

УДК 621.313.126–868і69.08

## ВИБРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ С ДВУХВАЛЬНЫМИ ДЕБАЛАНСНЫМИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯМИ: ПРИМЕНЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

**В. Ю. Ноженко, Д. И. Родькин**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: viktoriya\_nozhenko@mail.ru

В результате аналитического обзора установлено, что дебалансные вибровозбудители являются наиболее распространенными источниками колебаний вибрационных машин. Приведена классификация дебалансных вибровозбудителей по основным признакам. Рассмотрены вибрационные установки с двухвальными дебалансными вибровозбудителями для генерации колебаний направленного действия. Сформулированы и охарактеризованы основные преимущества и недостатки вибрационных систем с дебалансными вибровозбудителями, работающих в резонансном режиме. Определены направления научных исследований, основанные на явлениях самосинхронизации электромеханических вибровозбудителей: уменьшение колебаний вибросистемы при прохождении зоны резонанса, поддержание кратного синхронного режима, синхронизация неодинаковых и асимметрично расположенных дебалансных вибровозбудителей. Рассмотрены тенденции построения систем управления параметрами колебаний вибрационных машин с дебалансными возбудителями в процессе работы. Представлены сведения о серийно выпускаемых промышленных электромеханических вибраторах различного назначения.

**Ключевые слова:** вибрационная машина, дебалансный вибровозбудитель, вибрации, резонансная зона, амплитуда колебаний, синхронизация.

## ВИБРАЦІЙНІ СИСТЕМИ З ДВОВАЛЬНИМИ ДЕБАЛАНСНИМИ ВІБРОЗБУДЖУВАЧАМИ: ЗАСТОСУВАННЯ ТА НАПРЯМ ДОСЛІДЖЕНЬ

**В. Ю. Ноженко, Д. Й. Родькін**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: viktoriya\_nozhenko@mail.ru

У результаті аналітичного огляду встановлено, що дебалансні віброзбуджувачі є найбільш поширеними джерелами коливань вібраційних машин. Наведено класифікацію дебалансних віброзбуджувачів за основними ознаками. Розглянуто вібраційні установки з двовальними дебалансними віброзбуджувачами для генерації коливань спрямованої дії. Сформульовано та охарактеризовано основні переваги та недоліки вібраційних систем із дебалансними віброзбуджувачами, які працюють у зарезонансному режимі. Визначено напрями наукових досліджень, які базуються на явищі самосинхронізації електромеханічних віброзбуджувачів: зменшення коливань вибросистеми при проходженні зони резонансу, підтримання кратного синхронного режиму, синхронізація неоднакових і асиметрично розташованих дебалансних віброзбуджувачів. Розглянуто тенденції побудови систем управління параметрами коливань вібраційних машин із дебалансними збуджувачами у процесі роботи. Надано інформацію про промислові електромеханічні вібратори, які серійно випускаються для різного призначення.

**Ключові слова:** вібраційна машина, дебалансний віброзбуджувач, вібрації, резонансна зона, амплітуда коливань, синхронізація.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Вибрационные машины и технологии нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в производстве и сельском хозяйстве. В настоящее время выполнение таких технологических операций, как разделение сыпучих материалов, вибротранспортирование, виброшлифование, виброгалтовки, приготовление и уплотнение смесей, погружение свай и многие другие, трудно представить без использования многообразных вибрационных машин, станков, аппаратов, генерирующих колебательные воздействия. Применение их приносит значительный технико-экономический эффект, а также способствует улучшению условий труда.

В качестве источника колебаний виброустановок могут выступать различные типы вибровозбудителей [1, 2], однако наибольшее распространение в технологических целях получили дебалансные вибровозбудители благодаря простоте конструкции и низкой стоимости.

Несмотря на наличие ряда преимуществ по сравнению с другими вибровозбудителями и огромной практики использования, дебалансные вибромаши-

ны характеризуются рядом недостатков, связанных, в первую очередь, с отсутствием возможности управления виброколебаниями в процессе работы.

В связи с этим интерес к данным виброустановкам не иссякает. Так, вопросы автоматизации, исключения ряда недостатков, а также повышения надежности вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями изложены в материалах многих зарубежных и отечественных ученых, поэтому поиск тенденций усовершенствования виброустановок с дебалансными вибровозбудителями является целесообразным, уместным и актуальным.

Целью работы является исследование современных направлений по повышению эффективности функционирования вибрационных машин с двухвальными дебалансными вибровозбудителями.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Начало использования вибрации в различных отраслях наблюдается с XIX столетия, когда начала стремительно развиваться промышленность, а к 1900 г. вибрацию начали применять в горнодобывающей, сельскохозяйственной отраслях, для сушки, сепарирования и транспортирования различных сыпучих материалов. Именно идея с сепарированием позволи-

ла разработать привод с эксцентриком. С этого момента начали появляться вибрационные машины различного назначения, в которых возбуждение колебаний происходит за счет вращения эксцентрика [3].

Понятие «вибрационная технология» появилось в 60-е годы XX столетия в среде специалистов, работающих в области технологического использования низкочастотного спектра колебаний [4], в это же время производство перешло от единичных экземпляров виброоборудования к промышленно выпускаемому серийному оборудованию [3].

На сегодня основным источником колебаний вибрационных машин является дебалансный вибровозбудитель, у которого инерционный элемент, называемый дебалансом, установлен в подшипниках, связан с корпусом вибровозбудителя и не уравновешен относительно оси вращения [1, 5]. В связи с развитием промышленности, расширением областей применения вибрационной техники дебалансные вибровозбудители выпускают различных типов и назначения. Классификация дебалансных вибровозбудителей по основным признакам приведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Классификация дебалансных вибровозбудителей по основным признакам

Так, дебалансные вибровозбудители используются в вибротранспортирующих машинах, виброподъемниках, виброгрохотах, виброконвейерах, вибротрамбовках, виброплощадках, вибрационных машинах для погружения свай и многих других, где необходимы колебания кругового, эллиптического или направленного действия.

Круговые колебания рабочего органа порождают одиночный дебаланс или два дебаланса, вращающиеся синхронно и синфазно в одном направлении. При некоторой разности начальных фаз между вынуждающими силами двухвального вибровозбудителя наблюдаются эллиптические колебания.

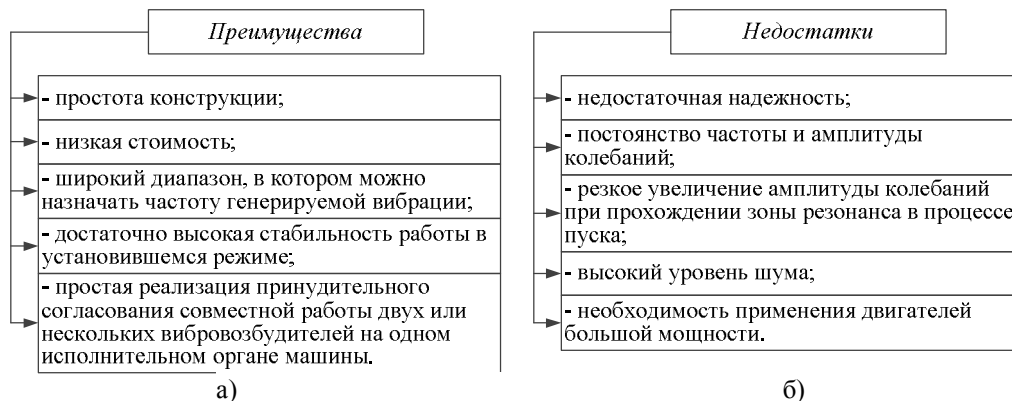


Рисунок 3 – Преимущества и недостатки вибрационных систем с дебалансными вибровозбудителями

Колебания прямолинейно направленного действия являются следствием синхронного вращения двух дебалансов в противоположные стороны, как показано на рис. 2,а. Схема на рис. 2,б с вибровозбудителем кругового движения эквивалентна первой, если идеальные связи 5 обеспечивают прямолинейное движения платформы вдоль оси X.

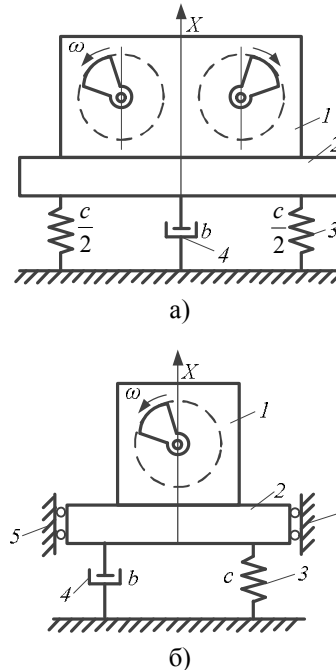


Рисунок 2 – Дебалансные вибровозбудители направленного действия: 1 – вибровозбудитель; 2 – платформа; 3 – пружина; 4 – демпфер; 5 – идеальные связи

Дебалансные вибровозбудители получили широкое применение благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими (рис. 3,а) [1, 5]. Так, электромагнитные вибровозбудители характеризуются большой массой, приходящейся на единицу амплитуды создаваемой силы; у гидравлических вибровозбудителей возможна утечка рабочей жидкости в процессе работы через технологические зазоры между поршнем и цилиндром, уплотнением и штоком; электродинамические вибровозбудители чувствительны к тяжелым условиям эксплуатации.

Тем не менее, наряду с преимуществами дебалансных вибровозбудителей за время их использования выявлены также и недостатки (рис. 3,б).

Следует отметить, что большинство недостатков связано с прохождением резонансной зоны, которое присуще только вибромашинам, работающим в резонансном режиме. Данный режим наиболее применяем, в отличие от дорезонансного и резонансного, поскольку характеризуется малой чувствительностью к изменению нагрузки в стационарных режимах, сравнительно небольшими величинами дебалансных масс и жесткости упругих элементов при достаточной большой амплитуде колебаний рабочего органа. Однако необходимость прохождения зоны резонанса с большой амплитудой колебаний приводит к частым поломкам упругих элементов, разрушению коммуникаций, подходящих к машине, увеличению шума, превышающего допустимые нормы. Также для вибромашин данного типа характерно

повышенное энергопотребление, поскольку двигатели для электропривода (ЭП) виброустановок, работающих в зарезонансном режиме, выбираются с мощностью, необходимой для обеспечения прямого пуска, и в установившемся режиме они работают с существенной недогрузкой. Это связано с возможным «застреванием» частоты вращения ротора двигателя (если его мощность не завышена) вблизи резонансной частоты колебаний, т.е. проявлением эффекта Зоммерфельда [6].

Таким образом, в настоящий момент значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых направлено на устранение в той или иной степени вышеперечисленных недостатков вибрационных установок с дебалансными вибровозбудителями. Основные исследования, направленные на повышение функционирования вибрационных установок, приведены на рис. 4, согласно [7–21], в авторской интерпретации.



Рисунок 4 – Основные направления исследований вибрационных установок с дебалансными вибровозбудителями

Ряд научных трудов [8–10, 13–15] основывается на явлении самосинхронизации механических вибровозбудителей, открытом и изученном И.И. Блехманом [7]. Данное явление возникает при вращении двух или более вибровозбудителей, установленных на общем подвижном основании, при этом они ни кинематически, ни электрически не связаны и приводятся в движение отдельными асинхронными двигателями (АД). Тенденция к синхронному вращению вибровозбудителей передается благодаря вибрации основания, на котором они установлены. Так, даже выключение одного или нескольких двигателей не приводит к выпадению из синхронизма, поскольку синхронизация может быть

настолько сильной, что роторы с выключенными двигателями продолжают вращаться неограниченно долго за счет энергии, которая передается от включенных двигателей на подвижное основание.

Явление самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей целесообразно применять при значительном расстоянии между вибровозбудителями, когда использование кинематического способа синхронизации является затруднительным.

Следует отметить, что виброустановки с самосинхронизирующимися возбудителями также работают в зарезонансном режиме, поэтому в работах [8, 9] проведены исследования пусковых режимов при прохождении зоны резонанса вибрационных

машин с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями, вращающимися в одном направлении с помощью метода прямого разделения движения [22]. Исследования показали, что в случае незначительного сдвига фаз между возбудителями или небольшой разницы между угловыми скоростями процесс пуска вибрационных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями ухудшается, а именно: возрастает амплитуда резонансных колебаний несущего тела и продолжительность переходного процесса (рис. 5). Данное явление объясняется следующим: отстающий вибровозбудитель ощущает последствия прохождения резонансной зоны опережающим возбудителем – при отстающем возбудителе уже имеет место некоторая «раскачка» колебательной системы. При этом чем значительнее сдвиг между роторами, тем опережающий возбудитель будет тормозиться все меньше, а отстающий – все больше. Вследствие этого возрастает амплитуда резонансных колебаний несущего тела и продолжительность переходного процесса.

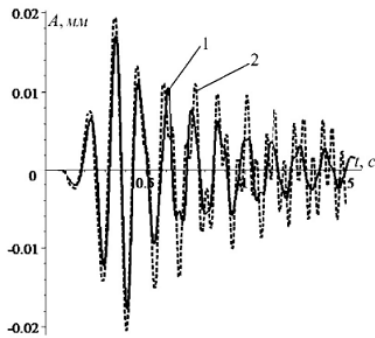


Рисунок 5 – Изменение амплитуды резонансных колебаний несущего тела в случае:  
1 – синфазного вращения возбудителей; 2 – наличия сдвига фаз между возбудителями

Явление самосинхронизации может позволить уменьшить мощность электропривода и величину

пускового тока вибрационных машин путем раздельного пуска электродвигателей [8–10]. При поочередном пуске двух не связанных между собой электродвигателей, а и, соответственно, поочередном прохождении роторами дебалансных вибровозбудителей зоны резонанса возбуждаются вдвое меньшие по амплитуде резонансные колебания, поскольку при неизменной массе несущего тела неуравновешенная масса дебалансов в два раза меньше. Второй электродвигатель включается после достижения первым двигателем номинальной скорости вращения и установления зарезонансного режима работы вибромашины. Таким образом, в колебательной системе возникают меньшие резонансные колебания и на роторы возбудителей воздействуют меньшие тормозные вибрационные моменты в зоне резонанса, что дает возможность уменьшить мощность электродвигателей [10].

На явлении самосинхронизации базируется режим кратной синхронизации, при котором вибровозбудители вращаются со средними угловыми скоростями, кратными друг другу. Данный режим позволяет усилить эффект виброперемещения при выполнении таких трудноосуществимых технологических процессов, как транспортирование пылевых, липких и влажных грузов. Однако в некоторых условиях режим кратной синхронизации может быть неустойчивым. В работе [11] разработан алгоритм управления двухроторной вибрационной установкой для обеспечения стабильного кратного синхронного режима. Предложенный алгоритм исследован при влиянии динамики привода [12] с помощью компьютерного моделирования на основании рис. 6, где приняты следующие обозначения: ПК – персональный компьютер; ЦАП, АЦП – цифроаналоговый и аналого-цифровой преобразователи; БО – блок ограничения величины момента; РТ – регулятор тока; П – силовой преобразователь; ДТ – датчик тока; ДИ, ДП – датчики положения неуравновешенного ротора (датчик импульсов) и платформы соответственно.

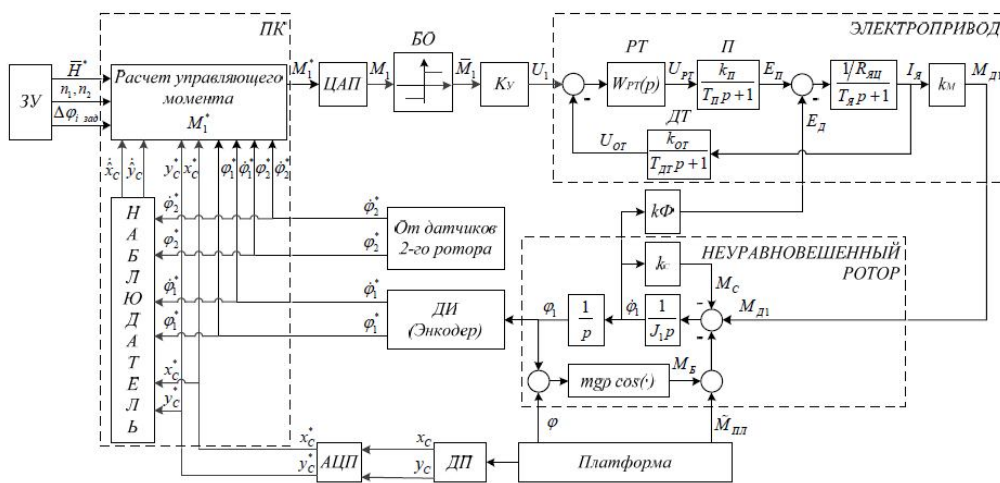


Рисунок 6 – Структура системы управления синхронизацией с учетом динамики привода

При технической реализации алгоритма управления большое значение имеют величины моментов двигателей, требуемые для поддержания стабильного режима кратной синхронизации, которые определяют мощность применяемых двигателей, поэтому в схему (рис. 6) введен блок БО, позволяющий существенно снизить максимальные значения моментов и тока, необходимые для работы в режиме двукратной синхронизации, что дает возможность понизить требования к мощности двигателей [12].

Изучением синхронизации дебалансных вибро-возбудителей резонансных вибрационных систем занимаются зарубежные ученые, о чем свидетельствуют работы [13–15]. Однако следует отметить, что вибровозбудители в данной случае являются неидентичными. Стабильная синхронная работа возбудителей зависит только от структурных параметров системы, а именно от отношения массы дебаланса (при условии  $m_1 \geq m_2$ ) к корпусу машины и отношения расстояния между возбудителем и центром тяжести корпуса машины к эквиваленту радиуса корпуса машины [13].

В работе [14] показано, что устойчивая синхронизация зависит исключительно от отношения масс двух вибровозбудителей к массе вибрационной системы и отношения расстояния между одним возбудителем и центром тяжести жесткой рамы к эквивалентно вращающемуся радиусу колебательной системы относительно ее центра тяжести и не зависит от параметров двух асинхронных двигателей.

При асимметричном расположении двух возбудителей, вращающихся в противоположных направлениях [15], реализация захвата частоты для достижения синхронной работы вибровозбудителей заключается в том, что вращающий момент захвата частоты системы должен быть больше, чем разница между электромагнитными моментами двух двигателей.

В настоящее время по исследованию существующих и разработке новых вибрационных машин созданы целые научные школы. Так, в Кременчугском национальном университете имени Михаила Остроградского на кафедре «Конструирование машин и технологического оборудования» основным направлением научной школы «Исследование закономерностей функционирования динамических систем машин и механизмов» является создание и совершенствование строительных, дорожных и вибрационных машин для изготовления, обработки и уплотнения цементобетонных и асфальтобетонных смесей, которое возглавляет доктор технических наук, профессор А.Г. Маслов. В рамках данного направления разработаны научные основы создания вибрационных машин с полигармоническим возбуждением колебаний для формирования бетонных и железобетонных плоских изделий, которые заключаются в том, что на двухчастотную вибрационную площадку на противоположных торцах подвижной рамы устанавливаются высокочастотный и низкочастотный вибровозбудители колебаний

[23–25]. Результаты экспериментальных исследований показали, что одновременное прикладывание высокочастотных и низкочастотных колебаний повышает эффективность уплотнения бетонной смеси. В результате этого разработаны и внедрены в производство виброплощадки с вертикально направленными, горизонтально направленными и пространственными полигармоническими колебаниями.

В Полтавском национальном техническом университете имени Юрия Кондратюка при кафедре «Строительные машины и оборудование имени Александра Онищенко» сформировалось конструкторское бюро «Вибротехника», работа которого направлена на разработку и внедрение виброформовочных машин для предприятий сборного железобетона [26].

Улучшение функционирования вибрационных систем с дебалансными вибровозбудителями может быть достигнуто не только за счет усовершенствования механической части, а и электрической, причем оптимальными и наиболее эффективными являются комбинированные технические решения.

По мере развития вычислительной техники разрабатываются различные подходы к построению систем управления вибрационными машинами. Так, в работе [16] для управления прохождением через зону резонанса двухроторной вибрационной установки предлагается алгоритм управления, основанный на методе скоростного градиента [27]. Предлагаемый подход основан на использовании эффекта разделения движения на быстрые и медленные составляющие [7], возникающего вблизи зоны резонанса. Принцип действия алгоритма состоит в том, что медленное движение выделяется и «раскачивается» с целью увеличения энергии вращающейся подсистемы. Для выделения медленных движений в алгоритм управления вводится фильтр нижних частот. При малом демпфировании медленные движения затухают также медленно, что дает возможность алгоритму создать ситуацию прохода зоны резонанса, после чего можно отключить «раскачивание» и переключиться на управление постоянным моментом. Таким образом, предложенный алгоритм управления позволяет значительно снизить уровень управляющего воздействия, требуемого для прохождения зоны резонанса. Алгоритм имеет только два настроечных параметра и прост для применения, несмотря на сложное поведение системы. Замкнутая система управления обладает слабой чувствительностью к асимметрии начальных условий установки [16].

Развитие технологий производства в той или иной области способствует развитию оборудования, в частности, вибрационных систем, однако для улучшения их функционирования и обеспечения различных вибрационных режимов необходимо применение систем регулируемого электропривода к вибросистемам с несколькими дебалансными возбудителями. В Институте машиностроения (ЛМЗ–ВГУЗ) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета разработаны имитационные модели многороторных установок

для генерации широкого спектра плоскостных и пространственных колебаний. В [17] рассмотрены принципы управления автоматизированными многодвигательными вибрационными установками, где система управления ЭП виброустановкой разделена на два уровня: верхний – технологический, осуществляющий формирование рабочих режимов виброустановки, и нижний – электромеханический, объектом управления которого являются двигатели. Нижний уровень включает системы автоматического регулирования скоростей (САРС) и положений (САРП) индивидуальных приводов дебалансных роторов. Электромеханический уровень является объектом управления для технологического уровня системы, вырабатывающего задающие воздействия на входы САРС и САРП согласно заложенным алгоритмам управления. Функционально различающиеся уровни системы управления конструктивно могут выполняться из отдельных блоков или в виде объединенного устройства управления с программируемым контроллером.

Повышение эффективности функционирования виброагрегатов с дебалансными вибровозбудителями, а именно управление параметрами колебаний осуществляется путем замены нерегулированного ЭП регулируемым [18–21]. В случае четырехдебалансного вибровозбудителя [18] раздельное управление частотой, амплитудой и направлением вибраций осуществляется с помощью управления угловых положений одной пары дебалансов относительно другой. Кроме того, применение регулируемого ЭП дает возможность создания на его основе замкнутой системы автоматического управления, позволяющей поддерживать требуемые значения не только таких координат вибровозбудителя, как угловая скорость вращения и фаза, но и технологические параметры вибросистемы, например, скорость вибротранспортирования и др. [19].

Также управление параметрами виброколебаний в процессе работы является целесообразным при уплотнении бетонных смесей [28], поскольку при воздействии переменных параметров вибраций возрастают прочностные характеристики бетона, при этом время уплотнения снижается вдвое [29].

В работах [20, 21] предложена система управления направлением и частотой колебаний вибрационной площадки. Управление направлением колебаний осуществляется путем синхронного вращения в противоположные стороны внешнего и внутреннего валов вибровозбудителя. Изменение направления колебаний осуществляется изменением относительного угла рассогласования дебалансов внешнего и внутреннего валов.

На рис. 7 приведена конструктивная схема виброплощадки, где обозначено: 1 – вибростол; 2 – форма с бетонной смесью; 3 – шарниры; 4, 4' – упруго-диссипативные горизонтальные и вертикальные опоры; 5 – основание; 6 – вибровозбудитель; 7 – внешний вал; 8 – внутренний вал; 9, 10 – асинхронные двигатели для внешнего и

внутреннего вала соответственно; 11, 12 – два управляемых силовых преобразователя; 13, 14 – датчики угла поворота; 15 – контроллер.

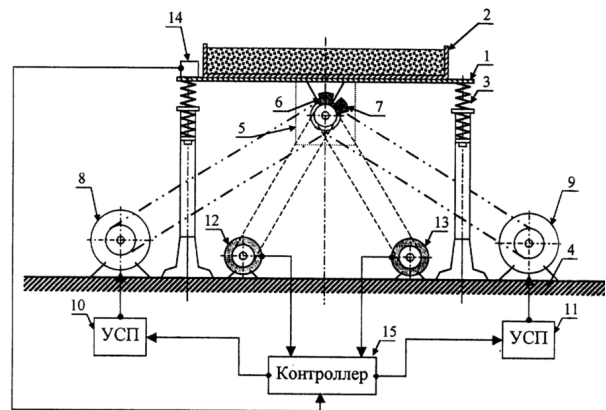


Рисунок 7 – Конструктивная схема виброплощадки

Структура системы включает в себя две подсистемы: двумерную систему управления частотой и направлением вынуждающей силы двухвального дебалансного вибровозбудителя (САУ НЧК ВС) и систему управления углом направления и частотой колебаний бетонной смеси (САУ НЧК БС). Каждый из двух каналов САУ НЧК ВС синтезирован в виде двухканальной системы с одной измеряемой координатой, замкнутой по угловому положению вала вибровозбудителя. Для повышения точности автоматической синхронизации вращения дебалансов синтезирован третий канал, замкнутый по величине рассогласования. САУ НЧК БС структурно включает в себя САУ НЧК ВС, цифровой наблюдатель угла направления колебаний бетонной смеси, и регулятор цифрового наблюдателя обеспечивает сокращение времени перехода от горизонтальных к вертикальным колебаниям на 20 % при сохранении монотонности переходного процесса. Экспериментально доказано, что согласованное управление направлением и частотой колебаний бетонной смеси по критерию стабилизации удельной мощности виброколебаний позволяет уменьшить время уплотнения на 5–7 % по сравнению с раздельным управлением [21].

На сегодня доказательством востребованности, широкомасштабного и целесообразного применения дебалансных вибровозбудителей не только в нашей стране, а и во всем мире являются предприятия-производители вибрационного оборудования:

- Ярославский завод «Красный маяк» (РФ) изготавливает промышленные электромеханические вибраторы марок ИВ и ЭВ широкой номенклатуры, а также виброоборудование различного назначения (табл. 1) [30];

- компания Würges (Германия) производит исключительно вибрационное оборудование в виде вибрационных двигателей различной мощности и размера. Компания Würges считается лидером не-

мецкого рынка и одним из самых инновационных производителей в мире. Вибродвигатели компании Würges работают в качестве вибраторов в строительстве, литейной промышленности или промышленности упаковочных материалов в условиях повышенной температуры, влажности, пыли, под воздействием чрезвычайно больших механических нагрузок [31];

– компания HONKER (Китай) специализируется на производстве дорожно-строительных машин, вибротрамбовок, вибротрамбовок, виброплит [32];

– компания Rheum (Германия) изготавливает просеивающие машины с дебалансными вибровозбудителями, двухчастотные, линейные, круговые просеивающие машины, а также машины для мокрого просеивания [33];

– компания Belle Group (Англия) производит различные типы вибротрамбовок, виброплит, виброреек, вибротрамбовок как с электрическим оборудованием, так и с двигателями внутреннего сгорания [34].

Таблица 1 – Вибраторы и виброоборудование, используемые на практике

Тип	Применение
<i>Вибраторы</i>	
Поверхностные вибраторы	– для уплотнения бетонных смесей и грунтов, транспортирования, выгрузки и просеивания сыпучих материалов; – на вибропитателях, дозировочных установках, вибростолах, виброплощадках и т.п.; – в конвейерах для предотвращения затаривания продукции на поворотах; – на кирпичных блочных мини-установках; – на электрических виброрейках, виброплитах; – в кассетных формовочных установках при изготовлении железобетонных изделий; – на виброситах и грохотах; – в составе вибропрессов для изготовления тротуарной плитки
Вибраторы с направленными колебаниями	– на установках по уплотнению бетонных смесей; – в вибротранспортерах; – при выгрузке и просеивании сыпучих материалов
Вибраторы электро-механические взрывозащищенные	– на машинах и механизмах, применяемых при выполнении вибрационных технологических процессов во взрывоопасных видах производств химической, газовой, нефтеперерабатывающей и смежных отраслей промышленности; – на вибростолах и виброплощадках для уплотнения бетонных смесей и грунтов; – на виброгрохотах для сортировки гранулированных и кусковых материалов, виброситах для просеивания или обезвоживания сыпучих материалов, вибротранспортерах и других вибромеханизмах
Автономные вибраторы	– для лучшей разгрузки или перемещения сырого, липкого, мерзлого сыпучего или жидкого материала
<i>Виброоборудование</i>	
Вибростолы	– для производства изделий из бетона (тротуарной плитки и т.п.); – для испытаний продукции на разрушение; – для уплотнения сыпучих материалов при упаковке
Вибропогружатели	– для погружения и извлечения из грунта металлических или иных элементов различных конструкций (рельсов, труб, уголка, швеллера, бруса и прочего стального проката)
Виброрейки	– для уплотнения и разравнивания бетонной смеси при бетонировании дорог, полов, площадок и иных покрытий
Виброплиты	– для уплотнения различных видов сыпучих и связных дорожных покрытий, таких как песок, гравий, песчано-гравийная смесь, асфальтобетон; – при проведении дорожно-строительных, ремонтных и прочих работ, связанных с уплотнением поверхности на ограниченном пространстве; – для уплотнения бетонной смеси при бетонировании дорог, тоннелей, полов, площадок, садовых дорожек.

**ВЫВОДЫ.** Вибрационные установки с дебалансными вибровозбудителями широко используются в различных отраслях промышленности. Однако применяемый на практике зарезонансный режим работы вибромашин характеризуется рядом недостатков, связанных с прохождением зоны резонанса. Переход резонансной области является сложным электромеханическим процессом, связанным с рез-

ким возрастанием амплитуды колебаний, превышающим в несколько раз амплитуду в установившемся режиме, что приводит к увеличению вибро-мощности и сопровождается частыми поломками упругих элементов, разрушению коммуникаций, подходящих к машине, увеличению шума, превышающего допустимые нормы.

Особенностью вибрационных установок с двухвальными дебалансными вибровозбудителями является невозможность управления параметрами колебаний (частотой, амплитудой, направлением) в процессе работы вибромашины из-за жесткой механической связи между дебалансными валами в связи с использованием нерегулируемых электроприводов.

Рациональным путем устранения указанных недостатков является применение регулируемого привода к вибрационным установкам с дебалансными вибровозбудителями, который бы мог обеспечить безопасное прохождение резонансной зоны и управление параметрами колебаний (амплитудой, частотой и направлением) в рабочем режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вибрации в технике: справочник в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные машины и процессы. – 509 с.
2. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. – М.: Высшая школа, 1977. – 255 с.
3. Лубенская Л.М., Егоров И.В., Волков И.В. История зарождения вибрационного станка // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – Вип. 45. – С. 312–320.
4. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или вибрационные технологии // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5. – Вып. 3/2005 (25). – С. 289–301.
5. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
6. Вибрации в технике: справочник в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2: Колебания нелинейных механических систем. – 351 с.
7. Блехман И.И. Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
8. Ярошевич Т.С., Сыльвонюк А.В., Ярошевич Н.П. Исследование пусковых режимов вибромашин с двумя дебалансными возбудителями // Вісник СевНТУ: збір. наук. праць. – Севастополь, 2013. – Вип. 137. – С. 78–80.
9. Ярошевич Н.П., Силивонюк А.В. О некоторых особенностях динамики разбега вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – Вип. 4. – С. 70–75.
10. Пат. Российская Федерация. Способ пуска вибрационной машины с двумя самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями / Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Ярошевич Н.П.. – № 2516262, опубл. 20.05.2014.
11. Галицкая В.А., Томчина О.П. Пропорционально-интегральный энергоскоростной алгоритм управления кратной синхронизацией роторов вибрационной установки // Адаптивные и робастные системы. – 2012. – Вып. 3/2012 (33). – С. 158–168.
12. Галицкая В.А., Томчина О.П., Терентьева О.В. Управление кратной синхронизацией двухроторной виброустановки с учетом динамики электропривода // Материалы конференции "Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС–2012). – 9–11 октября 2012. – СПб, 2012. – С. 718–721.
13. Chunyu Zhao, Hongtao Zhu, Tianju Bai, Bangchun Wen. Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of linear motion. Part II: Numeric analysis // Shock and Vibration. – 2009. – Iss. 16. – PP. 517–528.
14. Chunyu Zhao, Qinghua Zhao, Yimin Zhang, Bangchun Wen. Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of plane motion // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2011. – Iss. 25/2011 (1). – PP. 49–60.
15. Zhaohui Ren, Qinghua Zhao, Chunyu Zhao, Bangchun Wen. Synchronization of two asymmetric exciters in a vibrating system // Shock and Vibration. – 2011. – Iss. 18. – PP. 63–72.
16. Томчин Д.А., Фрадков А.Л. Управление прохождением через область резонанса при пуске двухроторных вибрационных установок [Электронный ресурс] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – Режим доступа: [http://www.ipme.ru/ipme/labs/ccs/alf/tf\\_pmm07.pdf](http://www.ipme.ru/ipme/labs/ccs/alf/tf_pmm07.pdf)
17. Белокузов Е.В., Шестаков В.М. Принципы управления автоматизированными многоприводными вибрационными установками [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – Вып. 2/2014 (21). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN214.pdf>
18. Осадчий В.В., Батраченко И.В., Мыкытюк Д.В. Регулируемый электропривод дебалансного вибровозбудителя // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 194–197.
19. Садовой А.В., Осадчий В.В. Регулируемый электропривод вибрационных машин // Гірничая електромеханіка та автоматика. – 2013. – Вип. 91. – С. 101–104.
20. Пат. Российская Федерация. Виброплощадка с управляемой частотой и направлением колебаний / Баскаков А.В., Галицков К.С., Галицков С.Я. – № 2003112926/03, опубл. 27.09.2004.
21. Баскаков А.В. Автоматизация виброплощадки для программного управления направлением и частотой колебаний уплотняемой бетонной смеси: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. тех. наук: спец. 05.13.06. – Самара, 2004. – 20 с.
22. Blekhnman I.I. Vibrational mechanics. – Singapore: World Scientific, 2000. – 509 p.
23. Иткин А.Ф., Маслов А.Г. Сравнение теоретических и экспериментальных данных исследований двухчастотных виброплощадок с горизонтально направленными колебаниями // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Вип. 3/2008 (50), част. 2. – С. 166–169.
24. Иткин А.Ф. Теоретические и экспериментальные исследования виброплощадки с двухчас-



тотними просторовими коливаннями // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 5/2010 (64), част. 1. – С. 111–116.

25. Іткін О.Ф. Наукові основи розробки вібраційних машин для ущільнення цементобетонних сумішей: автореф. дис. на здобуття ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.02. – Харків, 2010. – 46 с.

26. Кафедра будівельних машин та обладнання імені Олександра Онищенка [Електронний ресурс] // Інформація с офіційного сайту Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. – Режим доступу: <http://www.pntu.edu.ua/uk/struktura-niversitetu/kafedri.html?id=63>

27. Фрадков А.Л. Схема скоростного градієнта і її застосування в задачах адаптивного управління // Автоматика і телемеханіка. – 1979. – Вип. 9. – С. 90–101.

28. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вибрационная технология бетона. – К.: Будівельник, 1991. – 160 с.

29. Овчинников П.Ф. Виброреология. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.

30. Промышленные вибраторы и виброоборудование. Ярославский завод "Красный маяк" [Электронный ресурс] // Каталог продукции. – Ярославль, 2006. – 49 с. – Режим доступа: [www.vibrators.ru](http://www.vibrators.ru).

31. Продукция компании Würges [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wuerges.de/ru/index.html>

32. Продукция компании Honker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://honker.net.ua/>

33. Продукция компании Rhewum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rhewum.com/ru/glavnaja-stranica.html>

34. Продукция компании Belle Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bellegroup.com/index.php?p=products>

## THE VIBRATION SYSTEMS WITH TWIN-SHAFT UNBALANCE EXCITERS, APPLICATION AND DIRECTION OF RESEARCH

V. Nozhenko, D. Rodkin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: [viktoriya\\_nozhenko@mail.ru](mailto:viktoriya_nozhenko@mail.ru)

As a result, the analytical review found that the unbalance exciters are the most common sources of vibration of the vibrating machines. A classification unbalance exciters on the main grounds is presented. Vibrational installation with two-shaft debalanced exciters to generate of vibrations directed action are examined. The main advantages and disadvantages of vibrating systems with unbalanced vibro-exciter operating in above resonance mode are defined and characterized. Research directions based on the phenomenon of self-locking electromechanical vibrating exciter: reducing vibratory of vibrating system during the passage of the resonance zone, maintaining multiple synchronous mode, synchronization unequal and asymmetrically placed unbalance vibrating exciters are identified. The trends in development of control systems of vibratory parameters of vibrating machines with debalanced exciter in the process are considered. Information about the mass-produced industrial electromechanical vibrators for various purposes are presented.

**Key words:** vibrating machine, unbalance vibrating exciter, vibration, resonance zone, the amplitude of vibrations, synchronization.

### REFERENCES

1. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik* [Vibrations in the technique, reference book] (1981), Vol. 4, Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)

2. Bauman, V.A. and Bykhovskiy, I.I. (1977), *Vibratsionnyye mashiny i protsessy v stroitelstve* [Vibratory machines and processes of the construction], Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)

3. Lubenskaya, L.M., Yegorov, I.V. and Volkov, I.V. (2011), "History of the origin of the vibration machine", *Avtomatyzatsiya vyrobnychikh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, Vol. 45, pp. 312–320. (in Russian)

4. Babichev, A.P. (2005), "Technological application of vibrations and vibration technology", *Vestnik DGTU*, Vol. 5, no. 3, pp. 289–301. (in Russian)

5. Bykhovskiy, I.I. (1968), *Osnovy teorii vibratsionnoy tekhniki* [Fundamentals of the theory of vibration technology], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)

6. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik* [Vibrations in the technique, reference book] (1979), Vol. 2, Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)

7. Blekhman, I.I. (1994), *Vibratsionnaya mekhanika* [Vibrational mechanics], Fizmatlit, Moscow. (in Russian)

8. Yaroshevich, T.S., Sylyvonyuk, A.V. and Yaroshevich, N.P. (2013), "Research of starting with two vibration machines modes unbalance exciters", *Visnyk SevNTU*, Vol. 137, pp. 78–80. (in Russian)

9. Yaroshevich, N.P. and Sylyvonyuk, A.V. (2013), "Some features of the dynamics of start vibrating machines with self-synchronizing inertia exciters", *Naukoviy visnyk NGU*, Vol. 4, pp. 70–75. (in Russian)

10. Blekhman, I.I., Vaysberg, L.A., Vasilkov, V.B. and Yaroshevich, N.P. (2014), *Sposob puska vibratsionnoy mashiny s dvumya samosinkhroniziruyushchimisya debalansnyimi vibrovobuditelyamy*, Patent RU 2516262, published 20.05.2014. (in Russian)

11. Galitskaya, V.A. and Tomchina, O.P. (2012), "Proportional-integral control algorithm energoskorostnoy multiple timing rotor vibration machine", *Adaptivnyye i robstnyye sistemy*, Vol. 3, no. 33, pp. 158–168. (in Russian)

12. Galitskaya, V.A., Tomchina, O.P. and Terentyeva, O.V. (2012), "Control multiple synchronization by double vibratory considering the dynamics of the actuator", *Materialy konferentsii "Upravleniye v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh" (UTEOSS-2012)*, [Proceedings of the conference "Management in technical, ergatic, organizational and network systems"], St Petersburg, October 9–11, 2012, pp. 718–721. (in Russian)
13. Chunyu Zhao, Hongtao Zhu, Tianju Bai and Bangchun Wen (2009), "Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of linear motion. Part II: Numeric analysis", *Shock and Vibration*, Vol. 16, pp. 517–528.
14. Chunyu Zhao, Qinghua Zhao, Yimin Zhang and Bangchun Wen (2011), "Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of plane motion", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, pp. 49–60.
15. Zhaohui Ren, Qinghua Zhao and Chunyu Zhao, Bangchun Wen, (2011), "Synchronization of two asymmetric exciters in a vibrating system", *Shock and Vibration*, Vol. 18, pp. 63–72.
16. Tomchin, D.A. and Fradkov, A.L. (2007), "Management passage through the resonance region at the start of the two rotary vibrating machines", *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, available at: [http://www.ipme.ru/ipme/labs/ccs/alf/tf\\_pmm07.pdf](http://www.ipme.ru/ipme/labs/ccs/alf/tf_pmm07.pdf). (in Russian)
17. Belokuzov, Ye.V. and Shestakov, V.M. (2014), "Principles for control of automated multi-drive vibration installations", *Internet-zhurnal "Naukovedeniye"*, Vol. 2, no. 21, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN214.pdf>. (in Russian)
18. Osadchiy, V.V., Batrachenko, I.V. and Mykytyuk, D.V. (2012), "Adjustable electric drive of unbalance vibroexciter", *Electromekhanichni i energozberigayuchi systemy*, Vol. 3, no. 19, pp. 194–197. (in Russian)
19. Sadovoy, A.V. and Osadchiy, V.V. (2013), "Regulated electric vibrating machines", *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, Vol. 91, pp. 101–104. (in Russian)
20. Baskakov, A.V., Galitskov, K.S. and Galitskov, S.Ya. (2004), *Vibroploshchadka s upravlyayemoy chastotoy i napravleniyem kolebaniy*, Patent RU 2003112926/03, published 27.09.2004. (in Russian)
21. Baskakov, A.V. (2004), "Vibroplatform automation to programmatically control the direction and the oscillation frequency of the sealed concrete mixture", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.13.06, Samara. (in Russian)
22. Blekhman, I.I. (2000), *Vibrational mechanics*, World Scientific, Singapore.
23. Itkin, A.F. and Maslov, A.G. (2008), "Comparison of theoretical and experimental studies of two-frequency vibration data platforms with horizontal vibrations", *Visnyk KDPU imeni Mykhayla Ostrohradskogo*, Vol. 3, no. 50, part 2, pp. 166–169. (in Russian)
24. Itkin, A.F. (2010), "Theoretical and experimental study of the vibration platform with dual-frequency spatial variations", *Visnyk KDU imeni Mykhayla Ostrohradskogo*, Vol. 5, no. 64, part 1, pp. 111–116. (in Russian)
25. Itkin, O.F. (2010), "The scientific basis for development of vibration machines for sealing cement mixtures", Abstract of D.Sci. (Tech.) dissertation, 05.05.02, Kharkiv. (in Ukrainian)
26. *Kafedra budivelnykh mashyn ta obladnannya imeni Oleksandra Onyshchenka* [Department of construction machinery and equipment of the Alexander Onishchenko], Official site of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, available at: <http://www.pntu.edu.ua/uk/struktura-universitetu/kafedri.html?id=63>. (in Ukrainian)
27. Fradkov, A.L. (1979), "Speed-gradient scheme and its application in adaptive control tasks", *Avtomatika i telemekhanika*, Vol. 9, pp. 90–101. (in Russian)
28. Gusev, B.V. and Zazimko, V.G. (1991), *Vibratsionnaya tekhnologiya betona* [Vibration technology of concrete], Budivelnik, Kiev. (in Russian)
29. Ovchinnikov, P.F. (1983), *Vibroreologiya* [Vibrorheology], Naukova dumka, Kiev. (in Russian)
30. *Promyshlennyye vibratory i vibrooborudovaniye. Yaroslavskiy zavod "Krasnyy mayak"* [Industrial vibrators and Vibration. Yaroslavl factory "Krasnyy mayak"] (2006), *Katalog produktsiyi*, available at: [www.vibrators.ru](http://www.vibrators.ru). (in Russian)
31. *Produktsiya kompanii Würges* [The company's products Würges], available at: <http://www.wuerges.de/ru/index.html>. (in Russian)
32. *Produktsiya kompanii Honker* [The company's products Honker], available at: <http://honker.net.ua/>. (in Russian)
33. *Produktsiya kompanii Rhewum* [The company's products Rhewum], available at: <http://www.rhewum.com/ru/glavnaja-stranica.html>. (in Russian)
34. *Produktsiya kompanii Belle Group* [The company's products Belle Group], available at: <http://www.bellegroup.com/index.php?p=products>. (in Russian)

Стаття надійшла 18.09.2014