

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ СИГНАЛА ИОННОГО ТОКА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Будко А.Ю.

Южный федеральный университет, Таганрог

Ключевые слова: ионный ток, электропроводность пламени, двигатель внутреннего сгорания, машинное обучение, искусственные нейронные сети, Kolmogorov–Arnold Networks, обработка сигналов/

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы обработки сигнала ионного тока, регистрируемого в камере сгорания двигателей внутреннего сгорания. Особое внимание уделяется цифровым методам обработки информации на основе аппроксимационных моделей и машинного обучения. Исследуется возможность параметризации кривой интегральной характеристики сигнала ионного тока на различных режимах работы двигателя. Научная новизна заключается в использовании аппарата Kolmogorov–Arnold Networks для параметризации кривой интегральной характеристики сигнала ионного тока, практическая значимость заключается в снижении времени параметризации интегральной характеристики сигнала ионного тока по сравнению с оптимизацией математической модели распределения Вейбулла или кривой выгорания топлива Вибе. Материалы могут быть полезны для разработчиков двигателей внутреннего сгорания, их систем управления, мониторинга и диагностики.

USING KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORKS TO PARAMETERIZE THE ION CURRENT SIGNAL IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Budko A.Yu.

Southern Federal University, Taganrog

Keywords: ion current, flame conductivity, internal combustion engines, machine learning, artificial neural networks, Kolmogorov–Arnold Networks, signal processing Abstract.

Abstract. This paper examines the processing of the ion current signal recorded in the combustion chamber of an internal combustion engine. Particular attention is paid to digital data processing methods based on approximation models and machine learning. The feasibility of parameterizing the integral characteristic curve of the ion current signal in various internal combustion engine operating modes is explored. The scientific novelty lies in the use of the Kolmogorov–Arnold Networks apparatus for parameterizing the integral characteristic curve of the ion current signal. The practical significance lies in the reduction in the time required to parameterize the integral characteristic of the ion current signal compared to optimizing the Weibull distribution mathematical model or the Wiebe fuel burnout curve. These materials may be useful for internal combustion engine developers, their control, monitoring, and diagnostic systems.

Введение. Сигнал ионного тока (СИТ) в двигателях внутреннего сгорания, обусловленный электропроводностью пламени, несет информацию о параметрах процесса сгорания [1]. Развитие методов на базе машинного обучения, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС), открывает новые возможности для обработки и анализа ионного тока [2-4]. Для регистрации ионного тока на измерительный зонд подают напряжение смещения и измеряют протекающий в цепи ток, зависящий от параметров процесса сгорания, как это показано на рисунке 1.

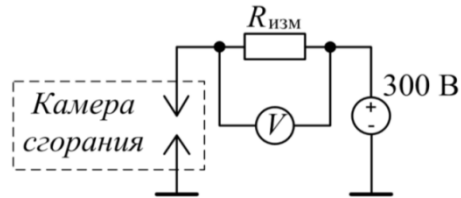


Рис. 1. Упрощенная измерительная схема ионного тока (а) и пример структурного анализа ионного тока (б)

Набор экспериментальных данных. Набор данных получен на установке УИТ-85 при изменении угла опережения зажигания от 0 до 33 градусов УПКВ. Данные приведены на рисунке 2.

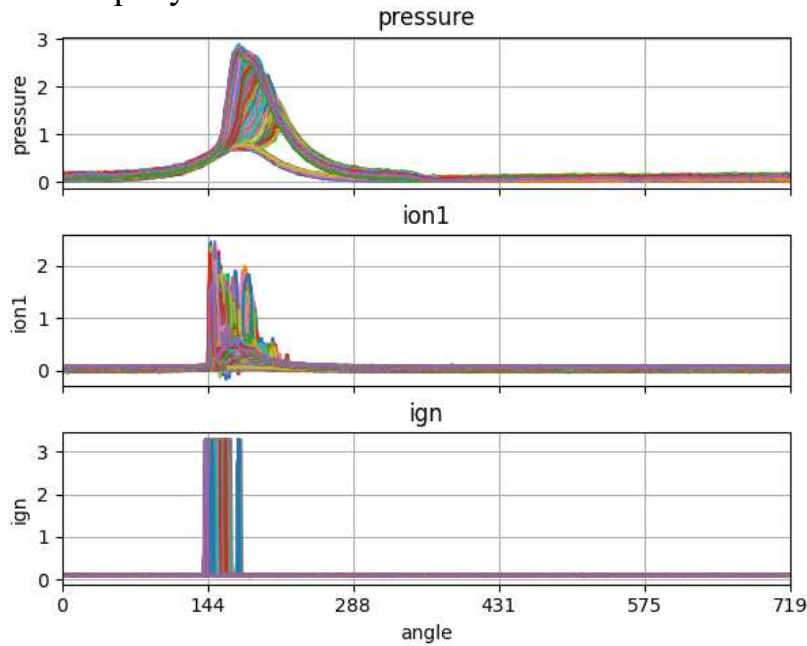


Рис. 2. Набор данных в функции угла поворота коленчатого вала (ось абсцисс): верхний график давление в МПа, средний график сигнал ионного тока в вольтах, нижний график сигнал импульса зажигания (детектор импульса на основе датчика Холла с триггером, установленный на высоковольтном проводе)

Kolmogorov-Arnold Networks (KANs). Теорема Колмогорова Арнольда гласит, что любая непрерывная функция нескольких переменных

$$f(x_1, \dots, x_n) \quad (1)$$

может быть представлена в виде суперпозиции непрерывных функций одной переменной и бинарной операции сложения:

$$f(x) = \sum_{q=1}^{2n+1} \Phi_q \left(\sum_{p=1}^n \Psi_{pq}(x_p) \right), \quad (2)$$

где Ψ_{pq} – одномерные функции, Φ_q – одномерные функции, используется только сложение или композиция.

Архитектура Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) была предложена в работе [5]. В то время как многослойные перцептроны (MLP) имеют фиксированные функции активации на узлах («нейроны»), KANs имеют обучаемые функции активации на ребрах («веса»). KANs вообще не имеют линейных весов, – каждый параметр веса заменен одномерной функцией,

параметризованной как сплайн. Авторы оригинально работы заявляют, что сети KANs являются альтернативой MLP с лучшей интерпретируемостью и аппроксимацией на малых данных. Это обусловлено тем, что фиксированная нелинейность (ReLU, GELU и т.д.) MLP заменяется обучаемыми одномерными функциями, параметризуемыми, например B-spline базисом, а не линейными весами как в случае MLP. Наилучшую эффективность KANs показывают в задачах символьной регрессии, физических задачах (PINNs), при ограниченности обучающего набора данных, при работе с научными данными, кроме того KANs требуют меньше параметров для той же точности.

В данной работе показана возможность параметризации сигнала ионного тока на основе аппроксимации его интегральной характеристики (ИХСИТ) аппаратом KANs. Для этого предлагается аппроксимация ИХСИТ каждого отдельного цикла на основе математической модели:

$$f(\phi) = a \left(1 - e^{-6.908 \left(\frac{\phi}{b} \right)^{c+1}} \right), \quad (3)$$

где ϕ – угол поворота коленчатого вала в градусах, параметр a – определяет максимальное значению интеграла ионного тока за цикл сгорания, b – относительная длительность ионизации топливной смеси, c – определяет характер протекания процесса ионизации топливной смеси.

Можно заметить, что математическое выражение (3), являющееся частным случаем распределения Вейбулла, по своей структуре повторяет уравнение И.И. Вибе для кривой выгорания топлива, известного из теории рабочих процессов ДВС [6].

Выражение

$$f(x) = a \cdot \Phi(\psi(x)) \quad (4)$$

может быть описано как композиция двух 1D функций, что хорошо подходит под KAN-представления:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= (x / b)^{c+1}, \\ \Phi(t) &= 1 - e^{-6.908t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для обучения KANs реализован следующий алгоритм действий:

1. Созданы обучающие выборки ИХСИТ на основе сигнала ионного тока, полученные путем интегрирования СИТ в функции угла поворота коленчатого вала.
2. Выборки подаются на KAN-encoder, на выходе которого прогнозируется вектор (a, b, c) коэффициентов уравнения (3).
3. На основе выражения (3) и предсказанных KAN коэффициентов (a, b, c) производится реконструкция модельной кривой ИХСИТ.
4. Производится расчет потерь как MSE между реконструированной и реальными кривыми ИХСИТ.

Результаты работы KAN аппроксиматора в сравнении с аппроксимацией выражением (3) методом наименьших квадратов показаны на рисунке 3.

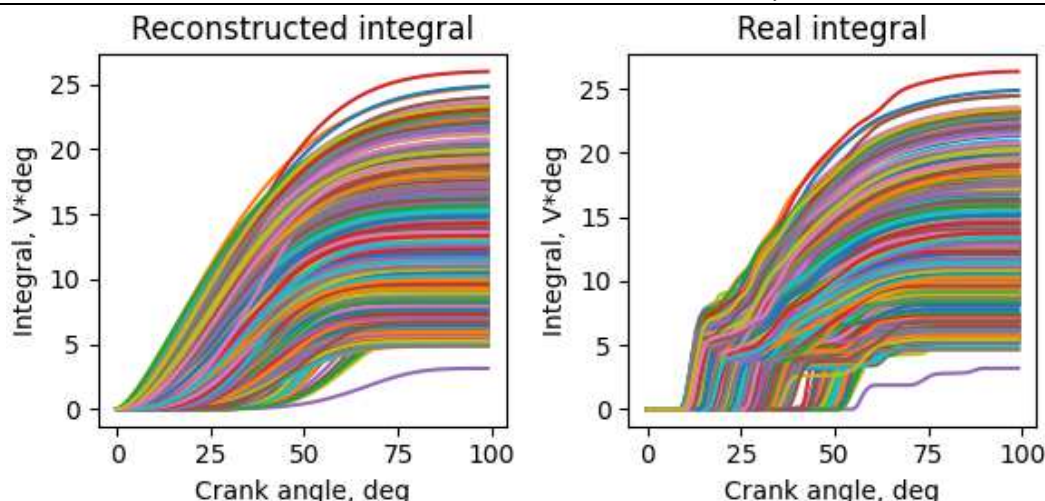


Рис. 3. Результаты работы KAN аппроксиматора в сравнении с аппроксимацией выражением (3) методом наименьших квадратов

Выводы. Использование KAN в качестве аппроксиматора ИХСИТ позволяет производить параметризацию на основе модельной кривой. Подход с реконструкцией кривой ИХСИТ при обучении делает обучение более устойчивым и физически согласованным, а также исключает необходимость расчета истинных (a , b , c), что ускоряет процесс обучения.

Список литературы

1. Будко А.Ю., Медведев М.Ю., Будко Р.Ю., Ивашин П.В., Твердохлебов А.Я., Герасимов Д.Н., Рахманов В.В. Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, №4. – С. 256-263. – DOI: 10.17587/mau.18.256-263.
2. Budko A., Medvedev M., Budko R., Ivashin P., Tverdokhlebov A., Gerasimov D., Rakhmanov V. Analysis of ion current integral characteristics for estimation of combustion process parameters in internal combustion engines // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2017, vol. 6, no. 3, pp. 188-193. DOI: 10.18178/ijmerr.6.3.188-193.
3. Wang X., Zhou T., Dong Q., Cheng Z., Yang X.A. A Virtual Combustion Sensor Based on Ion Current for Lean-Burn Natural Gas Engine // Sensors. 2022, vol. 22, no. 13, p. 4660. DOI: 10.3390/s22134660.
4. Song Z., Zhang X., Zhang B. Study on the correlation between ion current integral signal and combustion pressure // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.120.
5. Liu Z., Wang Y., Vaidya S., Ruehle F., Halverson J., Soljačić M., Hou T.Y., Tegmark M. KAN: Kolmogorov–Arnold Networks // arXiv:2404.19756 [cs.LG]. 2024, 68 p. URL: <https://arxiv.org/abs/2404.19756>.
6. Vibe I.I. Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren. – Berlin: Vebverlagstechnik, 1970. – 286 с.

Сведения об авторе:

Будко Артем Юрьевич – к.т.н., с.н.с.