

## БЕСКОНТАКТНАЯ АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ. МЕТОД ПРЯМОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Букато А. В.

Гременок В. Ф. – д-р физ.-мат. наук, профессор

В настоящей статье описывается новый математический подход к изучению роли высших гармоник и форм более высоких мод в динамике микрокантилевера атомно-силового микроскопа. Основной принцип настоящего метода аналогичен общеизвестному методу гармонического баланса, однако есть и существенные отличия. В методе используется тот факт, что уменьшение начального расстояния между зондом и образцом приводит к значительному увеличению величины второй гармоники, а это может использоваться в качестве надежного сигнала для изучения топографии образца.

Метод атомно-силовой микроскопии давно является стандартным методом определения характеристик материала и одним из самых мощных методов наноразмерной визуализации. Самый популярный режим работы АСМ - динамический режим. Разнообразные сигналы могут использоваться для связи динамического поведения зонда со свойствами поверхности. Амплитуда колебаний, сдвиг частоты и фазовая задержка между возбуждением и откликом являются основными сигналами, через которые собираются данные [1].

Математические модели используются для прогнозирования поведения, демонстрируемого сложными АСМ, и понимания основополагающей физики. Тем не менее, обычно возникают расхождения между теорией и экспериментом, вызванные различными факторами, такими как сложность учета всех сил и параметров и/или использование неэффективных математических методов. В более точных непрерывных моделях управляющее уравнение является нелинейным уравнением в частных производных. Поскольку работа с нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, как правило, более сложна по сравнению с нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), этим моделям уделяется мало внимания. Стандартным подходом к решению уравнений непрерывной модели является дискретизация дифференциального уравнения в частных производных на пространственную и временную части с помощью одномодовой процедуры Галеркина, а затем применение схемы численного интегрирования для решения временных уравнений. Однако даже при работе АСМ в воздухе одномодовая дискретизация может привести к количественным и качественным ошибкам. Точный захват всех нелинейных явлений возможен только после использования четырех или даже более собственных мод в методе Галеркина. В большинстве проблем нелинейных колебаний отклик на гармоническое возбуждение включает в себя более высокие гармоники в дополнение к основной частоте. С другой стороны, реальные инженерные задачи обычно описываются уравнениями в частных производных. Обычная амплитуда удваивается, амплитуда второй гармоники умножается на 4. Стандартные подходы к решению таких проблем включают приведение дифференциального уравнения в частных производных к системе ОДУ и затем применяются числовые или полуаналитические методы решения ОДУ. Процесс дискретизации сам по себе сложен и может вносить числовые ошибки и снижать точность конечных результатов. Однако сейчас существует более простой и эффективный метод, который может быть применен к широкому кругу нелинейных задач. Этот метод называется методом прямого гармонического баланса и не требует какой-либо дискретизации основных уравнений. Данный метод успешно применяется для решения начально-краевой задачи, регулирующей движение микрокантилевера АСМ. Метод представляет собой новый подход к решению начально-краевой задачи, определяющий колебания зонда АСМ. В этом методе уравнение в частных производных решается напрямую и без какого-либо сокращения до обыкновенных дифференциальных уравнений. Основным преимуществом метода прямого гармонического баланса является то, что его реализация очень проста. Кроме того, вклады всех мод и всех гармоник могут быть обнаружены без ограничений или сложности [2,3].

На рисунке 1 показана кривая частотной характеристики системы вблизи первых трех собственных частот. Этот показатель не включает антирезонансные точки, но метод прямого гармонического баланса определяет резонансные частоты с высокой точностью. Как видно из рисунка 1, возбуждение форм с более высокими модами приводит к большей амплитуде зонда для того же значения амплитуды возбуждения. Другими словами, чувствительность к амплитуде возбуждения увеличивается для более высоких форм моды. Чувствительность к амплитуде возбуждения увеличивается для более высоких форм моды, аналогичная тенденция наблюдается для возбуждений вблизи первых трех собственных частот. Чем выше амплитуда возбуждения, тем больше амплитуда зонда. В зависимости от того, насколько близко зонд находится к образцу в эталонной конфигурации, кривые частотной характеристики изменяются. На рисунке 2 видно, что все кривые частотной характеристики следуют аналогичной тенденции. Кривые частотной

характеристики для второй гармоники показаны на рисунке 3 для нескольких значений начального расстояния границы зонд/образец. При изменении расстояния границы зонд/образец, вторая гармоника испытывает как сдвиг частоты, так и резкое изменение пика амплитуды. Вторая гармоника проявляет более высокую чувствительность к изменению начального расстояния, чем первая гармоника [4].

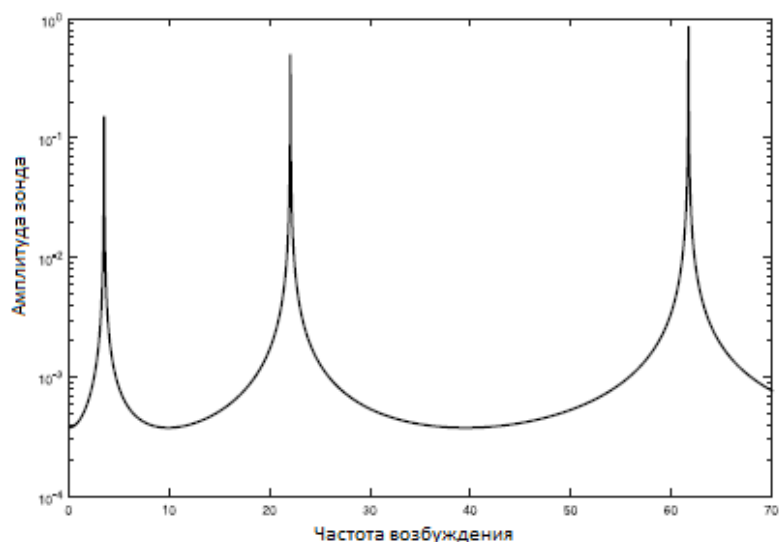


Рисунок 1 – АЧХ для широкого диапазона частот [4]

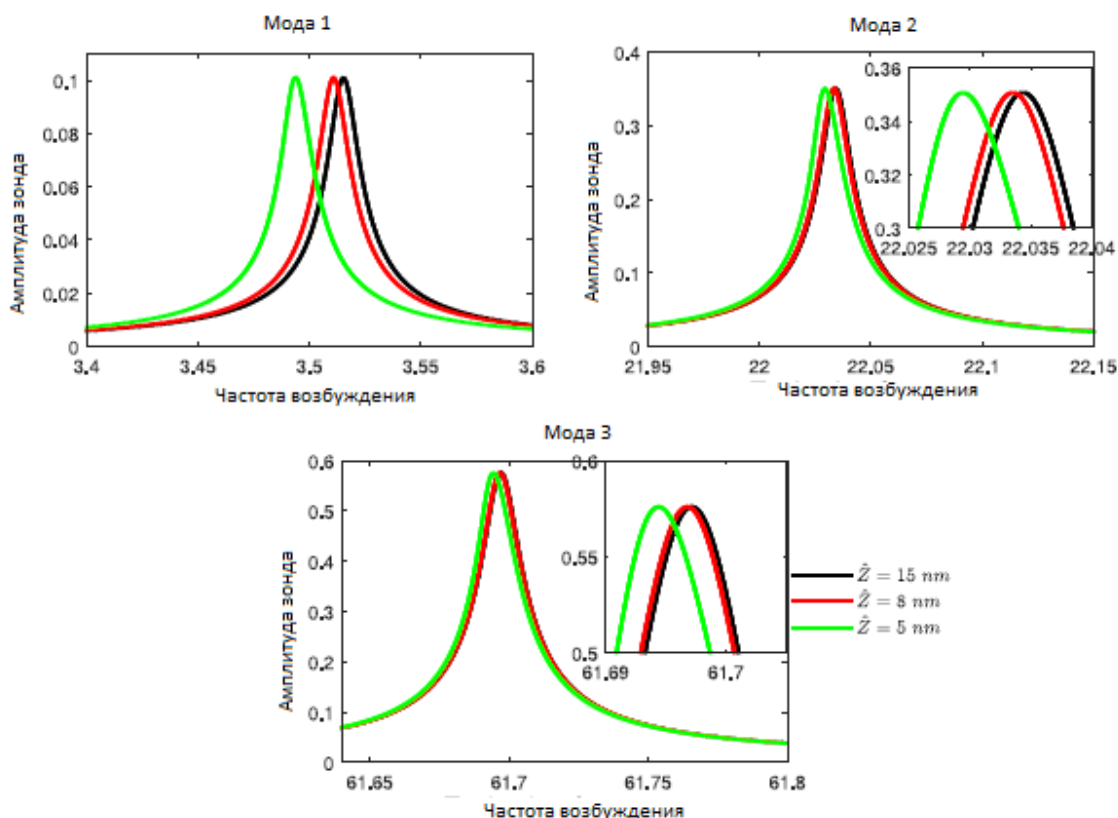


Рисунок 2 – Кривые частотной характеристики вблизи первых трех собственных частот для амплитуды 0,003 нм и различных значений начального расстояния границы зонд/образец [4]

При одинаковых условиях возбуждение более высокой моды приводит к большей амплитуде колебаний, но меньшей чувствительности к начальному расстоянию между наконечником и образцом и меньшему сдвигу частоты. Вторая гармоника отклика в бесконтактном режиме намного меньше, чем первая гармоника, и это затрудняет ее обнаружение в воздушной среде. Однако вторая гармоника очень чувствительна к изменению начального расстояния границы зонд-образец. И в то время как основная гармоника показывает только сдвиг частоты при уменьшении начального

расстояния границы зонд-образец, вторая гармоника испытывает не только сдвиг частоты, но и значительное изменение ее амплитуды [4].

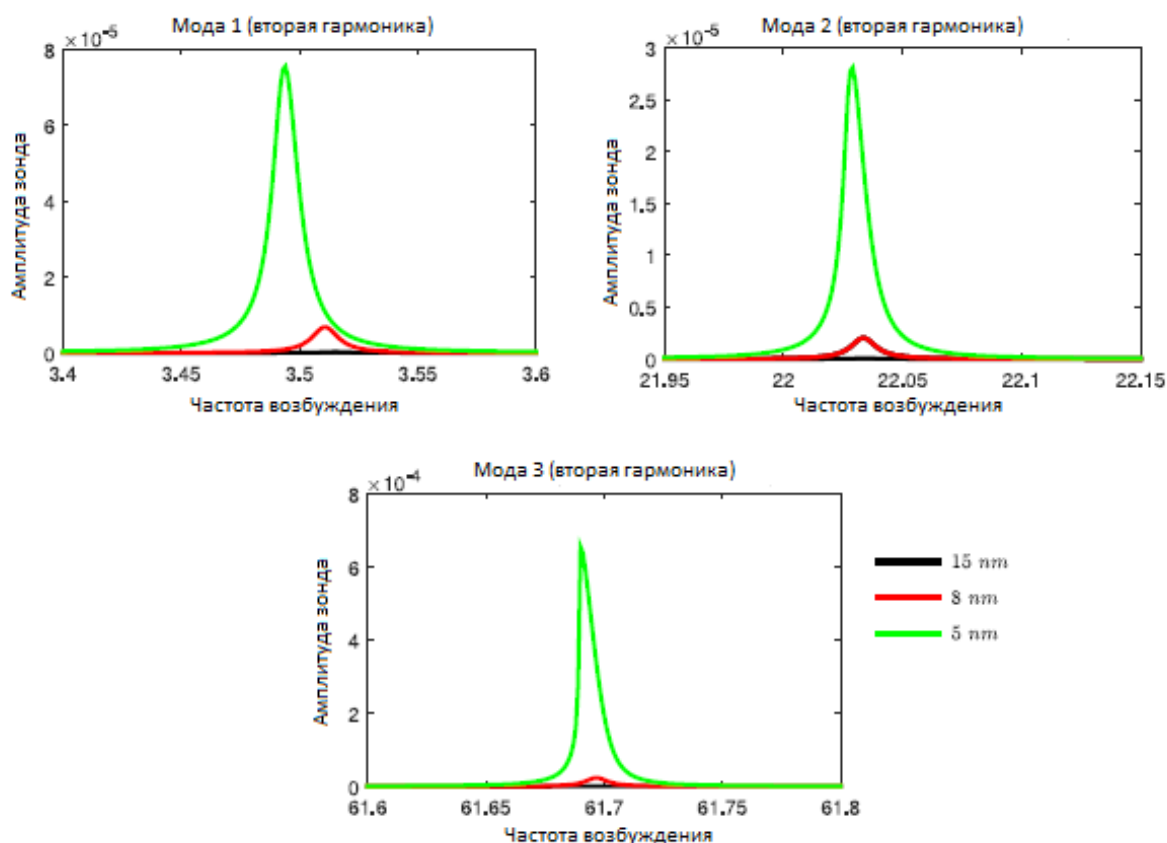


Рисунок 3 – Кривые частотной характеристики для второй гармоники [4]

Величина амплитуды для второй гармоники быстро увеличивается за счет уменьшения расстояния между острием и образцом. Существование высших гармоник в отклике обусловлено нелинейными взаимодействиями между зондом и образцом. Поскольку эта нелинейная сила возрастает с уменьшением начального расстояния между зондом и образцом, ожидаются большие амплитуды для второй гармоники на меньших расстояниях между ними. Острая чувствительность высших гармоник делает их подходящими сигналами для изучения топографии различных образцов [4].

Более того, этот метод не ограничивается только проблемой АСМ и может быть применен ко множеству нелинейных начально-краевых задач, с которыми сталкиваются вибрации, а также в других областях техники и физики. Данный метод позволяет обратить внимание на более высокие формы мод и высших гармоник, а также на возможной роли, которую эти сигналы могут играть для улучшения характеристик АСМ.

**Список использованных источников:**

1. Garcia R., Perez R. Dynamic atomic force microscopy methods / Surface Science Reports. – 2002. – Vol. 47. – P. 197–301.
2. Bahrami A., Nayfeh A.H. On the dynamics of tapping mode atomic force microscope probes / Nonlinear Dynamics. – 2012. – Vol. 70. – P. 1605–1617.
3. Bahrami A., Nayfeh A.H. Nonlinear dynamics of tapping mode atomic force microscopy in the bistable phase / Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2013. – Vol. 18. – P. 799–810.
4. Mahmoudi M.S., Ebrahimi A., Bahrami A. Higher modes and higher harmonics in the non-contact atomic force microscopy / International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2019. – Vol. 110. – P. 33–43