

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНИЗИРОВАННОГО ГАЗА В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ДВОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА

*Ю.С. Ямпольський, В.П. Нокель, С.Т. Тибаєв. Метод дослідження іонізованого газу в газотурбінних двигунах на основі подвійного зонду Ленгмюра.* Розроблено метод для розрахунку максимальної частоти ВЧ- сигналу при заданій похибці вимірювання похідних вольт-амперних характеристик (ВАХ) в модуляційному методі. Запропонований метод обчислення гарантує, що похибки вимірювання ВАХ і її похідних не будуть більше заданих.

*Ю.С. Ямпольский, В.П. Нокель, С.Т. Тибаев. Метод исследования ионизированного газа в газотурбинных двигателях на основе двойного зонда Ленгмюра.* Разработан метод для расчета максимальной частоты ВЧ- сигнала при заданной погрешности измерения производных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в модуляционном методе. Предложенный метод вычисления гарантирует, что погрешности измерения ВАХ и ее производных будут не больше заданных.

*Y.S. Yampolsky, V.P. Nokel, S.T. Tibaev. Method of investigating ionized gas in turbine-engines on the basis of Lengmuir double probe.* The method is developed for calculation of the maximum frequency of HF - signal at a given error in measuring the derivative volt-ampere characteristics (VAC) in the modulation method. The offered method guarantees that errors in measuring VAC and its derivatives will not exceed the preset ones.

Газотурбинные двигатели ввиду целого ряда преимуществ широко используются на движущихся объектах — кораблях, самолетах и т.д., а также в стационарных силовых устройствах в промышленности [1]. Вместе с тем, повышение эффективности работы двигателя, например, коэффициента полезного действия, расхода топлива, надежности работы и т.д, требует дальнейших исследований физических процессов, протекающих в различных режимах его работы при изменении нагрузки, вида топлива и его расхода, температуры газовой среды, времени поджига смеси. Решающее значение на эффективность работы оказывают базовые параметры — электронная температура газовой смеси (плазмы) и концентрация в ней заряженных частиц [1]. Исследованы погрешности, возникающие в модуляционном методе диагностики [2] указанных параметров, заключающемся в подаче на двойной цилиндрический зонд Ленгмюра (ДЗЛ) суперпозиции двух сигналов — анализирующего ВЧ-сигнала и низкочастотного сигнала развертки [2]. ДЗЛ применялся в качестве датчика, поскольку он не чувствителен к скорости набегающего потока ионизированного газа (плазмы). Для определения параметров газа рассмотрены динамические искажения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ДЗЛ и ее производных. Искажения возникают из-за шунтирующего действия емкости, образующегося у каждого из двух цилиндрических электродов ДЗЛ двойного слоя газа.

Предлагается метод вычисления максимальной частоты анализирующего ВЧ-сигнала, гарантирующий, что погрешности измерения ВАХ и ее производных будут не больше заданных в проводимых экспериментах. Это же можно сказать и о параметрах газа —электронной температуре и концентрации, которые являются базовыми для повышения эффективности работы газотурбинных двигателей. Компенсация емкости измерительных кабелей не представляет труда, поскольку она известна и существует ряд схемотехнических решений, позволяющих, нейтрализовать ее влияние.

Проводимость двойного слоя состоит из активного и емкостного компонентов, которые определяются параметрами плазмы, анализирующих сигналов и зависят еще от целого ряда других факторов [1, 3]. Измерения ВАХ и ее производных на частотах, много меньших плазменной частоты, основаны на обработке сигналов, поступающих с выходного электрода ДЗЛ в предположении, что влияние емкости двойного слоя несущественно [3, 4]. Однако эта емкость может вносить существенные искажения [2, 5], оценки которых отсутствуют, отсутствуют также критерии, на основании которых можно было бы выбирать частоты анализирующих ВЧ-сигналов и низкочастотного сигнала развертки.

Емкость двойного слоя у цилиндрического электрода ДЗЛ [5]

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 L}{\ln\left(1 + \frac{r_D}{r_3}\right)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая константа;  
 $L$  — длина электрода зонда;  
 $r_D$  — дебаевский радиус экранирования;  
 $r_3$  — радиус электрода зонда.

Формула справедлива при условии, что слой не деформирован, в нем присутствуют только притягивающиеся частицы и отсутствует магнитное поле, а сам электрод находится под потенциалом

$$\varphi \leq \frac{kT}{e},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  
 $T$  — электронная температура;  
 $e$  — заряд электрона.

Математическая модель (1) принята за основу при дальнейшем анализе процессов, сопутствующих измерению ВАХ и ее производных. После подстановки в нее значений параметров ДЗЛ  $L$  и  $r_3$  из [5] получено выражение

$$C = \frac{1,12 \cdot 10^{-11}}{\ln\left[1 + 3,7 \cdot 10^6 \left(\frac{U_3}{N}\right)^{\frac{1}{2}}\right]}, \quad (2)$$

где  $N$  — концентрация плазмы;

$U_3 = \frac{kT}{e}$  — электронная температура в энергетических единицах.

Рассмотрим искажения ВАХ ДЗЛ при подаче на него линейно изменяющегося анализирующего ВЧ-сигнала  $U_a$ . Выходное сопротивление  $R_i$  генератора анализирующих сигналов выбирают из соотношения  $R_i \ll R_n$ , где  $R_n$  — сопротивление плазменного промежутка между электродами ДЗЛ [3]. Таким образом, генератор анализирующих сигналов является для плазменного промежутка источником напряжения, которое не зависит от тока ДЗЛ, измеряемого электронной аппаратурой,

$$i = i_R + i_C,$$

где  $i_R$  — информативная составляющая;  
 $i_C$  — емкостная составляющая.

Информативная и емкостная составляющие тока определяются соответствующими выражениями

$$i_R = \frac{U_a}{R_n}, \quad i_C = C \left( \frac{dU_a}{dt} \right), \quad (3)$$

где  $t$  — текущее время.

При равных площадях электродов ДЗЛ информативная составляющая описывается выражением [1]

$$i_R = i_n(U_a) \operatorname{th} \left( \frac{U_a}{2U_3} \right), \quad (4)$$

где  $i_n(U_a)$  — ионный ток.

При

$$U_a < U_3 \quad (5)$$

ионный ток не зависит от  $U_a$ , поэтому  $i_n(U_a) = i_n(0) = i_0 = \text{const}$  [3]. Поскольку здесь и далее анализ выполнялся с соблюдением условия (5), под ионным током будем подразумевать  $i_0$ , и принятая для  $C$  модель (1) будет корректной.

Динамические искажения ВАХ можно оценить, введя в рассмотрение относительную погрешность

$$\delta = \frac{(i_R - i_C)}{i_R}.$$

С учетом (3)

$$\delta = \frac{C \left( \frac{dU_a}{dt} \right)}{i_0 \operatorname{th} \left( \frac{U_a}{2U_3} \right)}. \quad (6)$$

При линейном изменении анализирующего сигнала его текущее значение и амплитуда выражаются как

$$U_a = At; U_a = A\tau, \quad (7)$$

где  $A$  — крутизна нарастания сигнала;

$\tau$  — период импульсов анализирующего сигнала.

Выразим  $i_0$  через  $U_3, N, L, r_3, e$ , массу ионов  $M$ , и т.к. емкости обоих слоев одинаковы и соединены последовательно, то с учетом (7)

$$\delta = \frac{8,8 \cdot 10^{19} U_a}{\tau \ln \left[ 1 + 3,7 \cdot 10^6 \left( \frac{U_3}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \right] N \left( \frac{U_3}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{th} \left( \frac{U_a}{2U_3} \frac{t}{\tau} \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) позволяет произвести оценку влияния емкости двойного слоя  $C$  на стадии планирования эксперимента и при необходимости принять соответствующие меры по ее учету.

Оценка  $\delta$  проводилась для цезиевой плазмы в начальной области ВАХ, так что выполнялось условие (5). Расчеты показали, что при одинаковых параметрах ионизированного газа, значение  $\delta$  возрастает при уменьшении  $t$  (см. таблицу). При увеличении  $U_3$  и  $N$  значение параметра  $\delta$  уменьшается. Отсюда следует, что при  $\tau \geq 0,1$ с влиянием емкости двойного слоя  $C$  ДЗЛ в измерениях ВАХ можно пренебречь, т.к. она практически не влияет на результат. Однако при быстропротекающих процессах, когда  $\tau < 0,1$ с, погрешность измерений  $\delta$  может существенно возрасти.

Оценка параметров ионизированного газа

$U_3, \text{эВ}$	$N, \text{м}^{-3}$	$U_a, \text{В}$	$\tau, \text{с}$	$t, \tau$	$\delta, \%$
1	$10^{12}$	20	0,1	0,1	1
1	$10^{12}$	$20 \times 10^{-3}$	0,1	0,01	10
возрастает	возрастает	20	0,1	0,1	снижается
1	$10^{12}$	20	$\geq 0,1$	0,1	$\geq 1$
1	$10^{12}$	20	$< 0,01$	0,1	$< 10$

Определено влияние емкости двойного слоя на результаты измерений производных ВАХ в модуляционном методе, заключающемся в подаче на зонд суперпозиции низкочастотного сигнала развертки  $U_p$  и модулирующего ВЧ-сигнала  $U_0$  с амплитудой  $U_0$  [6].

Здесь выполняются следующие условия:

$$U_0 \ll U_p; \quad (9)$$

$$\omega_0 \ll \omega_p; \quad (10)$$

$$\omega_p \ll \omega_0; \quad (11)$$

где  $\omega_p$  — частота сигнала развертки;

$\omega_0$  — частота модулирующего сигнала;

$\omega_p$  — плазменная частота.

При этом

$$\frac{d^{(n)}[i(U_p)]}{dU_p^{(n)}} \approx \frac{I_n}{U_0^n}, \quad (12)$$

где  $I_n$  — амплитуда  $n$ -й гармоники тока ДЗЛ.

Чем сильнее неравенства (9)...(11), тем точнее выражение (12), и не возникают паразитные явления, связанные с близостью частот  $\omega_0$  и  $\omega_p$ .

Поскольку плазменная частота ионов  $\omega_{\text{пи}}$  много меньше плазменной частоты электронов  $\omega_{\text{пэ}}$ , в (10) под  $\omega_{\text{п}}$  подразумевается либо  $\omega_{\text{пи}}$ , либо  $\omega_{\text{пэ}}$ . Неравенство (11) заслуживает более подробного анализа. При несоизмеримости  $\omega_p$  и  $\omega_0$  спектры сигналов  $U_p$  и  $U_0$  практически не перекрываются, поэтому не возникает трудностей в частотном разделении сигналов на выходе зонда, снижаются требования к параметрам электронной аппаратуры: прямоугольности полосовых фильтров, стабильности частоты генераторов развертки анализирующего ВЧ-сигнала и т.д. Однако, поскольку при высокой  $\omega_0$  часть тока зонда замыкается через емкость двойного слоя, измеритель тока регистрирует сигнал, пропорциональный модулю дифференциальной проводимости ДЗЛ  $\dot{y}$ , а информативным является ток, пропорциональный ее реальной составляющей  $\text{Re}(\dot{y})$ .

Для определения верхнего значения частоты модулирующего ВЧ-сигнала необходимо задаться допустимой относительной погрешностью  $\delta_c$ , определяемой прямым прохождением сигнала через емкость  $C$ .

Относительная погрешность измерения первой гармоники тока ДЗЛ

$$\delta_{c1}(\omega_0) = \frac{|I_1(\dot{y})| - I_1[\text{Re}(\dot{y})]}{I_1[\text{Re}(\dot{y})]}, \quad (13)$$

где  $|I_1(\dot{y})|$  — модуль первой гармоники ДЗЛ,

$I_1[\text{Re}(\dot{y})]$  — амплитуда информативной составляющей  $i_R$  тока ДЗЛ.

После несложных преобразований (13)

$$\delta_{c1}(\omega_0) = \left\{ \left( \frac{|\text{Im}(\dot{y})|}{\text{Re}(\dot{y})} \right)^2 + 1 \right\}^{\frac{1}{2}} - 1, \quad (14)$$

где  $\text{Im}(\dot{y})$  — мнимая часть  $\dot{y}$ .

$\text{Re}(\dot{y})$  — действительная часть  $\dot{y}$ .

Для определения составляющих выражения (14) предполагалось, что плазма ненамагничена, выполняется условие  $U_0 \ll U_p$ , двойной слой стабилен и имеет резкие границы. Принимая  $U_a = U_p$ , то, используя выражение (4) для зондовой характеристики, можно определить действительную часть  $\dot{y}$

$$\text{Re}(\dot{y}) = i'(U_p) = \frac{SNe^{\frac{3}{2}} \left( \frac{U_3}{M} \right)^{\frac{1}{2}}}{4U_3 \text{ch}^2 \left( \frac{U_0}{2U_3} \right)}, \quad (15)$$

где  $S$  — площадь электродов ДЗЛ.

Поскольку в ДЗЛ два двойных слоя, то

$$\text{Im}(\dot{y}) = \frac{\omega_0 C}{2}. \quad (16)$$

После подстановки (1), (15) и (16) в (14) найдено верхнее значение частоты модулирующего ВЧ-сигнала для заданной относительной погрешности измерения первой гармоники выходного тока ДЗЛ

$$\omega_0 = \frac{r_3 e^{\frac{3}{2}} N \ln \left[ 1 + 3,7 \cdot 10^6 \left( \frac{U_3}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \right] (2\delta_{c1} + \delta_{c1}^2)^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_0 (U_3 M)^{\frac{1}{2}} \text{ch}^2 \left( \frac{U_a}{2U_3} \right)}.$$

Оценим  $\omega_0$  для активного эксперимента с цезиевой плазмой при  $U_a = 1$  В,  $U_3 = 1$  эВ,  $N = 10^{12}$  м<sup>-3</sup>,  $r_3 = 2 \cdot 10^{-3}$  м. Пусть  $\delta_{c1} = 1$  %, тогда  $\omega_0 = 27$  кГц. Таким образом, задавшись неблагоприятным сочетанием параметров плазмы  $U_3$  и  $N$ , относительной погрешностью  $\delta_{c1}$ , можно найти  $\omega_0$ . После

этого следует приступить к оценке длительности периода импульсов  $\tau$ , который определяется временными характеристиками развития процессов в плазме, скоростью опроса датчика, параметрами избирательных систем электронной аппаратуры и т.д. При этом следует учитывать уравнение (8), решив его относительно  $\tau$ .

Разработанный метод исследования исключает вероятность увеличения погрешностей, возникающих при измерениях параметров ионизированного газа.

### Литература

1. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. — Пермь: ОАО “Авиадвигатель”, 2006.— 1176 с.
2. Гдалевич, Г.Л. Зондовые методы изучения ионосферы: ионосферные исследования/ Г.Л.Гдалевич. — М.: Наука, 1972. — № 18 — С. 95—119.
3. Козлов, О.В. Электрический зонд в плазме / О.В Козлов. — М.: Атомиздат, 1969. — 289 с.
4. Альвен, Х. Космическая плазма/ Х. Альвен. — М.: Мир, 1983. — 213 с.
5. Учкан, Т. Асимметричный двойной зонд Ленгмюра: применение при малом сигнале / Т. Учкан // Приборы для науч. исслед. — 1987. — № 12. — С. 48 — 51.
6. Манагадзе, Г.Г. Анализ вычислительных алгоритмов для определения электронной температуры и концентрации плазмы в методе симметричного двойного цилиндрического зонда Ленгмюра: препринт — 1581/ Г.Г. Манагадзе, В.П. Нокель, Г.Л. Гдалевич и др. — М.: ИКИ АН СССР, 1989. — 9 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Мазурков М.И.

Поступила в редакцию 8 октября 2009 г.