DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.33

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТЕКУЩЕЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ МОДУЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR FINDING THE CURRENT OPERATING POINT OF A MODULAR INDUSTRIAL ELECTRIC POWER CONVERTER

E. Savelyev
V. Khabuzov
V. Sidelnikov
I. Garyutin
V. Tsvetkov

Summary. The article touches on the development and testing of an algorithm for finding the nearest working point on a parametric voltage-current characteristic of a complex shape. This algorithm is planned to be used for control systems of a modular industrial electric converter to ensure response to changing load parameters.

Keywords: modular power supply, algorithm for finding the nearest point to the surface of complex shape, mathematical algorithms, software.

Савельев Евгений Анатольевич
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
mad_jackson@list.ru
Хабузов Василий Арсеньевич
Кандидат технических наук, Технический директор, Общество с ограниченной ответственностью ООО «Нью Лайн», Санкт-Петербург
vax9517643@yandex.ru
Сидельников Владимир Иванович
Кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
vsid1952@mail.ru
Гарютин Игорь Александрович
Старший преподаватель, Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения
manoftomorrow@mail.ru
Цветков Виктор Владимирович
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
w1nampina@mail.ru

Аннотация. Статья затрагивает разработку и тестирование алгоритма поиска ближайшей рабочей точки на параметрической вольтамперной характеристике сложной формы. Данный алгоритм планируется применять для систем управления модульного промышленного электрического преобразователя для обеспечения реакции на изменяющиеся параметры нагрузки.

Ключевые слова: модульный источник питания, алгоритм поиска ближайшей точки к поверхности сложной формы, математические алгоритмы, программное обеспечение.

Развитие современной промышленности диктует особые условия эксплуатации и предъявляет высокие требования к различному вспомогательному оборудованию. Одним из основных классов такого оборудования является энергообеспечивающее. Производителям такого оборудования необходимо обеспечить не только качество и стабильность конечного продукта — электроэнергии, но и удовлетворить требования по вариативности номенклатуры таких систем и обеспечить возможность настраивать такие системы под конкретные требования технологического процесса с возможностью автоматической подстройки параметров под изменяющиеся условия протекания этого процесса.

Например, в современных целлюлозно-бумажных производствах приводные механизмы (валы, ролики, натяжные станции) обеспечивают непрерывное прохождение слоёв бумажной массы через отделительные, прессовые и сушильные участки. Скорость их вращения напрямую влияет на равномерность толщины и качестве поверхности материала Неправильная балансировка скоростей может привести к дефектам поверхности, неоднородной структуре или к разрыву материала, поэтому точная настройка, адаптация и поддержание постоянства параметров питающего оборудования является важной задачей обеспечения качества готовой продукции.

Если рассматривать участие энергообеспечения в определенном стандартизированном технологическом процессе, то задача становится уже не стационарная и сводится не к просто поддержанию какого-то жестко заданного выходного уровня напряжения или тока, а его динамическая регулировка и подстройка под текущие стадии и состоянии технологического процесса. Подобное поведение невозможно обеспечить без быстродейственной системы управления.

Развитие микроэлектроники и микропроцессорной техники позволило создать симбиоз силовой части и специализированных датчиков и вычислительных устройств, позволяющих отслеживать изменяющиеся состояние выходного сигнала и максимально точно и быстро подстраивать параметры источника питания для поддержания рабочей точки в зоне заданной вольтамперной характеристики (ВАХ). Концепция модульного преобразователя электроэнергии, предполагает наличие специализированной системы управления.

Разработка любой информационной системы начинается с постановки технического задания и определения перечня решаемых задач той или иной системой, для системы управления данным модульным преобразователем, ключевым является поддерживание выходной характеристики системы по заранее заданному пользовательскому алгоритму, в данном случае по пользовательской кривой ВАХ (тестовый интерфейс системы управления, который позволяет задавать сложные параметрические ВАХ представлен на рисунке 1).

Согласно теории автоматического управления (ТАУ), современные системы управления преимущественно базируются на принципе обратной связи, что обеспечивает их адаптивность и устойчивость к внешним возмущениям. Такой подход позволяет непрерывно контролировать и корректировать рабочие параметры системы, минимизируя ошибки и обеспечивая высокую точность регулирования. В контексте импульсных преобразователей питания применение принципа обратной связи особенно критично, поскольку точность измерения и стабилизация выходного напряжения напрямую влияют на эффективность работы как самого преобразователя, так и подключенных потребителей энергии. Небольшие отклонения от заданных значений могут привести к неэффективной работе системы, ускоренному износу компонентов и снижению надежности в целом, что подчеркивает необходимость использования высокоточных методов контроля. Поэтому алгоритмы управления

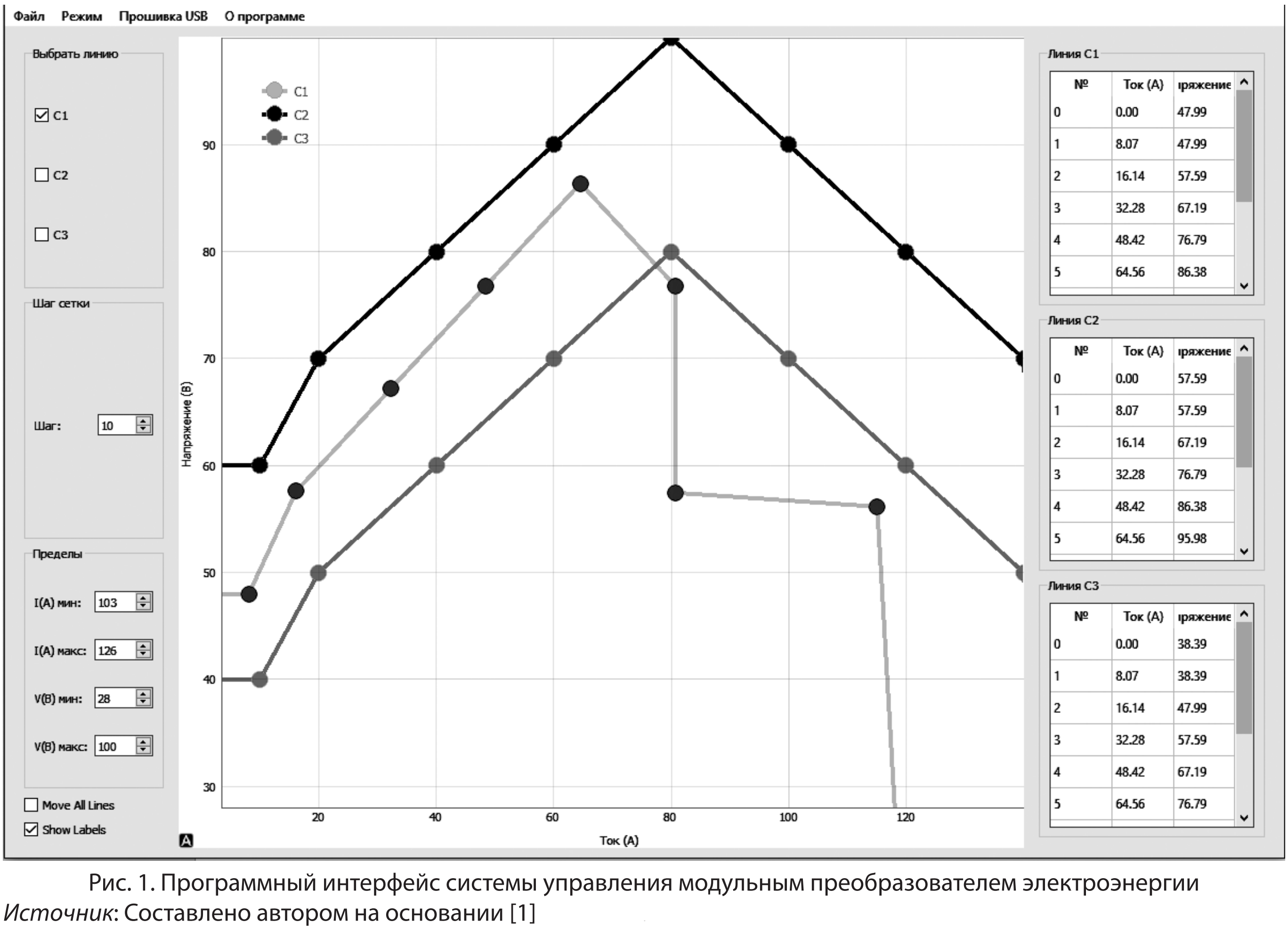

Рис. 1. Программный интерфейс системы управления модульным преобразователем электроэнергии
Источник: Составлено автором на основании [1]

должны максимально быстро и точно определять уход рабочей точки от заданных параметров, на основании этого расчета производить выработку управляющего воздействия.

Если рассматривать эту задачу с математической точки зрения, то она сводится к нахождению кратчайшего расстояния между текущей рабочей точкой, определенной как совокупность тока и напряжения, и рабочей точкой эталонной, определенной на заданной ВАХ (график ВАХ с распределением точек представлен на рисунке 2).

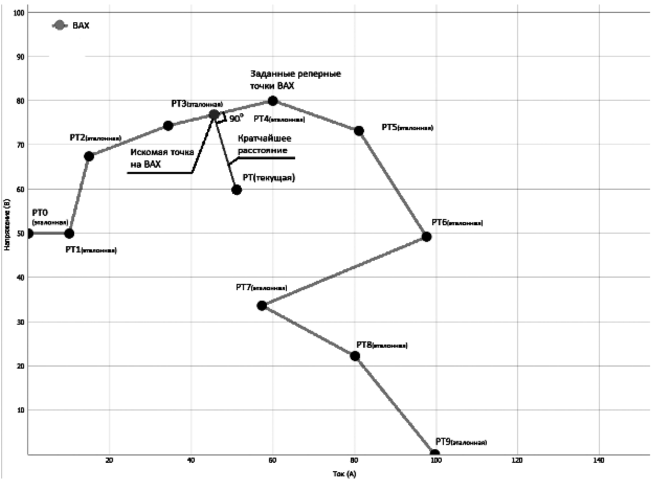

Рис. 2. Графическое представление алгоритма поиска искомой точки на рабочей ветви ВАХ

Источник: Составлено автором на основании [2]

Формально в математических расчетах расстояние от точки P до множества S определяют, как инфимум расстояний до всех точек этого множества, согласно формуле 1[3]:

$$d(P,S) = \inf_{Q \in S1} dist(P,Q) \quad (1)$$

Если множество *S* — гладкая кривая или прямая, то точка *Q* ближайшая к *P*, и расположенная на множестве *S*, обычно существует и единственна, а расстояние в таком случае равно длине отрезка *PQ*, и оно минимально. Однако для кривых общего вида ситуация сложнее и ближайшая точка может быть не единственной или даже не существовать, что усложняет, а иногда и делает невозможным применение классических методов расчета.

Существует множество распространённым математических алгоритмов расчета, кратчайшего расстояния от точки до плоскости или кривой, рассмотри несколько из них:

— Евклидово расстояние;
— Манхэттенское расстояние;
— Метод наименьших квадратов;

Эвклидово расстояние между точками $P(x_0, y_0)$ и $Q(x, y)$ определяется формулой 2:

$$dist(P,Q) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (2)$$

Тогда, задав параметризованную гладкую кривую S определяемой функцией 3 следующего вида [3]:

$$r(t) = (x(t), y(t)), \text{ при } t \in [a,b]. \quad (2)$$

Минимизировать расстояние от $P(x_0, y_0)$ до *S* удобно через квадрат расстояния, согласно формуле 3:

$$f(t) = \| r(t) - P \|^2 = (x(t) - x_0)^2 + ((y(t) - y_0))^2. \quad (3)$$

Условие минимума (при внутреннем экстремуме) задаётся равенством производной, формула 4:

$$\mathrm{ddtf}(t) = 2(x(t) - x_0)x'(t) + 2(y(t) - y_0)y'(t) = 0 \quad (4)$$

Геометрически это означает, что в точке $Q^*=r(t^*)$, ближайшей к *P*, вектор Q^*-P ортогонален касательной $r'(t^*)$. Однако в случае произвольных кривых уравнение (3) может иметь несколько решений t_1^*, t_2^*, t_k^*. Это означает, что функция расстояния $f(t)$ имеет несколько локальных минимумов. Тогда для нахождения глобального минимума необходимо вычислить $f(t)$ во всех найденных точках, а также на границе интервала $t=a$ и $t=b$, и выбрать минимальное значение, по формуле 5[4]:

$$\mathrm{d}(P,S) = \min\left\{\sqrt{f(t_1^*)}, \sqrt{f(t_2^*)}, \ldots, \sqrt{f(t_k^*)}, \sqrt{f(a)}, \sqrt{f(b)}\right\} \quad (5)$$

Данный метод обеспечивает естественную геометрическую интерпретацию расстояния, однако при наличии изгибов, самопересечений или разрывов касательной (например, в углах) функция расстояния может иметь несколько локальных минимумов и при численном решении задачи минимизации может возникать неоднозначность выбора глобального минимума. Что вносить ограничение на применение данного метода в систему управления в чистом виде.

Рассмотри другой метод. Манхэттенское расстояние между точками $P(x_0, y_0)$ и $Q(x,y)$ определяется согласно формуле 6:

$$dist(P,Q) = |x - x_0| + |y - y_0| \quad (6)$$

Для произвольной наклонной прямой, заданной, например, уравнением Ax+By+C=0, аналитическое выражение для L1 — расстояния получить сложнее из-за не дифференцируемости модуля. Задачу можно разбить на несколько случаев, рассмотрев знаки выражений $x-x_0$ и $y-y_0$. Таким образом, решение сводится к минимизации выражений вида [4]:

$$\min\{\pm(x - x_0) \pm (y - y_0)\} \quad (7)$$

При условии Ax+By+C=0, выбирая тот набор знаков, для которого найденная точка лежит на прямой. При задании кривой параметрически

$$r(t) = (x(t), y(t) \tag{8}$$

задача минимизации также сводится к разбиению интервала [a, b] на участки, где функция монотонна по *x* или *y* согласно формуле 9:

$$\min_{t \in [a,b]} \left\{ \left| x(t) - x_0 \right| + \left| y(t) - y_0 \right| \right\} \tag{9}$$

На каждом таком участке можно аналитически или численно определить минимум, сравнивая значения на концах и в точках изменения знака производной соответствующего модуля. Решения задачи минимизации в таком случае приводит к множественности кратчайших путей, что увеличивает алгоритмическую сложность.

Метод наименьших квадратов (МНК) применяется для аппроксимации исходных данных (точек на кривой) функцией, минимизирующей сумму квадратов отклонений. При работе с произвольными кривыми часто используется аппроксимация сложной формы более простыми объектами, такими как прямая, полином или сплайн. Например, для аппроксимации линейной зависимости используется модель *y=ax+b*, при этом МНК минимизирует сумму квадратов вертикальных отклонений, а для получения ортогональной аппроксимации необходимо минимизировать сумму квадратов перпендикулярных расстояний, что приводит к нелинейной оптимизационной задаче. А также к повышению ошибки определения искомой точки на кривой.

Поэтому использование классических методов поиска ближайшей точки не является возможным так как дает большую погрешность при сложных формах кривых. Однако разработанный адаптационный метод позволяет находить с достаточной точностью и быстродействием из-за использования простых вычислительных операций ближайшую точку даже на таких кривых. Адаптированный метод поиска необходимой рабочей точки, позволяет рассчитать координаты ближайшей точки на заданной кривой независимо от ее формы.

Данный метод основан на том, что для каждого отрезка между двумя соседними опорными точками кривой производится проекция заданной точки на прямую, содержащую этот отрезок. Математически это выглядит следующим образом, пусть у нас есть отрезок с концами *V* и *W* и точка *P*. Сначала вычисляется вектор от *V* к *W*:

$$\vec{d} = \left(w.x - v.x, w.y - v.y \right) \tag{10}$$

Затем определяется параметр *t* по формуле:

$$t = \frac{\left(p - v \right) \cdot \vec{d}}{\left\| \vec{d}^2 \right\|} \tag{11}$$

где $\left(p - v \right) \cdot \vec{d}$ — скалярное произведение, а $\left\| \vec{d}^2 \right\| = \left(w.x - v.x \right)^2 + \left(w.y - v.y \right)^2$

Этот параметр *t* показывает, где именно проецируется точка *p* относительно отрезка:

- Если t ∈ [0,1], то проекция лежит на самом отрезке.
- Если t <0 или t > 1, то проекция «выпадает» за границы отрезка, и тогда ближайшей точкой является один из его концов.

После того как для каждого отрезка вычислена точка проекции $q = v + t \cdot \vec{d}$, рассчитывается квадрат расстояния между *p* и *q*:

$$d^2 = \left(p.x - q.x \right)^2 + \left(p.y - q.y \right)^2 \tag{12}$$

Выбор в качестве лучшего кандидата осуществляется по минимальному значению d^2.

Метод обладает несколькими преимуществами с точки зрения вычислительной сложности. Во-первых, он имеет линейную сложность, поскольку для каждого из *n*–1 отрезков производится одно и то же вычисление, требующее константного числа операций. Таким образом, сложность каждого прохода равна *O*(*n*)[5].

Во-вторых, метод минимизирует затраты на вычисления за счёт отсутствия дорогостоящих операций. Например, вместо извлечения квадратного корня используется квадрат расстояния, что значительно снижает вычислительную нагрузку. Кроме того, прямое вычисление параметра *t* и последующая проверка с использованием простых арифметических операций (умножение, деление, сложение, вычитание) делают каждую итерацию очень быстрой.

Анализ рассчитанных точек показывает успешное нахождение точек разработанным алгоритмом (график заданной кривой и перечень рассчитанных точек на рисунке 3).

Сравнение времени реакции различных методов представлен в таблице 1.

Внешний цикл повторяет процедуру несколько раз для оценки среднего времени, при этом каждая итерация внутри цикла не зависит от предыдущей. Это означает, что не используются дополнительные итеративные методы или процессы сходимости, как это бывает в методах градиентного спуска или итерационных приближениях для метода наименьших квадратов.

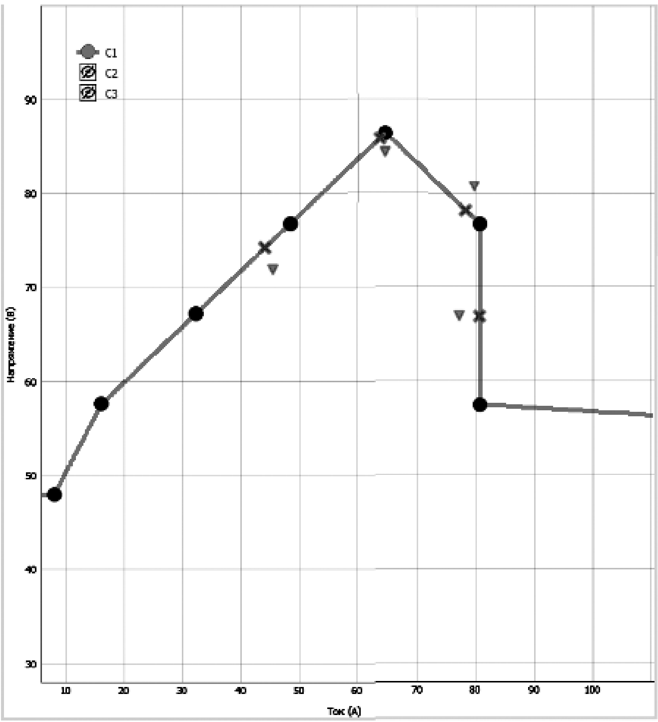

Рис. 3. График пользовательской заданной ВАХ сложной формы и произведенный расчет ближайшей рабочей точки, при заданном отклонении, при помощи разработанного алгоритма
Источник: Составлено автором на основании [2]

Таблица 1.
Сравнение методов нахождения ближайшей РТ на кривой ВАХ

Наименование метода	Время реакции метода, мкс
Метод с повышенной точностью	1.902
Метод наименьших квадратов	26.000
Евклидово расстояние	3.995
Манхэттенское расстояние	42.057

Источник: Составлено автором на основании собственных исследований

При обработке сложной кривой количество точек может быть очень большим, и каждое вычисление проекции на отрезок производится по простейшей формуле с константным числом операций. В отличие от методов, которые пытаются найти глобальную аппроксимацию кривой, используют более сложный перебор, этот метод проходит по каждому отрезку один раз и вычисляет точное расстояние без дополнительных итераций для уточнения. Это обеспечивает минимальную вычислительную сложность $O(n)$ для каждого прохода по кривой, что является оптимальным решением для подобных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. RU№2317880, Способ формирования внешней характеристики источника питания для электросварки.
2. RU№2329125, Способ формирования внешней характеристики источника питания для дуговой электросварки плавящимся электродом.
3. Cantera-Cantera L.A., Vargas-Jarillo C., Palomino-Reséndiz S.I., Montelongo-Vázquez C.M. A Polynomial-Fitting Problem: The Orthogonal Distances Method, Mathematics, 2022, Vol. 10, no. 23, P. 4596.
4. Савенков Е.Б. Конечноэлементный вариант метода проекции ближайшей точки для решения уравнений на поверхностях с краем // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 8. 36 с. DOI: 10.20948/prepr-2020–8.
5. Мясоедова Т.М. Формообразование семейства кривых смещения с выявлением их нерабочих участков / Т.М. Мясоедова // Программные системы и вычислительные методы. — 2020. — № 2. — С. 20–30. (DOI: 10.7256/2454–0714.2020).

© Савельев Евгений Анатольевич (mad_jackson@list.ru); Хабузов Василий Арсеньевич (vax9517643@yandex.ru);
Сидельников Владимир Иванович (vsid1952@mail.ru); Гарютин Игорь Александрович (manoftomorrow@mail.ru);
Цветков Виктор Владимирович (w1nampina@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»