

В.В. Герасимов, В.С. Хандецкий

РАЗВИТИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДУЛЯЦИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ В ДЕФЕКТОСКОПИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Предложена модификация спектрального метода идентификации сигналов дефектов в слабопроводящих композитах со значительной шероховатостью поверхности. Построены карты вероятности выявления и идентификации поверхностных трещин различной глубины на фоне действия высокоинтенсивного шума.

Ключевые слова: вихретоковый датчик, поверхностная трещина, модуляционный импульс, спектральные характеристики, шум, идентификация.

Постановка проблемы. Процесс дефектоскопии композитных материалов значительно усложняет наличие мешающих факторов, среди которых следует отметить неконтролируемый отвод вихретокового датчика от поверхности диагностируемого изделия и перекоп датчика относительно нормали к поверхности, наблюдаемый при ручном режиме сканирования. Ситуация значительно усложняется из-за значительной шероховатости поверхности волокнистого композитного материала, что является источником высокоинтенсивного шума в процессе сканирования этой поверхности вихретоковым датчиком.

Ранее [1] нами для идентификации сигналов поверхностных трещин было предложено использование спектрального параметра идентификации K_h , определяемого как отношение суммы амплитуд гармоник с 6-й до 14-й к сумме амплитуд гармоник этого же сигнала с 1-й по 14-ю. При исследовании зависимости этого параметра идентификации от амплитуды модуляционного сигнала был обнаружен его недостаток — недостаточная чувствительность к увеличению амплитуды сигнала поверхностной трещины [2, 3].

Для устранения указанного недостатка предложена модификация алгоритма вычисления рассматриваемого спектрального парамет-

ра идентификации, которая заключается в использовании другой нормировки суммы гармоник, значимых для данного типа сигнала.

Целью данной работы есть исследование степени различаемости сигналов поверхностных трещин разной амплитуды и сигналов перекоса датчика вихретокового преобразователя фиксированной амплитуды на фоне значительного шума при ручном сканировании с помощью модифицированного спектрального метода идентификации.

Анализ последних публикаций. Исходные данные и алгоритмы обработки сигналов в основном были такими же, как и в предыдущих работах [1-3].

В качестве модели модуляционного сигнала поверхностной трещины использовалась разница экспонент

$$s_1(t) = e^{-b^2 t^2} - k e^{-2b^2 t^2}, \quad (1)$$

где t — текущее время (предполагается приблизительно равномерное перемещение датчика по траектории сканирования); b и k — константы, определяющие форму модуляционного импульса дефекта.

В качестве модели сигнала перекоса вихретокового датчика относительно поверхности композита использовалась параболоида вида

$$s_2(t) = ct^2 + d, \quad (2)$$

где c и d — константы.

Основная часть. Вначале в качестве параметра идентификации K_n использовалась сумма гармоник с 6-й по 14-ю — числитель предложенного ранее в [1] спектрального параметра идентификации.

Относительная амплитуда сигнала перекоса была зафиксирована на уровне 1. Амплитуда сигнала поверхностной трещины (модуляционного импульса) менялась в диапазоне 0, 0.1, ..., 2. Параметр k , который отвечает за форму модуляционного импульса, брали из ряда дискретных значений 1, 0.9 и 0.8. Т.о. исследовались относительно короткие (в сравнении с диаметром вихретокового датчика) трещины. Каждый эксперимент повторялся 10000 раз. Фурье-спектр сигнала вычислялся с использованием окна Гаусса [3, 4].

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости параметра идентификации K_n от стандартного отклонения шума при фиксированных значениях амплитуды модуляционного импульса A при разных значениях формы этого импульса (параметр k).

Предварительный анализ полученных результатов показывает,

что практически во всех случаях исследуемый параметр идентификации для поверхностной трещины превышает по абсолютному значению соответствующие параметры для сигнала перекоса вихретокового датчика и чистого шума. Это утверждение не соответствует действительности только в ограниченном диапазоне очень малых амплитуд модуляционного импульса $A \leq 0.2 \div 0.3$ (в зависимости от формы модуляционного импульса). С увеличением амплитуды модуляционного импульса его идентифицируемость улучшается.

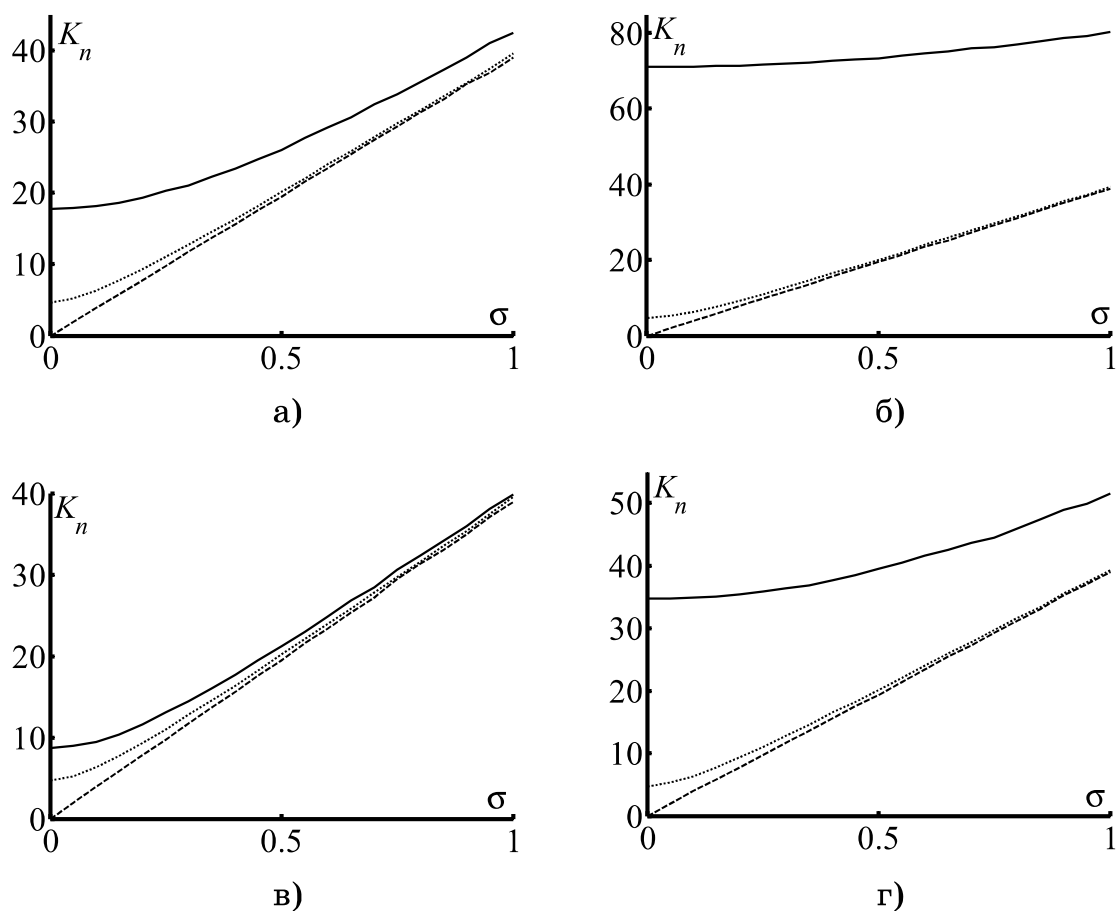


Рисунок 1 - Зависимость информационного параметра идентификации K_n от стандартного отклонения шума σ : $k = 1$ - а), б); $k = 0.8$ - в), г);
 $A = 0.5$ - а), в); $A = 2$ - б), г);

- уровень сигнала s_1 ; -- уровень сигнала s_2 ; - - уровень шума

На следующем этапе было исследовано поведение параметра идентификации K_{nn} для сигналов поверхностной трещины и перекоса вихретокового датчика, нормированного к сумме амплитуд гармоник с 6-й по 14-ю мешающего шума. Такой модифицированный параметр идентификации K_{nn} при значении, равном 1, соответствует чистому

шуму без какого-либо сигнала. На рис. 2а представлены зависимости такого параметра K_{nn} от стандартного отклонения мешающего шума.

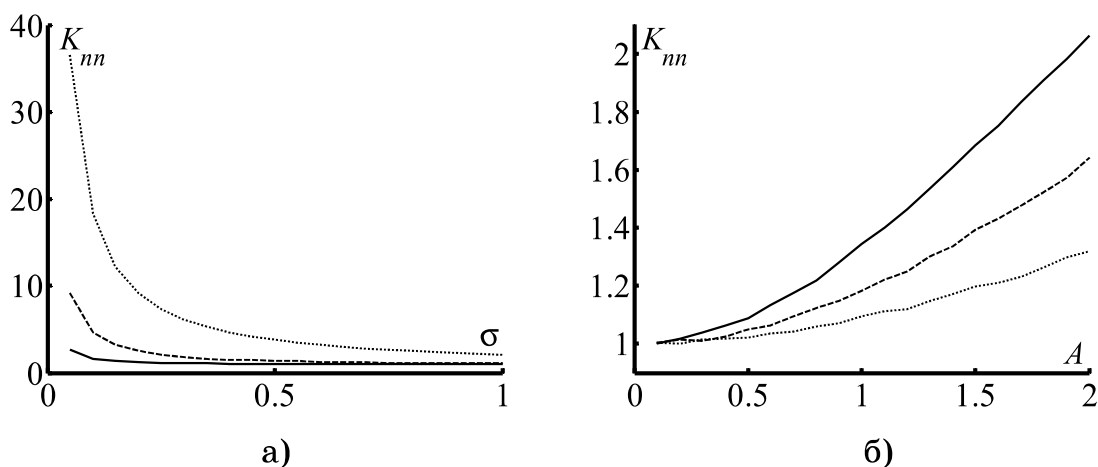


Рисунок 2 - Зависимость нормированного параметра идентификации K_{nn} :

а) от стандартного отклонения шума σ при $k = 1$:

- сигнал s_2 ; -- сигнал s_1 при $A = 0.5$; - - сигнал s_1 при $A = 2$;

б) от амплитуды сигнала s_1 при $\sigma = 1$: — $k = 1$; — $k = 0.9$; - - $k = 0.8$

Как видно из рис. 2 а, при малых амплитудах модуляционного импульса поверхностной трещины его достаточно сложно отличить от сигнала перекоса вихретокового датчика при наличии шума. При стандартном отклонении шума $\sigma \geq 0.7$ значение исследуемого параметра идентификации K_{nn} для сигнала перекоса датчика, нормированного на сумму гармоник шума с 6-й по 14-ю, падает до значения примерно 1.01. Для модуляционного импульса поверхностной трещины с $k = 1$ и амплитудой 0.4 указанный параметр идентификации опускается примерно до 1.1 — такой сигнал достаточно сложно идентифицировать, так как разница между параметрами идентификации поверхностной трещины и сигнала перекоса датчика составляет $\approx 10\%$. При увеличении амплитуды сигнала поверхностной трещины до 2 параметр идентификации уже не падает ниже значения 2, что позволяет идентифицировать этот сигнал с большей надежностью.

На рис. 2б отображена зависимость указанного параметра идентификации для модуляционного импульса поверхностной трещины от амплитуды и формы этого импульса. Анализ этого рисунка показывает, что более ярко выраженная двугорбая форма модуляционного импульса ведет к более быстрому увеличению параметра иден-

тификации с ростом амплитуды импульса, т.е. к большей вероятности идентификации трещины. Как было сказано выше, исследуемый параметр идентификации для сигнала перекоса датчика при этом равен примерно 1.01 и близкие ему значения исследуемого параметра идентификации для модуляционного импульса поверхностной трещины наблюдается в диапазоне малых амплитуд этого импульса. Размер этого диапазона амплитуд плохо выделяемого модуляционного импульса при этом зависит от коэффициента k , т.е. от формы этого импульса.

Для сравнения на рис. 3а и 3б представлены аналогичные зависимости для параметра идентификации K_h , вычисленного по методике, представленной в [1].

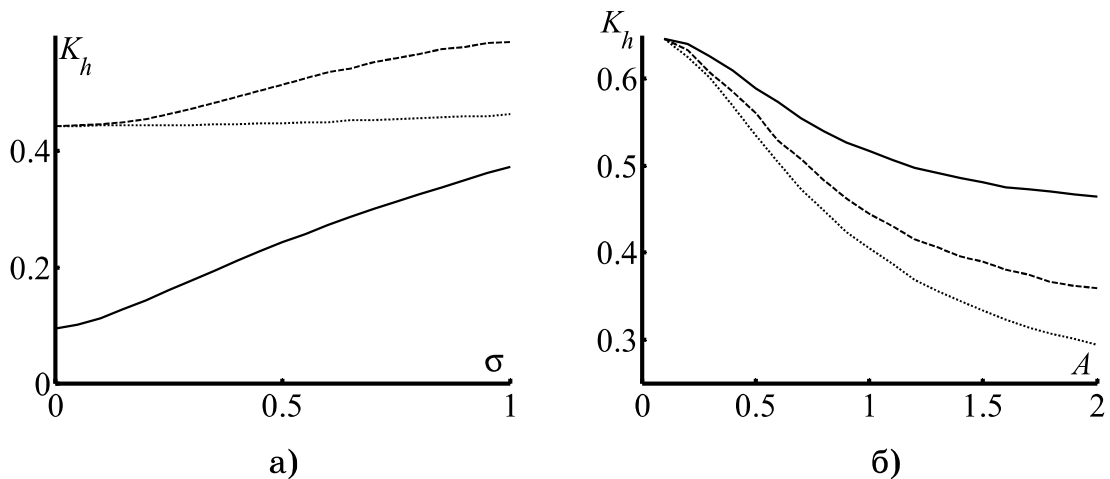


Рисунок 3 - Зависимость информационного параметра идентификации K_h :

а) от стандартного отклонения шума σ при $k = 1$:

- сигнал s2; - - сигнал s1 при $A = 2$; — сигнал s1 при $A = 0.5$;

б) от амплитуды сигнала s1 при $\sigma = 1$: — $k = 1$; — $k = 0.9$; - - $k = 0.8$

Рис. 3а показывает, что прежний параметр идентификации K_h для сигнала поверхностной трещины с ростом его амплитуды начинает приближаться к аналогичному параметру для сигнала перекоса вихретокового датчика с увеличением стандартного отклонения шума, что ухудшает возможность их различения с помощью этого параметра. Связано это с тем, что с ростом уровня шума параметр идентификации K_h для сигнала перекоса вихретокового датчика начинает стремиться к аналогичному параметру для чистого шума — сигнал "прячется" в шуме. На параметр идентификации K_h для сигнала зна-

чительной амплитуды шум влияет менее активно, поэтому этот параметр меняется незначительно в этом диапазоне интенсивности шума. Учитывая, что при $\sigma = 1$ параметр идентификации для сигнала перекоса вихретокового датчика $K_h \approx 0.37$, рис. 3б показывает, что с увеличением амплитуды модуляционного импульса поверхностной трещины даже при $k = 1$ параметр идентификации ненамного отличается от этого значения. Для сигналов с $k = 0.9$ параметр идентификации пересекает этот порог при амплитуде сигнала поверхностной трещины $A \approx 1.7$, а для $k = 0.8$ — уже при $A \approx 1.2$. Т.е. при таком алгоритме вычисления спектрального параметра идентификации наблюдаются определенные сложности с разделением сигналов дефекта и перекоса датчика.

На следующем этапе, используя методику, описанную в [1], были получены рабочие характеристики испытаний по обнаружению и идентификации поверхностных трещин композитных материалов на фоне шума. Полученные рабочие характеристики по методике, изложенной в [3, 5], были преобразованы в карты вероятности обнаружения и идентификации поверхностных трещин в композитных материалах с использованием обоих вариантов спектрального параметра идентификации K_h и K_{nn} . При построении этих карт вероятность ложной тревоги была зафиксирована на уровне $\leq 10\%$ и выбиралась вероятность верного решения — обнаружения и идентификации соответственно. Полученные вероятностные карты представлены на рис. 4.

На рис. 4а и 4б представлена карта вероятности выявления поверхностной трещины на фоне шума с использованием спектральных параметров идентификации K_h и K_{nn} соответственно. Сравнивая эти рисунки, можно сделать вывод, что модифицированный спектральный параметр идентификации K_{nn} позволяет обнаруживать поверхностные трещины в целом с большей вероятностью, чем K_h — площадь зоны с вероятностью обнаружения $\geq 90\%$ занимает более половины соответствующего рисунка.

На рис. 4в и 4г представлены вероятности разделения сигналов поверхностной трещины и перекоса вихретокового датчика с использованием спектральных параметров идентификации K_h и K_{nn} соответственно. Полученные карты вероятности идентификации сигнала показывают, что в области малых амплитуд модуляционного импульса поверхностной трещины лучшие результаты зафиксированы для па-

раметра идентификации K_h , в области же амплитуд, больших по значению 1, лучшие результаты показывает предложенный параметр идентификации K_{nn} .



Рисунок 4. Вероятностные карты при $k = 1$: а), в), д) – K_h ;
 б), г), е) – K_{nn} ;

а), б) выявление поверхностной трещины;

в), г) идентификация поверхностной трещины;

д), е) совместная вероятность выявления и идентификации

В работе [3] для качественной оценки выявления и идентификации поверхностных трещин с помощью спектрального параметра идентификации предложено использовать карту совместной вероятности выявления и идентификации поверхностной трещины на фоне шума. Такая карта получена путем перемножения соответствующих вероятностей и представлена на рис. 4д и 4е для спектральных параметров идентификации K_h и K_{nn} соответственно.

Сравнивая полученные карты совместной вероятности, можно сделать вывод, что предложенная модификация спектрального параметра идентификации (K_{nn}) в целом значительно повышает вероятность обнаружения и идентификации поверхностных трещин на фоне значительного мешающего шума с увеличением амплитуды модуляционного импульса этих поверхностных трещин. В области же малых амплитуд модуляционного импульса для целей идентификации сигнала более целесообразно использование прежнего спектрального параметра идентификации K_h .

Выводы. Предложена модификация алгоритма вычисления спектрального параметра идентификации поверхностных трещин композитных материалов на фоне высокоинтенсивного шума, обусловленного значительной шероховатостью поверхности изделия и наличия мешающих сигналов перекоса датчика при вихретоковой дефектоскопии. Получены следующие результаты:

- лучшими характеристиками выявления обладает модифицированный спектральный параметр идентификации K_{nn} ;
- для идентификации малых по амплитуде модуляционных импульсов лучше использовать спектральный параметр идентификации K_h ;
- для идентификации сигналов, превышающих по амплитуде сигнал перекоса вихретокового датчика, лучше использовать спектральный параметр идентификации K_{nn} ;
- в области значительных амплитуд модуляционного импульса лучшие вероятностные характеристики в целом имеет модифицированный спектральный параметр идентификации K_{nn} ;
- в области малых амплитуд модуляционного импульса лучшими вероятностными характеристиками обладает предложенный еще в [1] спектральный параметр идентификации K_h .

Таким образом, для получения оптимального качества обнаружения и идентификации поверхностных трещин композитных мате-

риалов на фоне значительного шума и мешающих сигналов перекося датчика при вихретоковой дефектоскопии рекомендуется использовать оба спектральных параметра идентификации K_h и K_{nn} . А именно, для обнаружения сигнала поверхностной трещины использовать K_{nn} . При превышении порога, зависящего от уровня шума, необходимо вычислить еще и K_h . Анализируя полученную пару спектральных параметров, можно сделать вывод о типе модуляционного сигнала, его форме и амплитуде и, соответственно, о геометрических параметрах трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хандецкий В.С., Герасимов В.В. Спектральная идентификация сигналов в дефектоскопии композитов с использованием теории статистических испытаний. // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка. 2003. Вип. 10. С. 128-132.
2. Герасимов В.В. Спектральна ідентифікація модуляційних імпульсів різних амплітуд в дефектоскопії композитних матеріалів. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (90) – Дніпропетровськ, 2014. – С. 69-74.
3. Герасимов В.В. Вероятностная спектральная дефектоскопия композитов с использованием оконных функций. // Материалы XV Международной конференции по математическому моделированию МКММ – 2014. Вестник Херсонского национального технического университета. – Выпуск 3 (50) – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 46-50.
4. Хандецкий В.С., Герасимов В.В. Вплив віконних функцій на розпізнавання сигналів в дефектоскопії композитних матеріалів // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. — Вип. 5 (88).— Дніпропетровськ, 2013.
5. Gerasimov V., Khandetsky V., Gnoevoy S. Research of probability characteristics in defect detection of composite materials using wavelet transform. // Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 27, Nos. 3/4, 2006. — P. 210 – 220.