

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **047181**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2024.06.18

(51) Int. Cl. **G01M 7/00** (2006.01)

(21) Номер заявки
202292655

(22) Дата подачи заявки
2022.10.17

(54) **СПОСОБ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ И СИСТЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

(31) **2021130953**

(32) **2021.10.22**

(33) **RU**

(43) **2023.04.28**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И.
ЛОБАЧЕВСКОГО" (RU)**

(72) Изобретатель:
**Оболенский Сергей Владимирович,
Зельманов Самуил Соломонович,
Крылов Владимир Владимирович
(RU)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) **RU-C1-2399032
US-A-4061017
US-B2-10379020**

(57) Изобретение касается способа динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия, используется при динамических испытаниях механических конструкций различного назначения и электронного оборудования на динамические механические, электромагнитные и иные динамические воздействия для определения их надежности в процессе эксплуатации. Способ, заключающийся в нагружении оборудования заданными случайными широкополосными вибрационными, ударными и гармоническими нагрузками, в результате проводят испытания объекта в комбинированном режиме, на первом этапе определяются резонансные частоты объекта, а затем устанавливают частотные диапазоны, для замены широкополосной случайной вибрации эквивалентной ей периодической гармонической вибрацией и проводят соответствующие измерения. Технический результат заключается в определении максимально возможной реакции объекта испытаний на нагрузку, отвечающую предельным возможностям объекта в реальных условиях эксплуатации, с помощью дополнительно измеряемой фазо-частотной характеристики объекта, и расчёте величины испытательного сигнала, обеспечивающей максимально возможную реакцию объекта на испытательный сигнал.

B1

047181

047181

B1

Изобретение касается способа динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия, может быть использовано при динамических испытаниях механических конструкций различного назначения и электронного оборудования на динамические механические, электромагнитные и иные динамические воздействия для определения их надежности в процессе эксплуатации.

Различные способы испытаний крупномасштабных конструкций (самолетов, зданий и т.д.), обычных конструкций, а также электронных и механических систем на динамические воздействия широко известны и изложены, в том числе в следующих работах:

"Испытательная техника". Справочник в 2-х т./Под ред. Клюева В.В., т. 2. М.: Машиностроение, 1982, стр. 8, 287-289, 334-337, 422-425;

Бисплингхофф Р. Л. и др. "Аэроупругость". М.: Изд. иностр. лит., 1958, с. 675;

Глудкин О. П., Черняев В. Н. "Технология испытания микроэлементов радио-электронной аппаратуры и интегральных микросхем". М.: Энергия. 1980, стр.179;

Назин В. В. "Новейшие сейсмостойкие конструкции и железобетонные механизмы сейсмоизоляции зданий и сооружений" - М.: Стройиздат, 1993, с. 95-96, рис. 23). Известные способы испытаний направлены на поиск и реализацию разнообразных воздействий на объект испытаний, включающих в себя возбуждение колебаний в испытуемой конструкции на одной или нескольких собственных (резонансных) частотах, воздействие вибрационными, ударными и гармоническими нагрузками, широкополосной вибрацией и поиску на объекте точек установки измерительной аппаратуры. При этом в ряде случаев предварительно проводится получение и исследование амплитудно-частотной характеристики объекта с целью определения его собственных (резонансных) частот.

Из уровня техники известны технические решения, направленные на реализацию задачи динамических испытаний конструкций и систем.

Известен способ динамических испытаний зданий и сооружений (RU 2011174 C1, кл. G01M7/00, опубл. 09.07.1990 г.), в котором предлагается возбуждать колебания испытуемого объекта на собственных частотах воздействием на него последовательности ударных импульсов, которые создаются реактивной силой, по крайней мере, одного устанавливаемого на конструкции импульсного возбудителя, а измерение возбуждаемых колебаний производится с помощью установленных на испытуемом объекте датчиков. К недостаткам данного способа испытаний следует отнести то, что используемое в процессе испытаний воздействие, включающее только собственные (резонансные) частоты объекта, не отражает полностью все особенности его амплитудно-частотной характеристики, а следовательно, не являются в полной степени адекватным всем возможным воздействиям, возникающим в процессе эксплуатации.

Известен способ динамических испытаний крупномасштабных конструкций (RU 2104508 C1, G01M7/02, опубл. 10.02.1998 г.), в котором утверждается, что в указанном ранее патенте RU 2011174, практически невозможно получить точно параметры собственного тона колебаний исследуемой конструкции. С высокой степенью вероятности можно пропустить собственный тон колебаний по той причине, что частоты конструкции ниже частоты возбуждения практически не возбуждаются, и поэтому практически невозможно таким способом определить точно фактические значения периодов собственных колебаний объекта. Величина усилия воздействия в каждом месте приложения задается независимо от формы возбуждаемого тона собственных колебаний вследствие нестационарного испытательного воздействия, искажающего колебания испытуемой конструкции на собственной частоте. Поэтому основной технической задачей, решаемой в патенте RU 2104508, является точное выделение собственного тона колебаний испытуемой конструкции путем воздействия последовательностью ударных импульсов в точках расположения пучностей колебаний возбуждаемого тона и автоматического поддержания условий фазового резонанса при постоянном уровне колебаний. К недостаткам данного способа испытаний следует отнести то, что, улучшая характер испытательного воздействия на объект, этот способ также не решает задачу адекватности этого воздействия характеристикам объекта.

Известен способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществления (RU 2141635 C1, кл. G01M7/00, опубл. 20.11.1990 г.), в котором возбуждение колебаний испытуемого объекта осуществляется так же, как и в предыдущих способах, на собственных частотах. Возбуждение колебаний объекта реализуется воздействием на него последовательностью ударных импульсов, а отклики объекта на эти импульсы суммируют по амплитуде. Динамические характеристики испытуемого объекта определяют по измеренным параметрам суммарных колебаний. Отличие от предыдущих способов состоит лишь в методике измерений динамических характеристик объекта. Поэтому все отмеченные выше недостатки также относятся к этому способу.

Известен способ динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия" (RU 2569636 C1, кл. G01M7/00, опубл. 27.11.2015 г.), в котором осуществляется приложение к объекту испытаний такого испытательного воздействия, которое обеспечивает максимально возможную реакцию объекта испытаний при прочих равных условиях в смысле интенсивности воздействия по сравнению с известными способами. При этом выполняется соответствие между спектральными характеристиками испытательного сигнала и амплитудно-частотной и их фазо-частотной характеристикой объекта испытаний. К недостатку этого способа относится замена оптимального сигнала - воздействия на объект сигналом, имеющим вид зеркального отображения его импульсной характеристики, имеющей

подчас достаточно сложную форму. Практическая реализация достаточно точной формы такого воздействия в большом ряде случаев либо весьма затруднена, либо не представляется возможной. Кроме того, выполнение условий согласования параметров объекта испытаний и параметров испытательного воздействия в одной точке, достигнутые в данном способе, являются условиями недостаточными.

Известен способ динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия (RU 2702930 C1, кл. G01M7/00, опубл. 14.10.2019 г.), который осуществляется путём приложения к объекту испытаний заданной последовательности n ударных импульсов с интервалом T , которые воздействуют поочередно на n точек конструкции и преобразуют создаваемые при этом в различных точках конструкции n механических колебаний в n электрических сигналов вида импульсной характеристики, из которых формируют сигналы их зеркального отображения, которые после усиления подаются на объект в виде испытательных сигналов, параметры которых должны обеспечить выполнение условий согласования с характеристиками объекта испытаний. К недостаткам этого способа относится проблема обеспечения возможности разделения эффектов последствия на выходе объекта от действия ударных импульсов от эффекта реакций объекта на испытательное воздействие в следствие их наложения, что затрудняет получение ожидаемого результата.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому техническому результату к заявляемому изобретению является способ испытаний оборудования на механические воздействия, защищенный патентом RU 2399032 C1, кл. G01M7/00, опубл. 10.09.2010 г., принятый за ближайший аналог (прототип).

Способ по прототипу заключается в нагружении испытуемого объекта заданными случайными широкополосными вибрационными, ударными и гармоническими нагрузками. Вибрационные испытания проводят по методу качающейся частоты, когда частоту вибрации плавно изменяют в заданном диапазоне частот от нижней границы частоты к верхней и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течение определенного времени. Испытания проводят также по методу случайной широкополосной вибрации, когда одновременно возбуждают все резонансные частоты объекта. За критерий подобия реальному процессу принята спектральная плотность мощности виброускорений. Ударные испытания проводят по методу ударных спектров ускорений, когда не важен вид воздействия, а важна реакция на это воздействие. При этом динамические испытания проводят в комбинированном режиме. Во-первых, определяют резонансные частоты объекта испытаний во всем нормируемом частотном диапазоне и устанавливают частотные диапазоны, в которых проводят замену случайной широкополосной вибрации эквивалентной ей гармонической вибрацией и в процессе испытаний проводят соответствующие измерения. Сравнение полученных значений динамических деформаций и перемещений с нормативными значениями позволяет проверить условия эксплуатации. Этот способ отличается от предыдущих тем, что расширяют частотный диапазон спектра воздействия, что является безусловным достоинством данного способа испытаний. Однако следует указать и на его недостатки. Недостатком способа испытаний по прототипу является то, что одна или несколько собственных и резонансных частот, заключенных в широкополосном спектре сигнала воздействия, на которых проводятся испытания, не отражают всех особенностей амплитудно-частотной характеристики конструкции или системы как объекта испытаний. И даже при охвате всего диапазона частот амплитудно-частотной характеристики объекта вышеуказанным испытательным сигналом случайной широкополосной вибрации не достигается полного согласования комплексного спектра испытательного сигнала с параметрами комплексного коэффициента передачи конструкции. Это происходит вследствие того, что поскольку широкополосные вибрационные и ударные нагрузки, используемые в известном способе-прототипе испытаний представляют собой случайные процессы, то как амплитуды, так и фазы составляющих спектра воздействия никак не коррелированы с соответствующими как амплитудами, так и фазами составляющих амплитудно-частотной характеристики испытуемого объекта. Причины указанного несоответствия можно конкретизировать так:

если существуют соотношения в интенсивности между частотными составляющими амплитудно-частотной характеристики объекта испытаний, требующие согласованных соотношений с частотными составляющими спектра воздействия для получения максимального отклика на испытательное воздействие, то случайный характер интенсивности частотных составляющих спектра воздействия прототипа не будет соответствовать этим требованиям вообще и если будет, то с весьма малой долей вероятности, определяемой самой случайностью испытательного процесса;

если существуют фазовые соотношения между частотными составляющими фазо-частотной характеристики объекта, требующие согласованных с ними фазовых соотношений между частотными составляющими спектра воздействия для получения максимального отклика на испытательное воздействие, то случайный характер фазовых соотношений между частотными составляющими спектра воздействия прототипа не будет соответствовать этим требованиям вообще и если будет, то с весьма малой долей вероятности, определяемой самой случайностью этого процесса.

Вследствие несогласованности параметров воздействия с параметрами объекта испытаний а также в силу практической сложности формирования согласованного с объектом испытательного сигнала все испытательные сигналы рассмотренных выше способов-аналогов при прочих равных условиях не могут обеспечить максимально возможный отклик объекта, который мог бы при учёте условий указанного согласования испытательного сигнала с характеристиками объекта, обнаружить в процессе испытаний

наиболее опасные отклонения параметров конструкции. Эти отклонения параметров системы или конструкции могут быть выявлены только либо при использовании согласованного с объектом испытательного сигнала, либо при учете этих условий согласования при выборе величины энергии сигнала воздействия, равной энергии сигнала, характеристики которого были бы согласованы с характеристиками объекта испытаний.

Представленное в перечисленных выше аналогах многообразие способов испытаний конструкций с помощью различных испытательных сигналов свидетельствует о стремлении найти наиболее эффективный способ воздействия на конструкцию или систему с целью получения такого результата испытаний, который должен дать наилучший ответ на вопрос о состоянии объекта с точки зрения его надежности в процессе эксплуатации. При этом во всех способах воздействия на объект варьируется характер сигналов, затрагивающих в различной степени только частотный диапазон его АЧХ, игнорируя при этом фазовые соотношения, т.е. ФЧХ объекта испытаний. Вследствие этого не учитываются условия соответствия амплитудно-частотных и фазо-частотных соотношений испытательного сигнала с параметрами комплексного коэффициента передачи объекта испытаний, только в соответствии с которыми может быть получен максимально возможный отклик или реакция объекта или системы.

Задачей изобретения является создание нового способа динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия, позволяющего вычислить величину оптимального воздействия, обеспечивающую максимально возможную реакцию объекта испытаний на основе учёта параметров фазо-частотной характеристики объекта испытаний, снимаемой дополнительно при выборе гармоник испытательного сигнала.

Оптимальное воздействие, характеризуется выполнением условия согласования амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик испытательного сигнала с параметрами комплексного коэффициента передачи объекта испытаний, как условия получения максимально возможной реакции объекта испытаний.

Это позволит при прочих равных условиях обеспечить возможность обнаружения в процессе испытаний таких опасных отклонений параметров конструкции, которые не могут быть обнаружены известными способами испытаний, использующих случайные широкополосные вибрации и сосредоточенные гармонические резонансные воздействия, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики которых не согласованы с параметрами комплексного коэффициента передачи объекта испытаний.

Технический результат заключается в определении максимально возможной потенциальной реакции объекта испытаний на нагрузку, отвечающую предельным возможностям объекта в реальных условиях эксплуатации с помощью дополнительно измеряемой фазо-частотной характеристики объекта, и расчёте величины испытательного сигнала, обеспечивающей максимально возможную реакцию объекта на этот испытательный сигнал.

Поставленная задача достигается тем, что в способе динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия, на первом этапе которого определяют резонансные частоты объекта во всем нормируемом частотном диапазоне, а затем устанавливают частотные диапазоны, в которых проводят замену широкополосной случайной вибрации эквивалентной ей периодической гармонической вибрацией и в процессе испытаний проводят соответствующие измерения, после установления предварительной величины испытательного сигнала и с целью выявления в процессе испытаний опасных отклонений параметров объекта, которые не могут быть обнаружены известными способами испытаний, вначале напряжение m гармоник в частотном диапазоне испытаний с первого выхода блока гармоник подаётся на вход объекта испытаний, а амплитуды напряжения гармоник со второго выхода блока гармоник поступают на вход первого квадратора и на первый вход второго перемножителя, а также на первый вход блока вычислений комплексного коэффициента передачи объекта испытаний, на второй вход которого с выхода объекта испытаний поступают амплитуды напряжения гармоник, а первый выход блока комплексного коэффициента передачи, содержащий результат вычислений косинусов его фаз, подключён к третьему входу второго перемножителя, а второй выход блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи подключён к второму входу второго перемножителя и к входу второго квадратора, выход которого подключён к входу первого сумматора, а выход первого квадратора подключен к входу второго сумматора, выход которого подключен к первому входу первого перемножителя, ко второму входу которого подключен выход первого сумматора, а выход первого перемножителя соединён входом блока извлечения квадратного корня, выход которого соединен с первым входом блока делителя, а выход второго перемножителя соединён с входом третьего сумматора, выход которого соединён со вторым входом блока делителя, на выходе которого формируется численный коэффициент, на который умножается величина предварительно установленного испытательного входного сигнала, подаваемого на вход объекта испытаний для получения такой величины испытательного сигнала, которая обеспечивает максимально возможную реакцию объекта испытаний, а измерение результата испытаний производится в точке фиксирования сигнала-отклика системы или конструкции.

Доказательство существования способа численного определения максимально возможной при прочих равных условиях величины реакции объекта испытаний по результатам типовых испытаний и её использования для практического получения максимальной реакции объекта за счёт соответствующей кор-

рекции величины испытательного сигнала возможно при использовании наряду с АЧХ объекта дополнительно его фазово-частотной характеристики, т.е. в итоге при использовании комплексного коэффициента передачи объекта испытаний.

Воздействие на систему описывается гармониками комплексного ряда Фурье с коэффициентами (размерность В) с амплитудами:

$$[U_m]_{m=M, -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M}$$

Система описывается комплексной частотной характеристикой $\{G_m\}$, представляющей собой конечное (счётное) множество комплексных коэффициентов (безразмерных) на каждой из дискретных частот m .

$$\{G_m\}_{m=-M, -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M}$$

Отклик системы может быть представлен как комплексный ряд Фурье с коэффициентами (с физической размерностью В):

$$\{S_m = U_m G_m\}_{m=-M, -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M}$$

Максимальное значение отклика системы во временной области на вышеуказанное произвольное воздействие в некоторый момент времени можно записать так:

$$s^{max} = \sum_m |U_m G_m| \cos \varphi_m$$

где φ_m - фазы частотных составляющих комплексного коэффициента передачи системы.

Наиболее возможный максимальный отклик системы s^{opt} может быть вызван оптимальным воздействием. Это воздействие в соответствии с теорией согласованного фильтра, в роли которого рассматривается объект испытаний, имеет вид зеркального отображения импульсной характеристики объекта. В свою очередь комплексный спектр импульсной характеристики с точностью до постоянного множителя представляет собой комплексный коэффициент передачи объекта $\{G_m\}$. Зеркальность импульсной характеристики порождает сопряжённость комплексного коэффициента передачи объекта испытаний G_m^* , амплитуды комплексного ряда Фурье которого находятся так:

$$U_m^{opt} = A G_m^* \text{ где } m=-M, -M+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, M$$

где знак * - комплексное сопряжение, А - произвольный коэффициент (размерности В). Максимально возможная реакция на вышеуказанное оптимальное воздействие определяется как сумма:

$$s^{opt} = \sum_m A G_m^* G_m = A \sum_m |G_m|^2$$

Отсюда следует, что максимальная реакция объекта на оптимальное воздействие определяется только модулем $|G_m|$ спектральной плотности воздействия и не зависит от его фазо-частотного спектра φ_m . Это является следствием того, что взаимные фазовые сдвиги спектральных составляющих оптимального компенсируются фазо-частотной характеристикой согласованного с этим воздействием объекта испытаний. Поэтому все спектральные составляющие оптимального воздействия достигают амплитудных значений в момент времени $t=T$ и, складываясь, дают пик реакции объекта испытаний.

Энергия произвольного входного воздействия на интервале времени T может быть представлена выражением:

$$W = \sum_m |U_m|^2$$

Соответственно, выражение энергии оптимального воздействия имеет вид:

$$W^{opt} = \sum_m |A G_m|^2 = A^2 \sum_m |G_m|^2$$

При этом максимальная реакция системы на оптимальное воздействие примет некоторую вышеуказанную величину s^{opt} .

Приравняем энергии оптимального и неоптимального произвольного воздействий:

$$W^{opt} = W = \sum_m |U_m|^2 = A^2 \sum_m |G_m|^2$$

Из этого равенства может быть определён коэффициент А при заданной энергии входного воздействия:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_m |U_m|^2}{\sum_m |G_m|^2}}$$

Теперь определим, во сколько раз максимальный отклик системы при воздействии оптимального

сигнала превышает максимальный отклик при воздействии произвольного сигнала:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_m |U_m|^2 \sum_m |G_m|^2}}{\sum_m |U_m G_m| \cos \varphi_m}$$

Коэффициент k позволяет при произвольном (не согласованном) испытательном воздействии измерить максимальную величину реакции на это произвольное воздействие, умножить эту величину на коэффициент k , а затем увеличить величину произвольного воздействия так, чтобы максимальная реакция системы достигла величины s^{opt} , т.е. величины максимальной реакции системы при оптимальном воздействии. При этом величина реакции системы будет такой максимально возможной, которая позволяет получить результат испытаний как полноценный и эквивалентный результату при согласованном воздействии в реальных условиях эксплуатации объекта испытаний. Поэтому реализуемая в предлагаемом способе процедура формирования испытательного сигнала превосходит по своему результату способ по прототипу, формируя такой максимум реакции объекта на предлагаемый испытательный сигнал, который способен выявить неожиданности в поведении системы или конструкции в реальных условиях эксплуатации.

С учётом информации об АЧХ объекта, позволяющей в способе-прототипе определить резонансные частоты, и на основе дополнительной информации об объекте испытаний, получаемой в предлагаемом способе измерением его фазо-частотной характеристики, определяется величина максимальной энергии отклика объекта, соответствующая условиям воздействия оптимального сигнала. С учётом этой величины максимальной энергии отклика объекта корректируется интенсивность случайной широкополосной вибрации, используемой в способе-прототипе в качестве испытательного воздействия. В результате достигается максимально возможная при прочих равных условиях реакция объекта испытаний, позволяющая оценить его возможности в реальных условиях эксплуатации.

На фиг. 1 представлена блок-схема операций, реализующих способ динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия.

На фиг. 2 представлена импульсная характеристика экспериментальной системы.

На фиг. 3 представлено зеркальное отображение импульсной характеристики экспериментальной системы.

На фиг. 4 представлена реакция экспериментальной системы на операцию свёртки сигнала, соответствующего импульсной характеристике системы и сигнала её зеркального отображения.

На фиг. 5 представлена амплитудно-частотная характеристика экспериментальной системы.

На фиг. 6 представлена реакция экспериментальной системы на операцию свёртки испытательного сигнала в составе 3-й, 4-й и 7-й гармоник испытательного сигнала с сигналом, соответствующим импульсной характеристике системы.

Конструктивно установка для проведения динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия содержит:

- 1 - блок гармоник;
- 2 - объект испытаний;
- 3 - блок вычислений модулей комплексного коэффициента передачи;
- 4 - второй квадратор;
- 5 - первый сумматор;
- 6 - второй перемножитель;
- 7 - третий сумматор;
- 8 - первый квадратор;
- 9 - второй сумматор;
- 10 - первый перемножитель;
- 11 - блок извлечения квадратного корня;
- 12 - блок делителя.

Блок гармоник 1 представляет собой блок формирования напряжения гармоник в частотном диапазоне, содержащем резонансные частоты объекта испытаний, а также напряжение амплитуд этих гармоник. Причем, мгновенное напряжение гармоник с первого выхода блока гармоник 1 подаётся на вход объекта испытаний 2, а напряжение амплитуд гармоник U_{mk} со второго выхода блока гармоник 1 подаётся на первый вход блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3 объекта испытаний 2, а на второй вход блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3 поступают амплитуды напряжения гармоник с выхода объекта испытаний 2.

В блоке вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3 формируются отчёты его модулей $|G_k| = \frac{U_{mk2}}{U_{mk1}}$ и фаз $\varphi_k = \varphi_{k1} - \varphi_{k2}$ для всех гармоник и соответственно формируются значения $\cos \varphi_k$, необходимые для последующего вычисления корректирующего коэффициента K , приведённого в доказательстве.

С целью формирования для коэффициента K алгоритма его числителя, имеющего вид выражения:

$\sqrt{\sum_m |U_m|^2 \sum_m |G_m|^2}$, и смысл максимально возможной величины отклика объекта при условии согласования его характеристик с характеристиками испытательного сигнала, амплитуды гармоник со второго выхода блока гармоник 1 подаются на вход первого квадратора 8, а с его выхода на вход второго сумматора 9, с выхода которого напряжение подаётся на первый вход первого перемножителя 10.

Величины отсчётов модулей $|G_k|$ коэффициента передачи объекта со второго выхода блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3 подаются на вход второго квадратора 4 и с его выхода на вход первого сумматора 5, с выхода которого на второй вход первого перемножителя 10, с выхода которого напряжение поступает на вход блока извлечения квадратного корня 11, с выхода которого напряжение поступает на первый вход блока делителя 12.

С целью формирования в выражении коэффициента K алгоритма его знаменателя, имеющего смысл максимального отклика объекта при отсутствии согласования характеристик объекта и характеристик испытательного сигнала и вид $\sum_m |U_m G_m| \cos \varphi_m$, а амплитуды гармоник со второго выхода блока гармоник 1 подаются на первый вход второго перемножителя 6, на второй вход которого со второго вы-

хода блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3 подаются величины отсчётов модулей $|G_k|$ коэффициента передачи объекта. На третий вход второго перемножителя 6 подаётся результат вычислений косинусов фаз с первого выхода блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи 3. С выхода второго перемножителя 6 напряжение передаётся на третий сумматор 7, а с его выхода на второй вход блока делителя 12, на выходе которого формируется величина корректирующего коэффициента K , на который умножается первоначально выбранная величина испытательного сигнала.

Совокупность функциональных блоков реализует алгоритм получения коэффициента, позволяющего за счет соответствующего корректирования уровня испытательного сигнала обеспечить получение на выходе объекта испытаний такой его реакции, которая возможна при согласовании характеристик испытательного сигнала с характеристиками объекта испытаний.

Полученная в результате умножения новая величина испытательного сигнала используется при испытании объекта, максимально возможный отклик которого позволит оценить предельные возможности объекта в реальных условиях эксплуатации.

Ниже представлен пример, показывающий возможность реализации предлагаемого изобретения.

Пример.

Блок схема реализации способа испытаний представляет собой комбинацию элементарных арифметических и алгебраических действий, демонстрирующих приведённое математическое доказательство реализации способа.

При моделировании этот элементарный математический аппарат не очень удобен. Поэтому для начала числитель выражения, полученного в доказательстве коэффициента K представим в другой форме, т.е. перейдём от дискретного выражения к непрерывному.

$$k = \frac{\sqrt{\sum_m |U_m|^2 \sum_m |G_m|^2}}{\sum_m |U_m G_m| \cos \varphi_m} \quad (1)$$

В числителе стоит максимальное значение реакции системы на оптимальное воздействие.

На фиг. 1 его величина реализуется блоками: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11. Покажем как эти элементарные операции реализуются при моделировании процесса испытаний на объекте с известной импульсной характеристикой.

Известно, что оптимальный испытательный сигнал формируется на основе зеркальной импульсной характеристики объекта испытаний.

В общем случае эта зависимость имеет вид:

$$u_2(t) = \int_0^t U(\tau) \cdot G[T - (t - \tau)] d\tau \quad (2)$$

где $U(\tau)$ - испытательный сигнал, $G[T - (t - \tau)]$ - импульсная характеристика. Максимальная реакция системы на воздействие имеет место при $U(\tau) = G(\tau)$.

Максимальная реакция объекта испытаний $u_2(t)$ на оптимальный сигнал вида зеркального отображения импульсной характеристики объекта определяется с использованием интеграла свертки в интервале T между импульсной характеристикой объекта $G(\tau)$ и ее зеркальным отображением, сдвинутым на интервал T , вида:

$$u_2(t) = \int_0^t G(\tau) \cdot G[T - (t - \tau)] d\tau \quad (3)$$

Реализация этого условия показана в эксперименте на фиг. 2 и фиг. 3.

Под знаком интеграла в момент $t = \tau$ будет величина $G(\tau)^2$, которая реализуется блоками 1, 2, 3, 8, 9 в части амплитуды воздействия, и блоками 1, 2, 3, 4, 5 в части комплексного коэффициента передачи. Следует заметить, что в блоке 3 комплексного коэффициента передачи предварительно реализуется фазовая

характеристика объекта, о которой говорится в отличительной части, а затем с использованием гармоник воздействия блока 1 определяется комплексный коэффициент передачи. Интеграл представляет собой оператор суммирования, проводимую блоками 9 и 5 над произведением $U(\tau) \times G[T-(t-\tau)]$, имеющим вид $G(\tau) \times G[T-(t-\tau)] = G(\tau)^2$ в момент испытания при $t=\tau$ с учётом операции перемножения блоком 10 и извлечения квадратного корня блоком 11.

В связи с этим максимальный эффект деформации объекта достигается при минимальной по времени реакции объекта на испытательный сигнал в момент $t=\tau$. Этот эффект есть результат свёртки импульсной характеристики с сигналом в момент $t=\tau$. В этом случае вся энергия отклика объекта, локализуясь в малом интервале, обеспечивает максимальный эффект воздействия на объект испытаний. В эксперименте это показано на фиг. 4. Так осуществляется операция определения величины максимальной реакции объекта, если бы он был согласован с параметрами испытательного сигнала.

Таким образом, сравнение числителя выражения (1) и выражения (3) при условии равенства $U_m = G_m$ в момент максимума реакции системы на оптимальный сигнал свидетельствует об их идентичности и позволяет нам провести моделирование любой системы с известной импульсной характеристикой $G(\tau)$ компьютерными средствами, реализуя операцию свёртки.

Фактически используемый для испытаний сигнал, не согласованный с параметрами объекта, даст результат испытаний, реализуемый блоками 1, 2, 3, 6, 7, 12. Его выбор диктуется снимаемой амплитудно-частотной характеристикой, позволяющей выбрать гармоники воздействия, что в эксперименте показано на фиг. 5 и 6. Коэффициент K , представляющий собой отношение оптимального и реального результатов, даст величину проигрыша в выборе величины сигнала, который в несогласованном случае при умножении k на величину неоптимального воздействия позволяет определить величину оптимального воздействия для получения максимально возможной реакции при прочих равных условиях как достижение технического результата.

Результаты эксперимента.

В качестве примера рассматривается система, импульсная характеристика которой $G(t)$ имеет вид функции Баркера-7, дискретизированной 175-ю отсчётами величиной от +1 до -1 на первой части интервала $(0-T)$, содержащего всего 750 отсчётов фиг. 2. Причем, оставшиеся $750-175=575$ отсчётов, расположенных после функции Баркера в интервале $(0-T)$, берутся положительными и равными 0,043 для обеспечения нулевого среднего на всём интервале дискретизации $(0-T)$.

Эту функцию в интервале T мы рассматриваем как непрерывно повторяющуюся с периодом T , что даёт нам право рассматривать полученный с её помощью испытательный сигнал периодическим с дискретным спектром гармоник.

Её зеркальным отображением является оптимальный испытательный сигнал, представленный на фиг. 3.

Рассмотрим результат свёртки функции Баркера, являющейся импульсной характеристикой системы, с её зеркальным отображением, являющимся оптимальным испытательным сигналом. В результате мы получаем реакцию системы на этот оптимальный сигнал фиг. 4.

Максимум отклика системы на оптимальный испытательный сигнал составляет 173,2.

Спектр импульсной характеристики системы, т.е. спектр функции Баркера, с точностью до постоянного множителя представляет АЧХ системы, которая имеет вид на фиг. 5.

Рассмотрим максимальные 3-ю, 4-ю, 7-ю гармоники АЧХ, которые в соответствии с методом частотных испытаний могут быть использованы в качестве испытательных сигналов, как каждый в отдельности, так и в группе. Проведём эксперимент, формируя из суммы этих 3-х гармоник испытательный сигнал с энергией, равной энергии функции Баркера-7 в заданном интервале.

Если в качестве испытательного сигнала использовать совместно 3-ю, 4-ю и 7-ю гармоники, суммарная энергия которых будет равна энергии W_B , то результат их синфазного воздействия как свёртка с импульсной характеристикой системы будет иметь вид на фиг. 6.

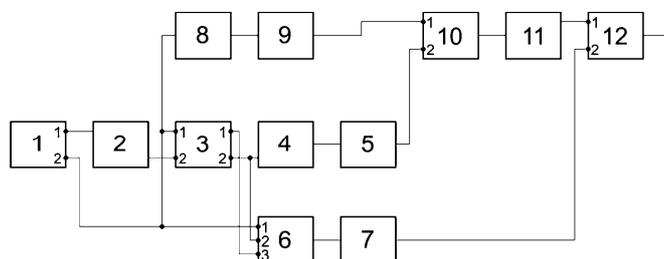
При этом максимум отклика системы на испытательный сигнал составляет величину 80, что для коэффициента K составит по отношению к отклику на оптимальный сигнал 173,2 величину выигрыша.

$$K = \frac{173,2}{80} = 2,16$$

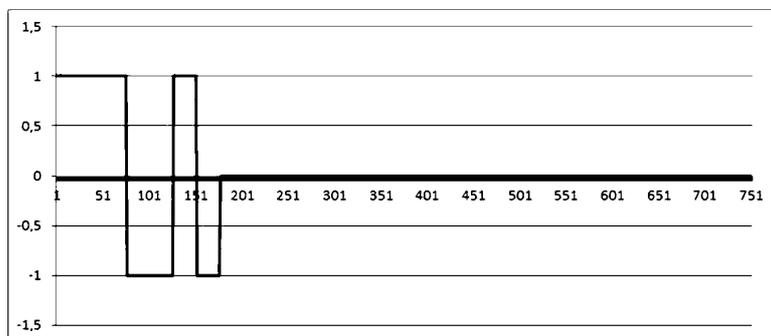
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ динамических испытаний конструкций и систем на механические и электронные воздействия, заключающийся в нагружении оборудования заданными случайными широкополосными вибрационными, ударными и гармоническими нагрузками, при котором испытания объекта проводят в комбинированном режиме, на первом этапе которого определяют резонансные частоты объекта во всем нормируемом частотном диапазоне, а затем устанавливают частотные диапазоны, в которых проводят замену широкополосной случайной вибрации эквивалентной ей периодической гармонической вибрацией и в процессе испытаний проводят соответствующие измерения, отличающийся тем, что после установления предварительной величины испытательного сигнала и с целью выявления в процессе испытаний опасных

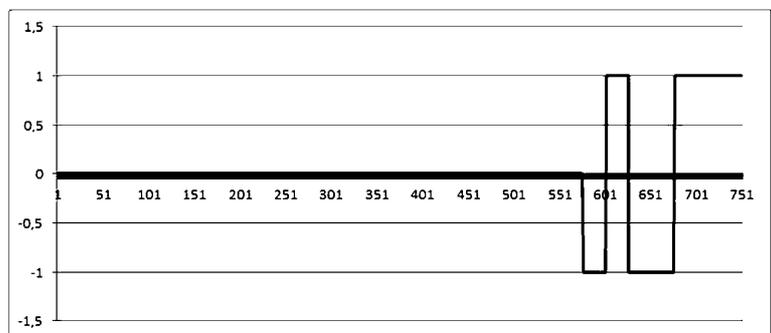
отклонений параметров объекта, которые не могут быть обнаружены известными способами испытаний, вначале напряжение m гармоник в частотном диапазоне испытаний с первого выхода блока гармоник подаётся на вход объекта испытаний, а амплитуды напряжения гармоник со второго выхода блока гармоник поступают на вход первого квадратора и на первый вход второго перемножителя, а также на первый вход блока вычислений комплексного коэффициента передачи объекта испытаний, на второй вход которого с выхода объекта испытаний поступают амплитуды напряжения гармоник, а первый выход блока комплексного коэффициента передачи, содержащий результат вычислений косинусов его фаз, подключён к третьему входу второго перемножителя, а второй выход блока вычислений модулей комплексного коэффициента передачи подключён к второму входу второго перемножителя и к входу второго квадратора, выход которого подключён к входу первого сумматора, а выход первого квадратора подключен к входу второго сумматора, выход которого подключен к первому входу первого перемножителя, ко второму входу которого подключен выход первого сумматора, а выход первого перемножителя соединён входом блока извлечения квадратного корня, выход которого соединен с первым входом блока делителя, а выход второго перемножителя соединён с входом третьего сумматора, выход которого соединён со вторым входом блока делителя, на выходе которого формируется численный коэффициент, на который умножается величина предварительно установленного испытательного входного сигнала, подаваемого на вход объекта испытаний, а измерение результата испытаний производят в точке фиксирования сигнала-отклика системы или конструкции.



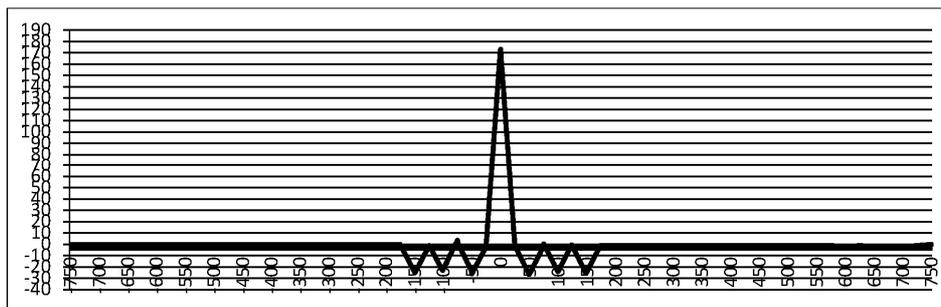
Фиг. 1



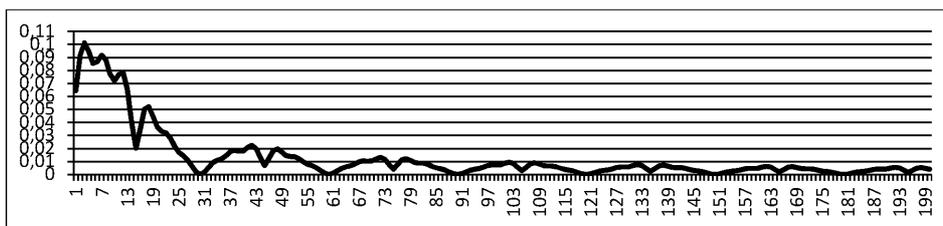
Фиг. 2



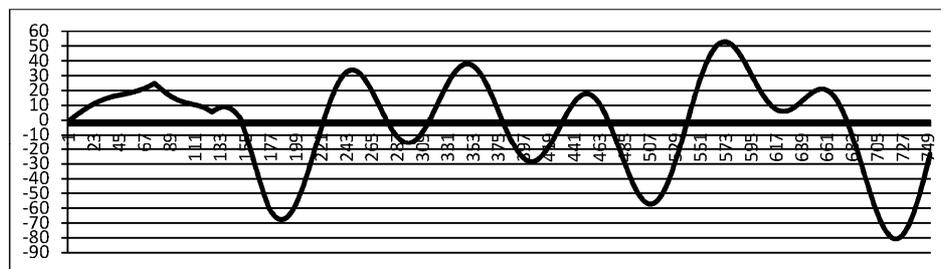
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6