

УДК 620.179.14

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ***В. П. ЛУНИН, М. А. КОМЯГИН***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 620.179.14

DESIGN OF PULSED EDRY CURRENT PROBE FOR TESTING OF MULTILAYER PRODUCTS***V. P. LUNIN, M. A. KOMIAGIN***

Аннотация. Неразрушающий контроль состояния конструкций летательных аппаратов имеет важное значение в авиационной промышленности. Импульсный вихретоковый (ИВТ) метод активно используется для инспектирования многослойных металлических конструкций, в частности, крыла самолета, где дефекты, вызванные усталостью металла, как правило, возникают во внутренних слоях. Такие дефекты практически невозможно обнаружить с помощью традиционных методов контроля, таких как классический вихретоковый или ультразвуковой. Наличие дефектов в алюминиевых конструкциях ИВТ-методом определяется по характеру изменения сигнала приемной катушки во времени (отклика) от контролируемого изделия от поля, созданного импульсом напряжения на входной катушке. В работе проведен ряд численных (конечно-элементных) исследований потенциальных вариантов реализации контроля многослойных алюминиевых конструкций (0,4...4 мм) с помощью накладного преобразователя. Это позволило оценить влияние зазора и магнитной проницаемости используемого ферритового сердечника, а также обосновать выбор некоторых параметров спроектированного преобразователя, влияющих на результат в ходе выполнения контроля: число витков возбуждающей катушки, длину сердечника. Кроме того, на конечно-элементной модели удалось получить подтверждение экспериментально полученным зависимостям сигнала при использовании ИВТ-метода на реальных алюминиевых конструкциях с дефектами.

Ключевые слова: многослойные алюминиевые конструкции, импульсный вихретоковый контроль, проектирование преобразователя, конечно-элементная модель.

Abstract. Non-destructive testing of aircraft structures' condition is of great importance in the aviation industry. The pulsed eddy current (PEC) method is actively used to inspect multilayer metal structures, in particular, aircraft wings, where defects caused by metal fatigue, as a rule, occur in the inner layers. Such defects are almost impossible to detect using traditional inspection methods such as classical eddy current or ultrasonic testing. The presence of defects in aluminum structures by PEC method is determined by the nature of change in receiving coil signal in time (response) from testing sample from the field created by voltage pulse on the input coil. In this work, a number of numerical (finite element) studies of potential options for implementing the testing of multilayer aluminum structures (0,4...4 mm) using an attached transducer were carried out. This made it possible to evaluate the effect of the gap and magnetic permeability of the ferrite core used, as well as to justify the choice of some parameters of designed transducer that affect the result during the test: the number of turns of the exciting coil, the length of the core. In addition, on the finite element model, it was possible to obtain confirmation of experimentally obtained dependences of signal when using PEC method on real aluminum structures with defects.

Keywords: multilayer aluminum structures, pulsed eddy current testing, transducer design, finite element model.

Импульсный вихретоковый (ИВТ) метод является относительно новым методом контроля, который использует импульсное возбуждение тока одной катушки, что вызывает переходный электромагнитный процесс с откликом в приемной катушке. Регистрируемый выходной сигнал зависит как от электрофизических и геометрических параметров контролируемого проводящего изделия, так и от дефектов различных форм и размеров, которые могут быть расположены достаточно глубоко внутри объекта, в частности, во внутренних слоях многослойных алюминиевых конструкций летательных аппаратов. Такие дефекты трудно обнаружить с помощью традиционных методов, таких как классический вихретоковый контроль или ультразвуковой [1, 5, 6].

Повышенное внимание к ИВТ-методу обусловлено его ключевыми потенциальными преимуществами. Первое и главное преимущество заключается в том, что по сравнению с одночастотным ВТК-методом контроля, ИВТ-метод по своей сути имеет широкий диапазон частот, что выгодно использовать для интерпретации результатов контроля на основе вихревых токов из-за частотно-зависимого скин-эффекта. Другим преимуществом является то, что сигналы ИВТ-метода, изменяющиеся во времени, относительно легче интерпретировать, в то время как для интерпретации обычных сигналов ВТК-метода, которые представлены в виде импеданса на комплексной плоскости, требуются особые навыки оператора.

Цель работы – с помощью численной конечно-элементной модели спроектировать импульсный вихретоковый преобразователь для контроля многослойных металлических (в частности, алюминиевых) структур, широко применяемых в авиационной отрасли.

В работе были использованы как двумерная (2D), так и трехмерная (3D) модели в зависимости от геометрии образца, а также формы и положения искусственного дефекта относительно преобразователя. Например, двумерная осесимметричная модель использовалась для моделирования случая бездефектного образца, когда изучалось влияние зазора, электрофизических и/или количественных параметров элементов конструкции преобразователя и контролируемого образца. В случае же с исследованием влияния произвольного по форме и расположению дефекта бралась трехмерная модель. Модели были воспроизведены для различного количества пластин, варьирующегося от 0 (сигнал «без образца») до 10, каждая толщиной 0,4 мм.

На рис. 1 показана конструкция проектируемого преобразователя, содержащая многовитковую возбуждающую катушку и приемную с относительно длинным ферромагнитным сердечником. На рис. 2 приведен результат расчета соответствующей численной двумерной модели процедуры контроля 5-слойной алюминиевой пластины – распределение φ компоненты плотности тока в момент времени, соответствующий пику амплитуды сигнала измерительной катушки. По изменению во времени этой картины можно судить о физике изучаемого явления – переходного электромагнитного процесса в импульсном режиме. Это

дает наглядное представление о вихревых токах, проникающих внутрь проводящих пластин.

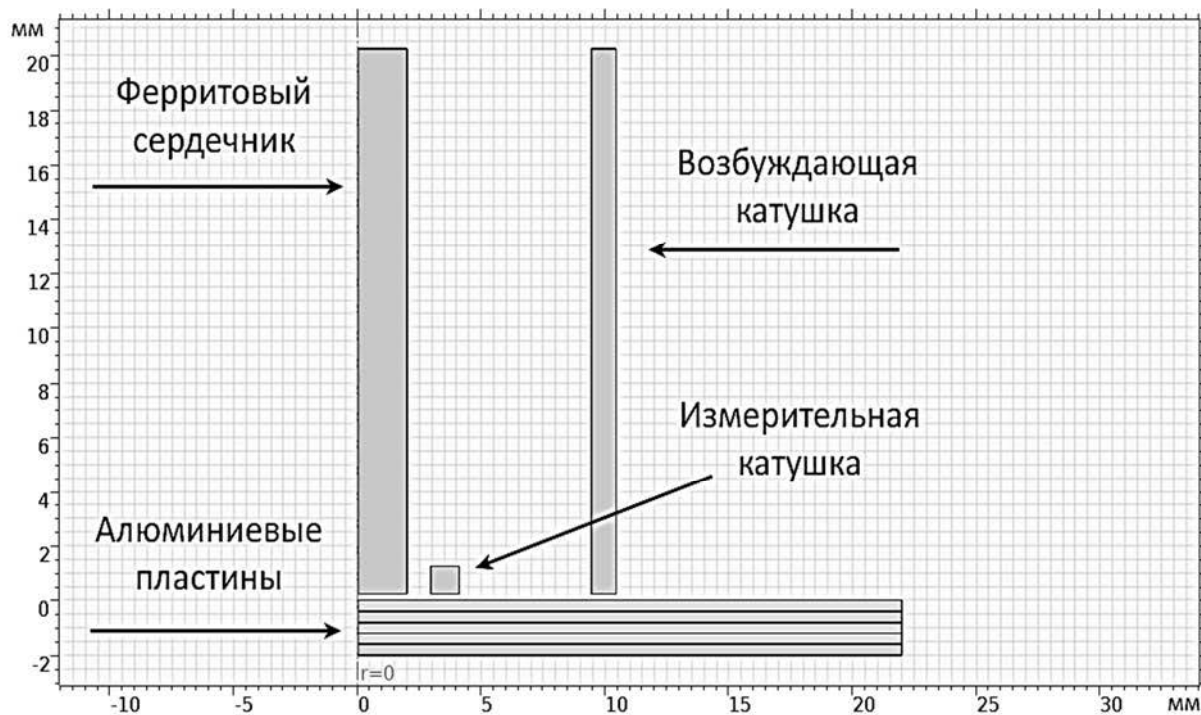


Рис. 1. Осесимметричная (2D) модель проектируемого преобразователя

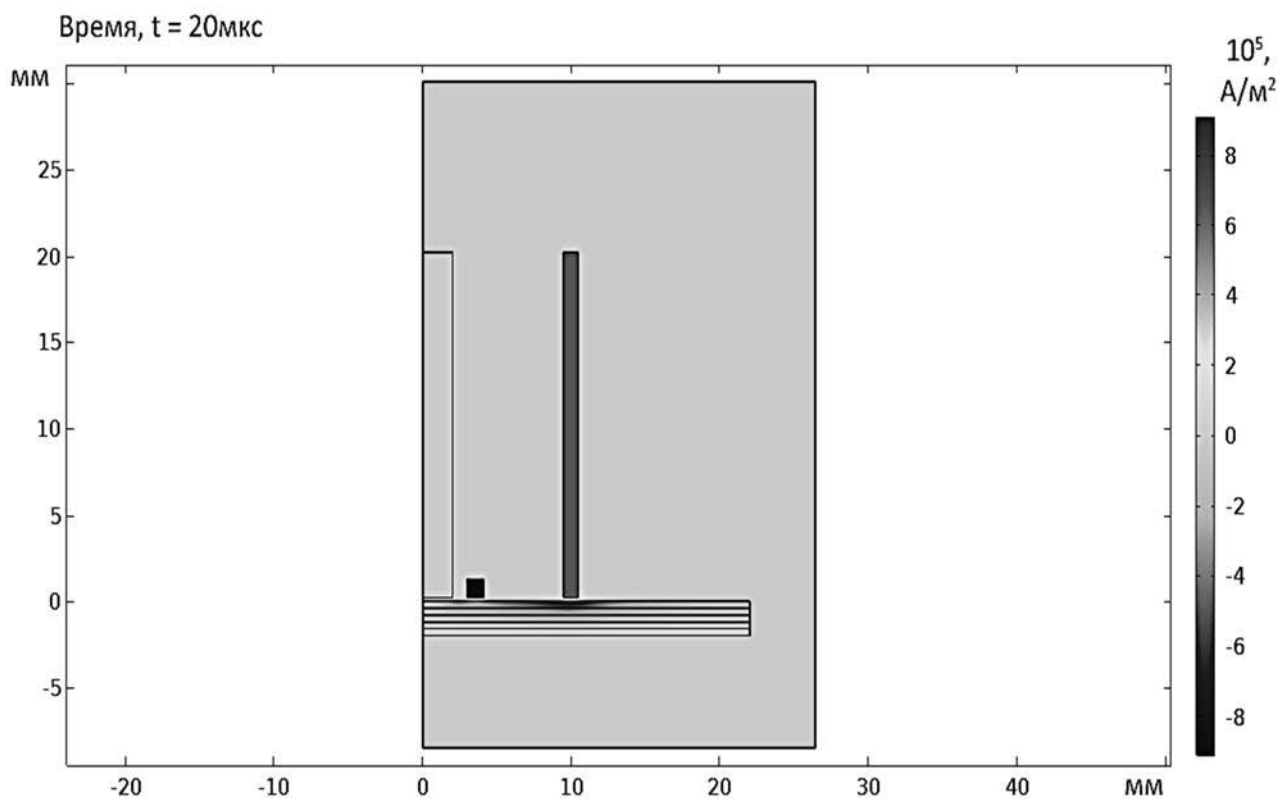


Рис. 2. Распределение ϕ составляющей плотности тока в момент времени достижения максимума приемного сигнала

Типичная форма выходного сигнала приемной катушки приведена на рис. 3, при этом число витков возбуждающей катушки принималось равным 400, 800 и 1600. Для возбуждающей катушки с наименьшим числом витков сигнал имеет наибольшую амплитуду, но и затухает с большей скоростью. Это объясняется соотношением омического и индуктивного сопротивлений первичной цепи, где индуктивность играет доминирующую роль. Для возбуждающей катушки с 1600 витками сигнал имеет наибольшее время релаксации, но и меньшую амплитуду сигнала измерительной катушки. В преобразователе был реализован компромиссный случай – выбран вариант с 800 витками.

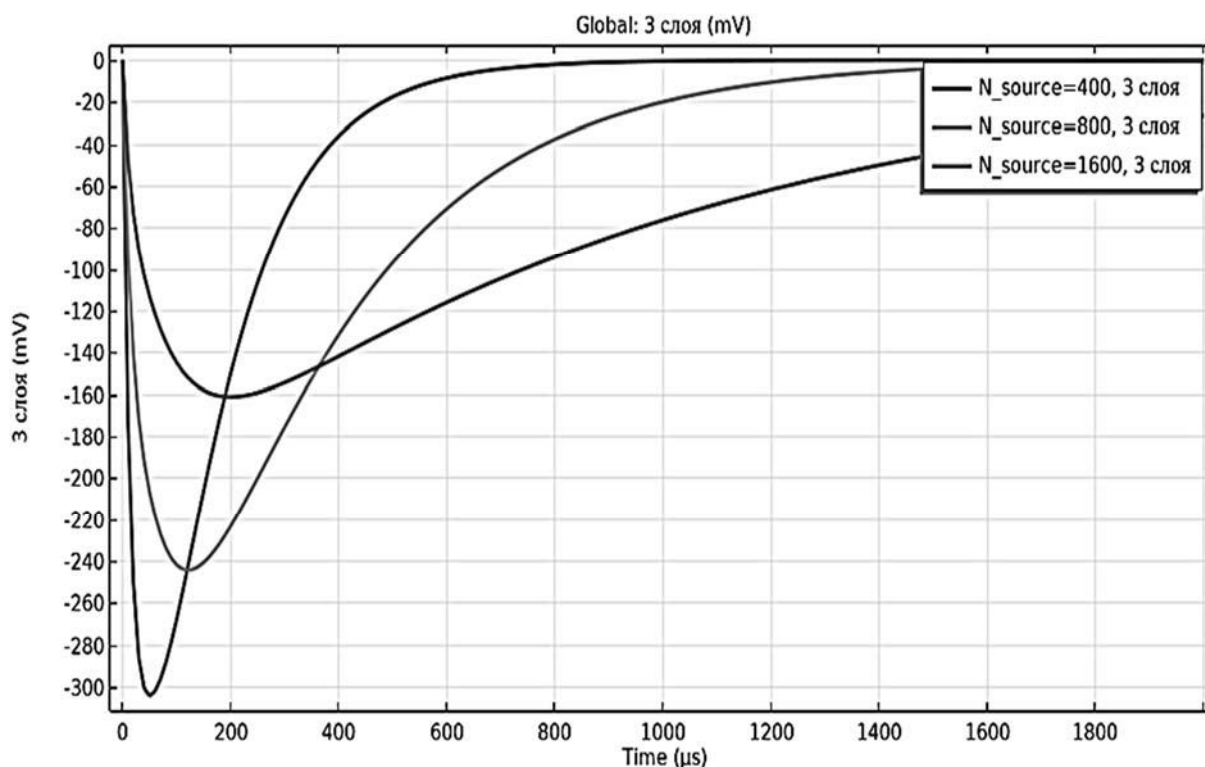


Рис. 3. Исследование влияния числа витков возбуждающей катушки на выходной сигнал

Сравнивались сигналы на выходе преобразователя для трех различных длин сердечника (10, 20 и 30 мм). Сигнал увеличился примерно на 8 % при изменении длины сердечника с 10 до 20 мм и примерно на 5 % с 20 до 30 мм. Более длинные сердечники генерируют поток, который может проникать глубже в образец и создавать большую плотность тока по всему образцу. Однако они делают преобразователь слишком громоздким. Также были исследованы модели с использованием магнитной проницаемости сердечника 1500, 2300 и 3000, но значительного влияния на выходной сигнал не обнаружилось. Поэтому в модели был выбран ферритовый сердечник длиной 20 мм и с проницаемостью 2300.

В ряде экспериментальных работ по исследованию импульсного вихретокового контроля было замечено, что временные зависимости выходного сигнала пересекаются в одной точке при изменении зазора между преобразователем и

образцом [2–4, 7, 8]. Это подтвердилось и в модельных расчетах путем увеличения расстояния между преобразователем и образцом от 0,2 до 2,0 мм (рис. 4). Все кривые, за исключением сигнала «без образца», пересекаются в одной точке (LOI-Lift-off intersection point). Наличие этой особой точки позволяет проводить калибровку преобразователя с учетом отстройки от погрешности измеряемых сигналов, вызванных динамическим изменением зазора в процессе контроля.

Наибольший интерес привлекает возможность получения разностного сигнала («возмущения»), вызванного изменением какого-либо электрофизического или геометрического параметра контролируемого образца, в частности, наличие дефекта. На рис. 5 приведены временные зависимости разностного сигнала при изменении количества слоев образца от 1 до 8, в качестве «опорного» использовался сигнал «без образца». Из рисунка очевидно, что есть хорошая возможность построения калибровочных характеристик относительно ряда информативных признаков (амплитуда, «разброс амплитуд», точка пересечения нуля).

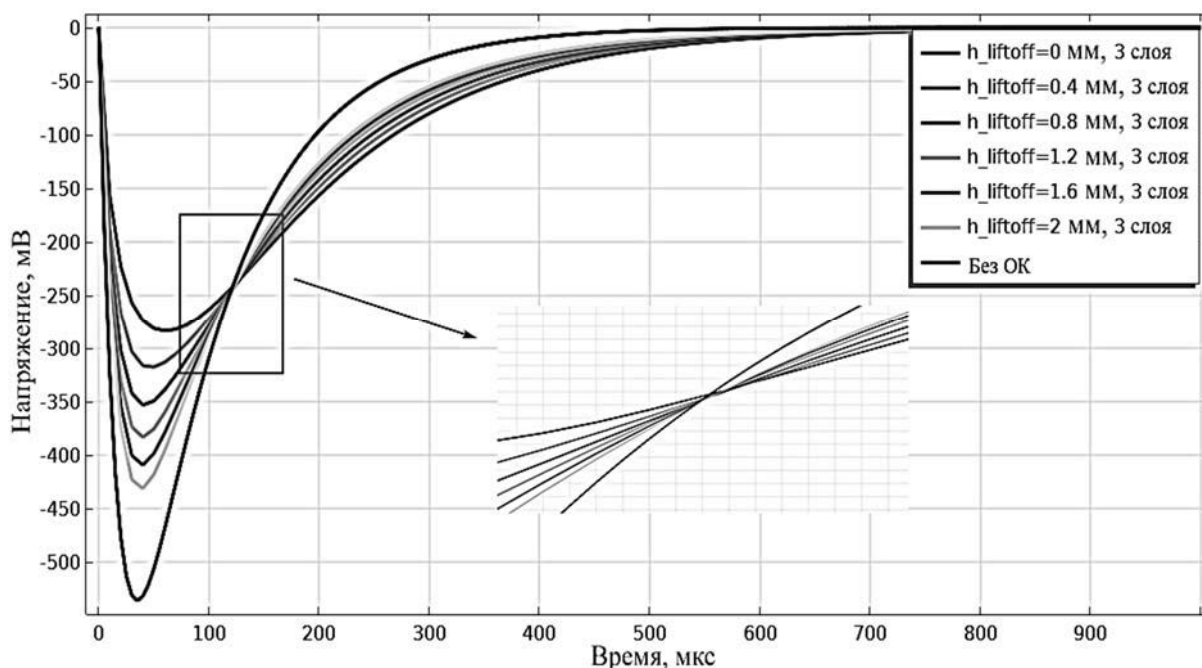


Рис. 4. Временные зависимости выходного сигнала преобразователя при изменении зазора (h_{liftoff})

Для исследования возможности обнаружения и оценки параметров дефектов произвольной формы и расположения создана трехмерная конечно-элементная модель процедуры контроля многослойной конструкции, требующая для своей реализации значительных затрат памяти (не менее 2 ГБ) и времени расчета (до 6 ч). На рис. 6 приведено распределение модуля плотности тока по электропроводящим элементам преобразователя и контролируемого образца. Дальнейшие исследования на 3D-модели должны продемонстрировать потен-

циальные возможности импульсного метода при обнаружении и оценке размеров расслоений, коррозионных дефектов произвольного профиля с помощью спроектированного накладного преобразователя.

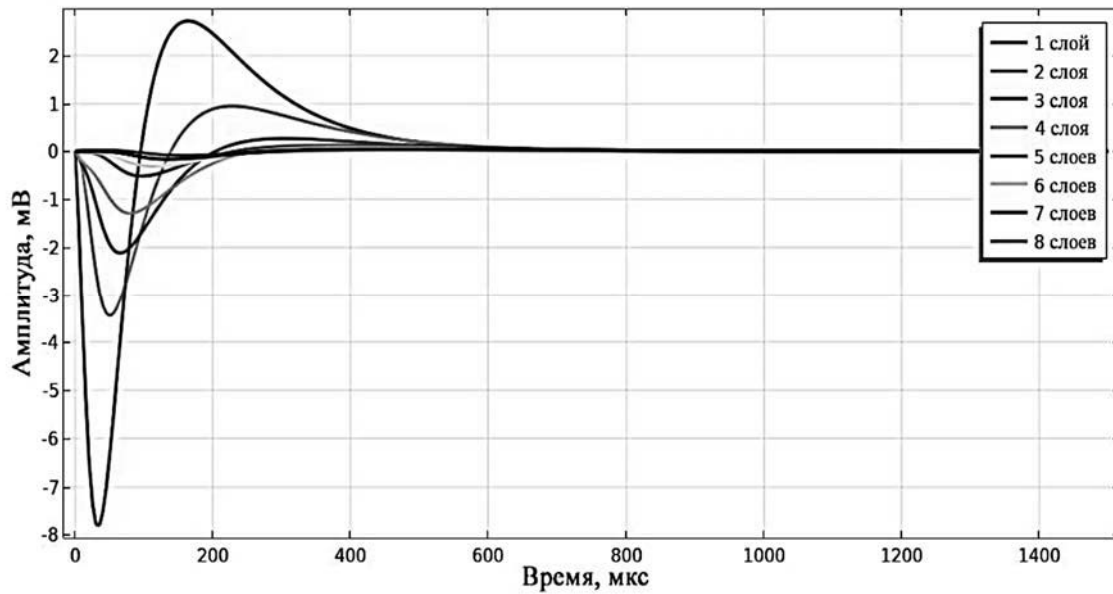


Рис. 5. Временные зависимости разностного сигнала преобразователя при изменении количества слоев образца

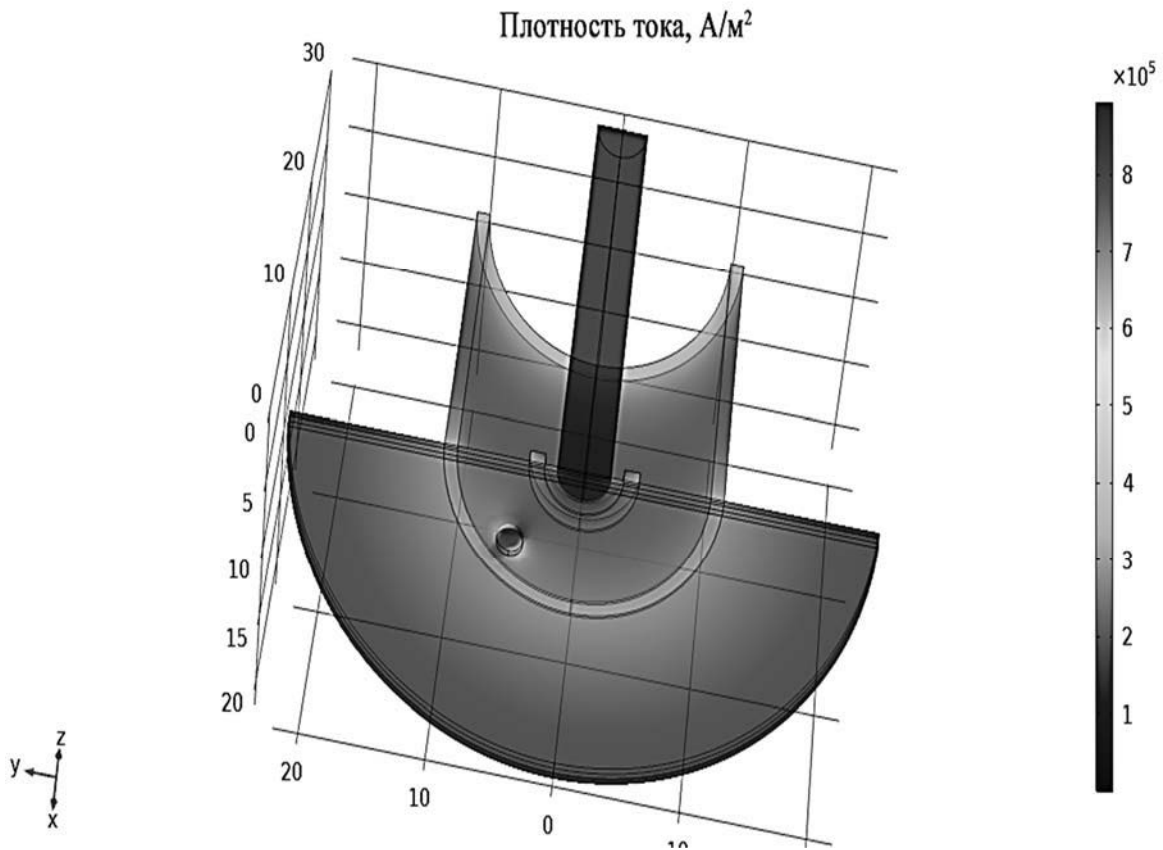


Рис. 6. Трехмерная конечно-элементная модель процедуры контроля многослойной конструкции с дефектом в нижнем слое

Основные выводы. С помощью численной конечно-элементной модели спроектирован импульсный вихретоковый преобразователь для контроля многослойных металлических структур, широко применяемых в авиационной отрасли.

Проведен ряд модельных экспериментов, позволивших провести выбор параметров преобразователя (число витков возбуждающей катушки, магнитная проницаемость и размеры сердечника).

На модели подтверждена гипотеза о наличии общей точки выходного сигнала при изменении зазора между преобразователем и образцом.

Создана трехмерная модель процедуры импульсного контроля с целью оценки возможности обнаружения дефектов в нижних слоях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Ю. К. Федосенко [и др.]; под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 687 с.

2. **Giguere, S.** Pulsed Eddy Current: Finding Corrosion Independently of Transducer Lift-off / S. Giguere, J. M. S. Dubois // Review of Progress in QNDE, 19, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, Melville, NY, 2000. – Vol. 615. – P. 449–456.

3. **Giguere, S.** Pulsed Eddy Current / S. Giguere, B. A. Lepine, J. M. S. Dubois // Technology: Characterizing Material Loss with Gap and Lift-off Variations. – Review of Progress in QNDE, 20, op. cit., 2001. – P. 119–129.

4. **Plotnikov, Y. A.** Defect Characterization in Multilayered Conductive Components with Pulsed Eddy Current / Y. A. Plotnikov, S. C. Nath, C. W. Rose // Review of Progress in QNDE, 21, op. cit., 2002. – P. 1976–1983.

5. **Krause, T. W.** Diffusion of Pulsed Eddy Currents in Thin Conducting Plates / T. W. Krause, C. Mandache, J. H. V. Lefebvre // Review of Progress in QNDE, 27, op. cit., 2008. – P. 368–375.

6. **Cadeau, T. J.** Pulsed Eddy Current Probe Design Based on Transient Circuit Analysis / T. J. Cadeau, T. W. Krause // Review of Progress in QNDE, 28, op. cit., 2009.

7. Finite Element Modelling of Pulsed Eddy Current Signals from Conducting Cylinders and Plates / V. K. Babbar [et al.] // Review of Progress in QNDE, 28, op. cit., 2009. – P. 311–318.

8. **Babbar, V. K.** Finite Element Modeling of Pulsed Eddy Current Signals from Aluminum Plates Having Defects / V. K. Babbar, D. Harley, T. W. Krause // Review of Progress in QNDE, 29, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, Melville, NY. – 2010. – Vol. 615. – P. 337–344.

E-mail: LuninVP@mpei.ru, KomiaginMA@mpei.ru.