УДК 629.7.036.7,519.688

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2019 г. С. В. Баранов^{1, *}, А. В. Плохих¹

¹ Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (НИИ ПМЭ МАИ), Москва, Россия *e-mail: riame@sokol.ru

> Поступила в редакцию 19.03.2019 г. После доработки 11.04.2019 г. Принята к публикации 16.04.2019 г.

Зондовые измерения широко применяются в задачах, связанных с оценкой параметров плазменных образований. Запись и обработка вольтамперных характеристик (BAX) электрического зонда в плазме позволяет определить основные ее параметры: электронную температуру (T_e), потенциал плазмы ($\varphi_{пл}$); концентрацию плазмы (n). Известные методы обработки ВАХ, хотя и базируются на простых подходах, но требуют как правило участия оператора, обладающего развитыми навыком и интуицией, что не позволяет получать оценки параметров плазмы в реальном времени формирования ВАХ. В статье рассмотрены основные сложности, связанные с автоматической обработкой вольтамперных характеристик (BAX) электрического зонда в плазме. Предложены принципы построения алгоритмов автоматизированной обработки ВАХ. На примере результатов автоматизированной обработки ВАХ зонда, расположенного на оси плазменной струи между индуктором и ионно-оптической системой высокочастотного ионного двигателя мощностью 200 Вт, получены оценки параметров плазмы с использованием алгоритма, разработанного в НИИ ПМЭ. Показана высокая эффективность разработанного алгоритма и рассмотрены варианты его применения.

Ключевые слова: автоматизированные алгоритмы обработки данных, вольтамперные характеристики, параметры плазмы **DOI:** 10.1134/S0002331019030063

В настоящее время существуют различные методы диагностики параметров плазмы, наиболее простым из которых, является зондовый метод, который заключается в определении вольтамперных характеристик (ВАХ) зондов Ленгмюра и последующей их обработке [1, 2]. Под ВАХ зонда понимается зависимость тока в цепи зонда от напряжения на нем, задаваемого относительно некой опорной точки. В результате обработки ВАХ могут быть определены основные параметры плазмы: температура электронов (T_e), потенциал плазмы ($\phi_{nл}$) и концентрация плазмы (n_e). Для пояснения основных этапов обработки рассмотрим типичную ВАХ зонда, представленную на рис. 1(а) [1]. Она состоит из следующих частей:

– Ионная ветвь ВАХ, при отрицательных смещениях, характеризуется тем, что электроны отталкиваются от отрицательно заряженной поверхности зонда, и в измерительной цепи доминирует ионный ток из плазмы (участок АВ на рис. 1а). Из теории известно, что ток на этом участке должен возрастать пропорционально смещению напряжения на зонде при всех отрицательных смещениях потенциала зонда. При даль-



Рис. 1. Типичная зондовая характеристика (а) и зависимость логарифма тока на зонд от напряжения на зонде (б).

нейшем увеличении напряжения на зонде (участок BN) ионный и электронный токи на зонд становятся сопоставимы, а в точке N результирующий ток на зонд равен 0 (рис. 1а). Значение потенциала зонда в точке N называется потенциалом "плавания". С учетом линейной апроксимации изменение ионного тока на зонд на участке AB, определяют его значение при потенциале плавания и используют это значение в качестве характерного ионного тока на зонд.

— Электронная ветвь ВАХ, на котором резко возрастает электронный ток с увеличением напряжения на зонде (участок CDEF на рис. 1а). Поскольку на этом участке вклад ионов невелик, и почти весь ток электронный, ионной частью тока можно пренебречь [1]. При дальнейшем увеличении смещения потенциала зонда согласно теории Ленгмюра электронный ток нарастает с увеличением смещения, и скорость его нарастания зависит от температуры электронов. Вследствие значительной разницы ионного и электронного токов на участке ВАХ, начиная от точки С и выше. Ионной составляющей тока можно пренебречь. Для определения температуры электронов зондовая характеристика логарифмируется и преобразуется в вид, представленный на рис. 16. При максвеловском распеределении электронов участок ВАХ С-D будет вырождаться в линейный отрезок по углу наклона которой (ψ) и определяется температура электронов (T_e):

$$T_{\rm e} = \frac{1}{\rm tg\psi}.$$
 (1)

Как видно из рис. 1а на участке DF рост электронного тока на зонд значительно меньше чем на участке CD. Точка D характеризует начало более или менее резкого излома зондовой характеристики. Вблизи этого излома находится потенциал плазмы ϕ_{nn} .

После нахождения электронной температуры (T_e) и потенциала плазмы по формулам (2, 3), может быть рассчитана скорость электронов и концентрация плазмы:

$$V_{\rm e} = \sqrt{\frac{2T_{\rm e}e}{m_{\rm e}}},\tag{2}$$

$$n_{\rm e} = \frac{4I_{\rm e}}{eV_{\rm e}S},\tag{3}$$

где T_e – электронная температура; е – заряд электрона, m_e – масса электрона, S – площадь зонда; I_e – электронный ток; V_e – скорость электрона.

Согласно [1, 2], с довольно большой точностью можно определить потенциал плазмы используя дифференцирование. На рисунке 2 представлена первая и вторая производная по току. Принято считать, что потенциал плазмы соответствует максимальному значению первой производной и точке, где вторая производная меняет знак.

Вопросами автоматизации процессов регистрации ВАХ занимались еще в 60-х гг. 20-го века [1]. Они достаточно хорошо отработаны. В настоящее время имеется аппаратура для регистрации и обработки ВАХ в реальном времени. Ярким примером удачной автоматизации процессов определения параметров плазмы могут послужить американские станции обработки и измерений ВАХ семейства VGPS [3].

Зондовые станции типа VGPS-12 и VGPS-13 предназначены для записи зондовых ВАХ в лабораторных условиях и их быстрой обработки. Структурная схема станций VGPS приведена на рис. 3. Логически станция разделена на два блока. Измерительный блок состоит из основного и опорного зонда с интерфейсами. Основной зонд предназначен для измерения ВАХ, а опорный зонд – для компенсации влияния колебаний потенциала "плавания" на результат измерений. В электрических цепях опорного и основного зонда предназначенные для фильтрации высокочастотных колебаний.



Рис. 2. Первая (1) и вторая (2) производные тока на зонд по напряжению.



Рис. 3. Структурная схема зондовой станции VGPS-12.

Блок электроники станции VGPS (рис. 3) состоит из карты сбора данных, которая служит для подачи через сумматор и управляющее устройство пилообразного напряжения (или фиксированного смещения) на основной зонд и одновременной записи показаний с датчика тока, включенного в измерительную цепь основного зонда. В сумматоре подаваемое напряжение корректируется с учетом потенциала "плавания", определяемого опорным зондом.

Логика работы станции подразумевает регистрацию и усреднение до 1000 ВАХ. При этом среднее время записи 1 ВАХ составляет 1 мс. Впоследствии, усредненная характеристика обрабатывается.

Для управления работой станций используется компьютер с установленным программным обеспечением LabVIEW. Поставляемые вместе со станцией программы для LabVIEW позволяют осуществлять дальнейшую обработку BAX.

Обработка характеристик производится согласно [1, 2]. Для визуального контроля правильности обработки в режиме реального времени на монитор выводятся графики $\ln I(U)$, а также первой и второй производных тока на зонд по напряжению. По этим графикам также можно оценить правильность границ интервала значений напряжения, подаваемого на зонд.

В качестве примера ниже рассматриваются результаты измерения параметров плазмы, создаваемой высокочастотным ионным двигателем мощностью 200 Вт на оси плазменной струи в среднем сечении, расположенном между индуктором и ионнооптической системой [4]. На рисунке 4 представлен пример обработки вольтамперной характеристики с помощью станции VGPS-12, а на рис. 5 приведена BAX, соответствующая данной обработке. Токи на зонд автоматически пересчитываются в плотности токов. Как видно из рис. 4, в одном графическом окне станция выводит оператору электронную часть BAX, построенной в полулогарифмическом масштабе (J), а также первую и вторую производные плотности зондового тока по напряжению (J', J''). Во втором окне выводится кривая энергоанализа, показывающая распределение частиц по энергиям. Из графиков производных видно, что потенциал плазмы составляет величину порядка 16 В. Значение электронной температуры, при этом составляет величину 3.77 эВ.

Станция позволяет подавать на зонд напряжения до 230 В. В случае, если ВАХ не выходит в область насыщения электронного тока, программой предусмотрен другой алгоритм, основанный на теоретических расчетах. На всех этапах логика работы станций подразумевает постоянное участие оператора, который осуществляет коррекцию граничных условий и делает выводы об адекватности результатов обработки.

Следует отметить высокую стоимость данной аппаратуры, причем более половины ее стоимости составляет программное обеспечение, обеспечивающее обработку ВАХ. Кроме того, программное обеспечение сделано таким образом, что данные для обра-



Рис. 4. Вид монитора оператора зондовой станции VGPS.



Рис. 5. Экспериментальная ВАХ.

ботки могут поступать только со станции VGPS во время измерений. Возможность получения данных из других источников не предусмотрено. Это обстоятельство значительно сужает область применения данного программного обеспечения поскольку исключается возможность обработки данных, измерения которых не может обеспечить станция VGPS (например, из-за размера зондов, с которыми работает станция).



Рис. 6. Преобразованные функции: $I - \ln I(U)$; 2 - первая производная тока по напряжению.

По результатам аналогичных исследований, проводимых в НИИ ПМЭ, был разработан альтернативный автоматизированный алгоритм обработки ВАХ, основанный на аналитической интерпретации графических методов, представленных на рис. 1 и 2.

Алгоритм предусматривает выполнение следующих процедур:

1. Для обработки ВАХ представлена в виде массива значений зондовых токов и напряжений (I_k и U_k соответственно). Из общего массива ВАХ выделяется та часть, для которой $I_k > 0$. Первой записи полученного массива присваивается индекс 1, последней тах. Таким образом получаем $I_k \in [I_1; I_{max}]$, а $U_k \in [U_1; U_{max}]$.

2. Логарифмирование значений токов I_k , в массиве, полученном на шаге 1.

3. Преобразование массива, полученного на шаге 2, путем нормирования логарифмированных значений I_k и вычитания из всех значений полученного массива его первого значения. Результат подготовки данных в графическом виде представлен на рис. 6 (кривая I).

4. Нахождение отсчетов $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ для каждой пары точек массива, полученного на шаге 3.

- 5. Нормирование массива значений, полученных на шаге 4;
- 6. Определение возможности использования массива значений $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ для вычисле-

ния потенциала плазмы по критерию наличия экстремума.

7. В случае неоднозначности нахождения экстремума используется специальный метод поиска потенциала плазмы на основании массива, полученного на шаге 3.

8. Определение электронной температуры

Для иллюстрации работы автоматизированного алгоритма используем экспериментальную вольтамперную характеристику, представленную на рис. 5. После выполнения процедур 1–5, получается массив, который в графическом виде представлен на рис. 6. Для нахождения $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ использовалась формула:

$$\frac{\partial I_k}{\partial U_k} = \frac{I_k - I_{k-1}}{U_k - U_{k-1}},\tag{4}$$

где I_k и I_{k-1} – записи тока из массива ВАХ; U_k и U_{k-1} – записи напряжения из массива ВАХ; в ВАХ;

Полученные значения $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ записываются в служебные ячейки массива для даль-

нейшей работы.

Поскольку при рассмотрении массива, содержащего в себе отсчеты ВАХ применяется кусочно-линейная аппроксимация (предполагается, что между двумя соседними

точками прямолинейный отрезок), то найденные значения $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ можно считать значе-

ниями производной непрерывной функции в данных точках (рис. 6, кривая 2).

Далее, согласно п. 5 алгоритма, необходимо определить наличие экстремума в мас- ∂I_{k} –

сиве $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$. Данная процедура осуществляется с использованием логических операто-

ров, конкретный вид которых определяется типом используемой вычислительной среды. Как отмечалось, данная точка соответствует потенциалу плазмы, который, в данном случае, составляет 16.1 В. Для нахождения экстремума должно выполняться условие:

$$\left(\frac{\partial I_k}{\partial U_k}\right)_{\max} \neq \frac{I(U_{\max}) - I(U_{\max-1})}{U_{\max} - U_{\max-1}},\tag{5}$$

где U_{\max} и $U_{\max - 1}$ – последняя и предпоследняя записи напряжения в массиве ВАХ; $I(U_{\max})$ и $I(U_{\max - 1})$ – значения токов для последней и предпоследней записей напряжения.

Для нормированной производной по току (п. 4 алгоритма) справедлива формула:

$$\frac{I\left(U_{\max}\right) - I\left(U_{\max-1}\right)}{U_{\max} - U_{\max-1}} \neq 1.$$
(6)

В случае выполнения условия (6), напряжение для максимального значения $\frac{\partial I_k}{\partial U_k}$ бу-

дет соответствовать потенциалу плазмы, а отсчеты напряжения и тока для данной строки массива обозначаться $U_{\phi n n}$ и $I_{\phi n n}$ соответственно.

Как видно из рис. 16 положение точки D_0 определяется двумя координатами: по оси абсцисс U_0 (в нашем случае найденным на предыдущем шаге $U_{\phi \Pi \pi}$), и неизвестным значением по оси ординат. Из рисунка, также видно, что точка D_0 лежит на прямой, являющейся линейной экстраполяцией участка кривой ln *I*, при $U > U_{\phi \Pi \pi}$. В нашем случае (рис. 7), для нахождения ординаты данной точки необходимо рассчитать коэффициенты уравнения прямой 3, решая систему уравнений для отсчетов $U_{2.1} = U_{\text{max}}$

(точка 2.1 на рис. 7) и точки 2.2 для напряжения $U_{2.2} = \frac{U_{2.2} - U_{\varphi \Pi \pi}}{2}$:

$$\begin{cases} aU_{2,1} + b = F(\ln I_{2,1}) \\ aU_{2,2} + b = F(\ln I_{2,2}) \end{cases}$$
(7)



Рис. 7. Пример обработки ВАХ: *1* – прямая, определяющая электронную температуру *T*_e; *2* – исследуемая функция.

в итоге коэффициенты *а* и *b* равны:

$$a = \frac{F(\ln I_{2,1}) - F(\ln I_{2,2})}{U_{2,1} - U_{2,2}},$$
(8)

$$b = F(\ln I_{L2.1}) - \frac{F(\ln I_{2.1}) - F(\ln I_{2.2})}{U_{2.1} - U_{2.2}} U_{L2.1},$$
(9)

где *F*(ln*I*) функция, полученная на шаге 3 выполнения алгоритма.

Далее решается уравнение прямой с найденными коэффициентами для значения $U_k = U_{0 \Pi \pi}$ и находится искомая ордината.

Как отмечалось выше и в [1, 2] электронная температура находится по наклону прямой, построенной на участке ВАХ близком к прямолинейному. Кроме того, данная прямая проходит через потенциал плазмы. На рис. 7 в графическом виде представлены массивы $F(\ln I)$ (поз. 1) и пример рассчитанной прямой (поз. 2).

Для нахождения коэффициента, определяющего электронную температуру, необходимо решить систему уравнений для двух точек уравнения прямой. В качестве одной из точек, выбирается отсчет с напряжением $U_{\phi пл}$. В качестве другой точки выбирается отсчет массива, U_k который соответствует середине участка, ограничивающегося с одной стороны отсчетом U_1 (для минимального положительного значения I_k . На рис. 7 – это начало кривой 2) с другой – отсчетом $U_{\phi пл}$. Обозначим данный отсчет напряжения и тока $U_{1,1}$ и $I_{1,1}$ соответственно. Далее решается система уравнений:

$$\begin{cases} aU_{\varphi n\pi} + b = I_{\varphi n\pi} \\ aU_{1,1} + b = I_{1,1} \end{cases}.$$
 (10)

Электронная температура будет равна:

$$T_{\rm e} = \frac{1}{a},\tag{11}$$

где $a = \frac{I_{\phi \pi \pi} - I_{1.1}}{U_{\phi \pi \pi} - U_{1.1}}.$

По результатам расчетов электронная температура для ВАХ, представленной на рис. 5 составляет 3.5 эВ. Далее, вычисление концентрации плазмы выполняется по формулам (2, 3) и не представляет затруднений. Следует отметить, что для ее вычисления необходимо значение электронного тока которое определяется по ВАХ в точке, соответствующей найденному потенциалу плазмы.

Однако, возможна ситуация, когда условие (6) не будет выполняться. На этот случай (согласно п. 7 алгоритма) в алгоритме предусмотрен другой автоматический вариант решения данной задачи. Автоматизированный поиск прямолинейного участка ВАХ связан с определенными математическими трудностями и часто приводит к значительным погрешностям определения электронной температуры. Для повышения точности измерений предложен эвристический итеративный метод поиска линейного участка ВАХ, позволяющий оценить значения электронной температуры. Метод основан на последовательном задании отрезков ВАХ, соответствующих границам области анализа. С последующим инверсным преобразованием координат и поиском экстремумов на каждом этапе итерации. Следует отметить, что для эффективного поиска характерного участка функции на котором строится прямая для определения электронной температуры необходимо задать границы предполагаемого положения потенциала плазмы.

Для иллюстрации работы второй части алгоритма используем туже самую ВАХ, представленную на рис. 7. Как показано в [4], потенциал плазмы ионных двигателей лежит выше 10 В, поэтому для дальнейших расчетов, введем границы с небольшим запасом — в качестве нижней границы возьмем 8 В, в качестве верхней — максимальное значение 21.6 В. На рис. 8 кривая построена с учетом введенных границ — анализируемый участок кривой *3* на рис. 8 выделен сплошной линией.

Исследуемый участок массива преобразуется таким образом, что его первое и последнее значение переменной $F(\ln I)$ должны быть равны. Максимальное значение преобразованного массива соответствует точке с максимальной кривизной на исследуемом участке. После нахождения первого максимума операция по преобразованию массива повторяется, однако правая граница анализа ограничивается напряжением, которое соответствует первому найденному максимуму. Данная процедура может повторяться пока расстояние между двумя соседними найденными максимумами больше шага с которым записана ВАХ, однако минимальное количество итераций должно быть не менее 3, поскольку первый найденный максимум всегда соответствуют (в зависимости от характера ВАХ) либо центру перегиба либо его окончанию, а второй и третий максимум будут ограничивать область на которой расположен участок для построения касательной. На рис. 8 точками t1, t2, t3 отмечены найденные, в результате работы алгоритма, максимумы. Для нахождения электронной температуры производится расчет коэффициента прямой определяющей ее наклон ((аналогично формулам (7)–(9)) для точек массива соответствующих найденным максимам t₂ и t₃.

Согласно [1, 2] потенциал плазмы находится в точке пересечения прямых 2 и 3 (рис. 8). Пример расчета прямой 3 приведен выше (формулы 7—9). Поскольку потенциал плазмы является общей точкой прямых 2 и 3, то дальнейшее решение производится следующим образом:

$$a_1 \varphi_{\Pi \Pi} + b_1 = a_2 \varphi_{\Pi \Pi} + b_2. \tag{12}$$



Рис. 8. Пример обработки ВАХ: 1 и 2 – прямые для определения потенциала плазмы; 3 – исследуемая функция.

Отсюда, потенциал плазмы можно рассчитать:

$$\varphi_{\Pi\Pi} = -\frac{a_1 - a_2}{b_1 - b_2}.$$
(13)

В итоге получены следующие значения: $T_e = 3.7$ эВ; а потенциал плазмы 16.4 В. По сравнению с данными, рассчитанными с помощью производных (метод описанный в научной литературе [1, 2]), достигнута степень схождения более 90%.

Данный алгоритм может быть реализован как путем создания программ с использованием языков высокого уровня, так и в приложениях, позволяющих производить вычисления с использованием вычислительных утилит, таких как Excel, LabView, Matlab. Он осуществляет определение следующих параметров плазмы: электронной температуры (T_e), потенциала плазмы ($\phi_{пл}$), концентрации плазмы (n_e).

В настоящее время, алгоритм (реализованный в виде шаблона в Excel с использованием встроенных средств математической обработки) проходит апробацию в НИИ ПМЭ. Конечной целью данной работы является повышение универсальности алгоритма с целью возможности его использования для различных приложений плазменной диагностики при минимальном участии оператора.

Представленный алгоритм может послужить основой создания аппаратуры, для высокоскоростной диагностики плазмы. Среди возможных областей использования можно отметить космическое применение, связанное как с диагностикой плазменных струй электроракетных двигателей (ЭРД), так и мониторинг параметров плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов.

выводы

1. Проведен анализ современных методов обработки зондовых характеристик, рассмотрены подходы, использующие обработку как под управлением оператора, так и автоматическое определение параметров плазмы. На примере наиболее удачных автоматических систем для определения параметров плазмы — американских станций семейства VGPS сформулированы основные трудности, возникающие при автоматизированной обработке зондовых измерений.

2. Разработан автоматизированный алгоритм оценки параметров плазмы (электронная температура, потенциал плазмы, концентрация заряженных частиц) на основе зондовых измерений. Алгоритм объединяет в себе известный способ определения потенциала плазмы с использованием производной тока зонда по напряжению и разработанный альтернативный способ определения потенциала плазмы по результатам исследования кривизны электронной части ВАХ, построенной в полулогарифмическом масштабе.

3. Проведено тестирование разработанного алгоритма, реализованного с использованием стандартных математический функций в программе Excel, в задаче автоматизированной обработки BAX зонда, расположенного на оси плазменной струи между индуктором и ионно-оптической системой высокочастотного ионного двигателя мощностью 200 Вт. Результаты обработки BAX с помощью производной и альтернативным способом показали хорошую сходимость результатов (более 90% для потенциала плазмы и электронной температуры).

4. Подтверждена возможность использования разработанного алгоритма в области физики плазмы, в частности для исследования плазменных струй электроракетных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. Изд. Атомиздат, М., 1969. 292 с.
- 2. Chen F.F. Langmuir Probe Diagnostics // IEEE-ICOPS Electrical Engineering Department University of California, Los Angeles, Jeju, Korea, June 5, 2003. 42 c.
- 3. VGPS 12 Probe System EEDF User's Guide. Plasma sensors, Brookline, USA, 15 c.
- 4. *Riaby V., Savinov V., Masherov P., Yakunin V.* Full diagnostics of an inductive plasma section of an ion thruster. Lambert Academic Publishing. Beau Bassin, Mauritius. 2018. 102 c.

Peculiarities of Elaboration of Automated Algorithms for Assessing Parameters of Plasma Formations Based on Probe Measurements

S. V. Baranov^{*a*}, * and A. P. Plokhikh^{*a*}

^aResearch Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (RIAME MAI), Moscow, Russia

*e-mail: riame@sokol.ru

The probe measurements are widely used for solving the problems related to the assessment of plasma formation parameters. Recording and procession of current-voltage characteristics (CVC) of electric probes in plasma allow determination for its primary parameters: electron temperature (T_e), plasma potential (φ_{pl}); plasma density (*n*). Though the known methods of CVC procession are based on simple approaches, they require, as a rule, the participation of operator having knowledgeable skills and intuition, but this does not allow getting assessments for plasma parameters in the real time of CVC formation. The paper considers basic difficulties related to the automated procession of current-voltage characteristics of electric probe in plasma. The principles are proposed for the development of algorithms for automated CVC processing. By the example of results of automated procession of CVC of the probe positioned at the plasma plume axis between the inductor and ion-extraction system of the 200 W radio-frequency ion thruster, the plasma parameters were assessed using the algorithm developed at RIAME MAI. High efficiency of the elaborated algorithm is shown and its application options are considered.

Keywords: automated data procession algorithms, current-voltage characteristics, plasma parameters