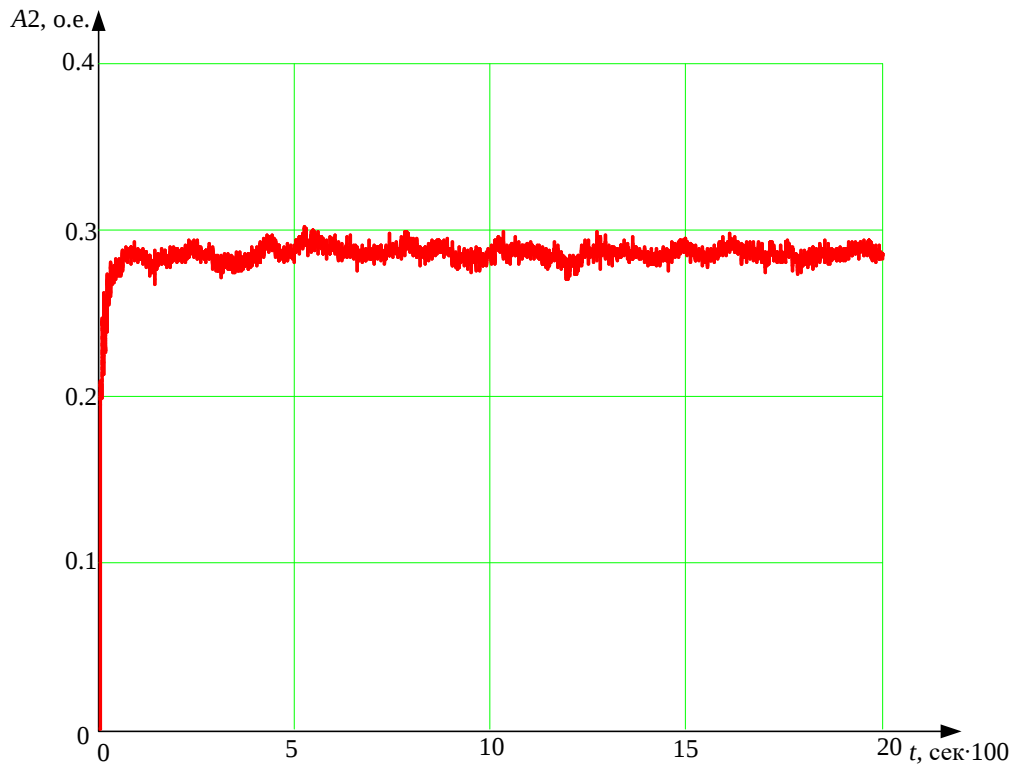


Рис. 5. Итерационный процесс нахождения параметров $A2$ объясняющей ортогонально-базисной регрессионной модели

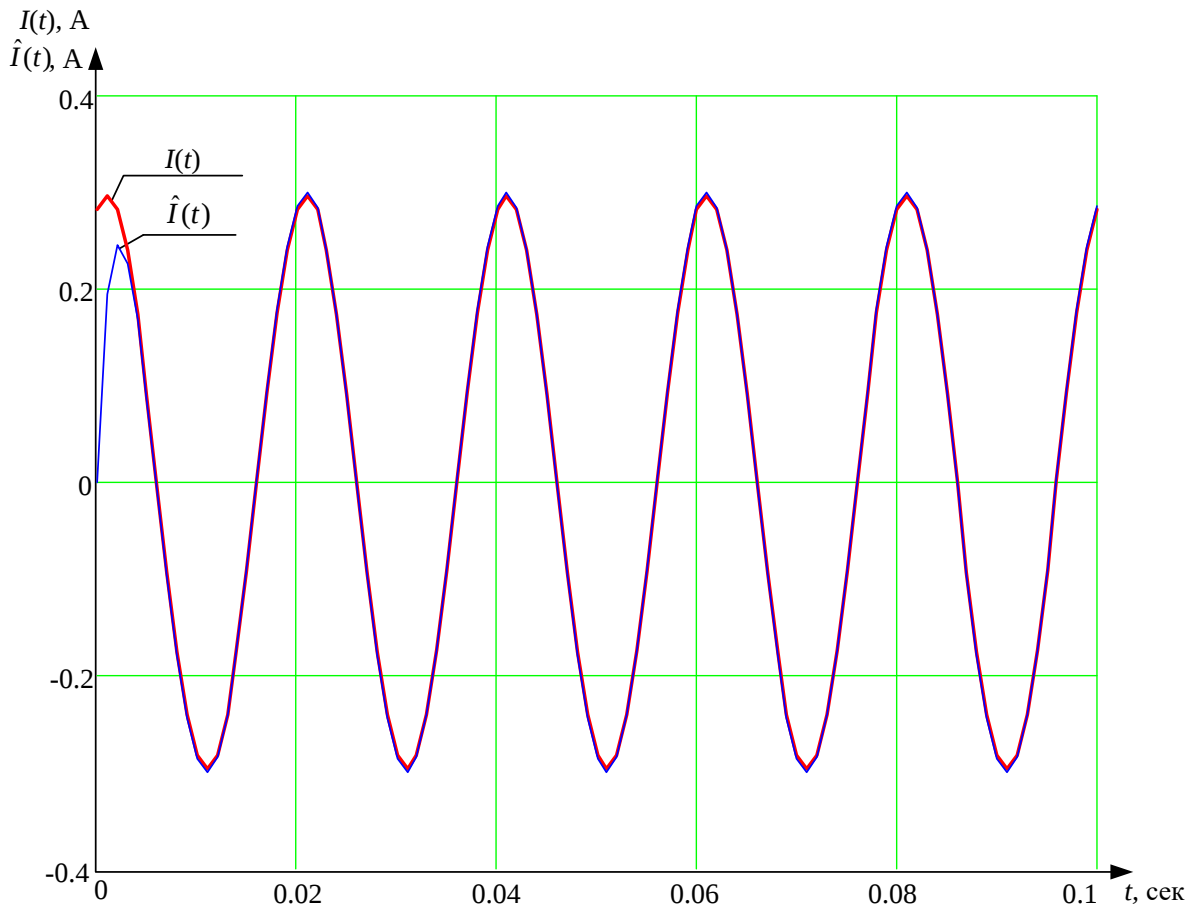


Рис. 6. Переходный процесс тока в RC-цепи $I(t)$ и выделенный тренд полезного сигнала $\hat{I}(t)$

Анализ рисунков 4-6 показывает, что процесс определения параметров $A1$ и $A2$ объясняющей модели характеризуется наличием собственного переходного процесса длительностью около 0.02 секунд. Определим интегральную погрешность выделенного тренда (на основе данных с шумовой составляющей) относительно установившегося процесса от 0.02 секунд до 20 секунд

$$\frac{\int_{0.02}^{20} |B(t) - F(t, A1_{cp}, A2_{cp})| dt}{\int_{0.02}^{20} |B(t)| dt} \cdot 100\% = 0.479\%.$$

Заключение

Построение регрессионной ортогонально-базисной модели с двумя параметрами дает возможность выделять тренд полезного сигнала. Разработанный метод позволяет извлекать тренд даже из сигнала с шумовой компонентой с точностью до 0.5%, при этом выделенный тренд не имеет фазового сдвига и не приводит к ослаблению сигнала. Кроме того, благодаря формулировке задачи как минимизации суммы квадратов отклонений объясняющей регрессионной ортогонально-базисной модели от экспериментальных данных и ее решению с помощью метода Качмажа, была получена аналитическая модель сигнала, что открывает возможности для ее применения в задачах оптимизации, диагностики, идентификации параметров и прогнозирования переменных состояния как электропривода в целом, так и отдельных его узлов.

Список использованных источников

1. Saeed V. Vaseghi. Advanced digital signal processing and noise reduction. – 3rd edition. – John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 480 p.
2. Майстренко А.В. Синтез, исследование и применения алгоритмов цифрового дифференцирования сигналов в системах автоматического регулирования процессов : дис. ...канд. техн. наук – Томск, 2007. – 140 с.
3. О рациональной размерности базиса регрессионной модели для задачи адаптивного краткосрочного прогнозирования состояния дискретной нестационарной динамической системы / А.С. Глазырин, Е.В. Боловин, О.В. Архипова, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, В.А. Копырин, Е.А. Беляускене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 257–272. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4482
4. Майстренко А.В., Светлаков А.А. Применение методов цифрового дифференцирования сигналов для определения стационарности процессов // Научный Вестник НГТУ. – 2015 – Т. 59. – № 2. – С. 7-19.
5. Боловин Е.В. Разработка алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей : дис. ...канд. техн. наук – Томск, 2018. – 271 с.