

- образовании, науке и промышленности.-2000. МАН ВШ. Санкт-Петербург -С.53-55.
11. Reitz J.R., Davis L.C. Force on rectangular coil moving above a conducting slab. //J. Appl. Phys. -1972. -V.43, №4. -P.15-47.
12. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А., Кулиненко В.О. Устойчивое электродинамическое подвешивание тел без использования сверхпроводников. //Письма в ЖТФю-1990. -Т. 18, №16. –с.4-6.

УДК 538.3:621.313.3

О ВОЗМОЖНОСТИ САМОСТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛЕВИТАЦИИ

*А.А. Буряк, н.с, В.А. Дзензерский д.т.н., проф., Э.А. Зельдина, к.т.н., с.н.с,
И.И. Финагина, м.н.с.*

*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины,
Днепропетровск*

Хорошо известным и установленным фактом в теории электродинамической левитации является неустойчивость вертикальных колебаний движущегося магнита [1, 2].

Как показали исследования, неустойчивость вертикальных колебаний не может быть устранена без использования дополнительных механических демпфирующих устройств. Однако, такие устройства [3] увеличивают массу электродинамической системы, что неизбежно приводит к дополнительным энергетическим затратам, а также усложняют ее конструкцию. В работе [4] была предпринята попытка изменения частотных и амплитудных характеристик вертикальных колебаний за счет увеличения числа сверхпроводящих токовых контуров без применения вторичного демпфирования.

Целью данной работы является исследование принципиальной возможности самостабилизации вертикальных колебаний экипажа высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) без использования механических демпфирующих устройств. Авторы, на основе общепринятых моделей, попытались применить энергетический подход.

Экипаж, рассматриваемый как объект, аккумулирующий энергию относительно путевого полотна, должен, в принципе, точно двигаться по заданной траектории. Даже случайные малые отклонения от траектории превращают перемещение экипажа в сложное движение с переменной компонентой по той координате, по которой произошло возмущение. Гашение поперечных движению ускорений, получаемых от случайных (конструкционных дефектов) или от регулярных (дискретности путевой укладки) воздействий, представляет проблему, так как при левитации экипажа любое возмущение приводит к незатухающим колебаниям. Особенно опасны низкочастотные колебания. Высокочастотные колебания достаточно быстро рассеиваются в массивных деталях экипажа.

Теоретические проблемы, связанные с устойчивостью движения бесконтактного экипажа ВСНТ, усложняются пропорционально степени идеализации силовой системы подвеса. Это в значительной степени объясняется тем, что переход от реального физического устройства к модельному аналогу происходит в два этапа.

Существуют общепринятые приемы упрощения магнитных систем. К ним относится, в первую очередь, отображение габаритов контуров индуктивности, как путевых обмоток, так и бортовых магнитов, простыми геометрическими фигурами. Для этого множество связанных витков обмоточного жгута заменяется одним элементарным витком. При таких упрощениях теряется реальное распределение токов по всему объему жгута. В одновитковом путевом контуре течет однородный ток, по величине равный результирующему значению всех индуцированных токов. Реальное дискретное и неравномерное распределение токовых вихрей сложной топографии представляется как токовый трек. Следовательно, из описания и исследования выводятся процессы, от которых зависит величина энергии, рассеиваемой в путевом контуре на самом деле. При реальном взаимодействии в обмоточном жгуте возбуждаются разнонаправленные вихри, которые можно суммировать согласно правилу аддитивности однокачественных компонент одного процесса. Тогда интегральная интенсивность тока будет достоверным аналогом интенсивности параметра. Процесс тепловой диссипации электрической энергии зависит от объемного распределения вихрей. Энергия не пропорциональна интегральному току, а складывается из порций тепловых потерь на каждом вихре независимо от его ориентации в объеме проводника. Сложная картина путей, ориентаций и интенсивностей вихревых токов отображается, как правило, так, что при этом занижается суммарная длина путей, проходимых токами и их действительные интенсивности.

Известны некоторые разработки методики учета этих характеристик переходного процесса [5]. На наш взгляд, занижение в физической модели значения некоторых «второстепенных» подробностей процесса для «строгости» или же ради упрощения математической модели может стать причиной неточных интерпретаций получаемых результатов.

Как правило, в теоретических исследованиях систем ВСНТ с дискретной путевой структурой для моделирования силового узла используется одноточечная модель, представленная в виде рамки с током, летящей над дискретной цепочкой короткозамкнутых токовых контуров. Прямое перенесение результатов, полученных с использованием этой модели, на реальное транспортное средство ставит конструкторов в трудное положение, а, именно, вертикальные колебания экипажа оказываются неустраняемыми. Следовательно, обеспечение устойчивого движения экипажа, становится проблемой, требующей усложнения конструкции транспортного средства, например, разбиения кузова на две части (тележку и салон) [6] и фактического перенесения рессорной группы из кинематической схемы колесных транспортных средств. На наш взгляд, некорректность использования механических демпферов для гашения колебаний экипажа ВСНТ заключается

в отсутствие опорного тела, которое является неотъемлемой частью железнодорожного колесного транспорта. Схема опирания в обычных железнодорожных системах построена так, что ходовая тележка имеет жесткую связь с путевым полотном и поэтому массу ее можно считать неограниченно большой. Для свободной левитации экипажа ВСНТ, при соизмеримости масс салона и ходовой тележки каждая часть вагона колеблется со своей собственной частотой. Диссипативные элементы при этом передают колебания между частями вагона, что при отсутствии механической связи с путевой структурой может привести к режимам, при которых не только ухудшается комфортность в салоне, но даже возникает опасность повреждения деталей транспортного средства.

В данной работе рассматривается система электродинамической левитации с дискретной путевой структурой, силовая часть которой содержит только магнитные и индуктивные элементы без механических демпферов.

Физическая модель для исследования устойчивости движения такой системы основана на учете и использовании эффектов диссипации энергии, генерируемой в виде вихревых токов в путевых контурах магнитным полем бортовых катушек. Вихревые токи в путевой структуре наводятся при движении магнита относительно полотна, то есть при любых изменениях плотности магнитного потока, пересекающего плоскости путевых контуров. Поскольку путевые контуры имеют нормальную проводимость, то энергия вихревых токов рассеивается на сопротивлении материала контуров и превращается в тепловую. Преобразованная часть энергии экипажа выводится из баланса электромагнитного силового взаимодействия. Уменьшение энергии системы выражается в виде появления тормозящей силы. Если при движении экипажа над дискретной путевой структурой возникают колебания его в вертикальном направлении, то они добавляют переменную компоненту изменений магнитного потока, связанную с поперечными периодическими смещениями источника магнитного поля. Это движение экипажа сопровождается теми же эффектами диссипации, что и продольное перемещение.

Данная физическая модель построена так, чтобы стало возможным выделение из общего процесса только колебательного движения экипажа в вертикальной плоскости. Теоретически возможно разделить движение бортового магнита на продольное невозмущенное перемещение вдоль оси x и на вертикальное колебательное по оси z перпендикулярное продольной скорости. Основанием для этого служат следующие соображения. При невозмущенном движении на фиксированной высоте $h_0 = \text{const}$ в каждой точке продольной траектории сила левитации $FL = mg$. При возмущенном по направлению z движении клиренс $h = f(z)$, а $FL = F(z)$. В этом случае сила левитации $FL = mg$ только в тех точках амплитуды $z(t)$, где $z(t) = h_0$. Траектория движения определяется такими характеристиками системы, как собственная частота и жесткость магнитных связей между ее элементами. Следовательно, вертикальное движение бортового магнита имеет характер вынужденных колебаний, возбуждаемых переменной силой, перпендикулярной к вектору скорости его перемещения, и может рассматриваться отдельно от него. Выделение колебательного движения дает возможность рассмотреть отдельно

переходные процессы, противодействующие изменению магнитного потока бортового источника. Поскольку эти процессы выражаются в форме изменения наводимых в путевой структуре токов, то можно определить ту часть диссипативных потерь, которые связаны только с вертикальными колебаниями.

Продольное движение на высоте h_0 с заданной скоростью выводится из рассмотрения. В физической модели это будет означать (рис.1), что токовый контур 1, имитирующий сверхпроводящий магнит, удерживается виртуальным силовым устройством 2 на расстоянии h_0 от трех короткозамкнутых путевых контуров 3, которые покрываются проекцией бортового контура 1. Силовое устройство может сообщать контуру 1 периодические смещения из положения $z(0) = h_0$, имитирующие движение по вертикальной траектории $z = z(t)$. Имея расчетную зависимость $z = z(t)$, и зная размещение элементов системы, можно получить численные характеристики для токов, индуцированных в путевых катушках.

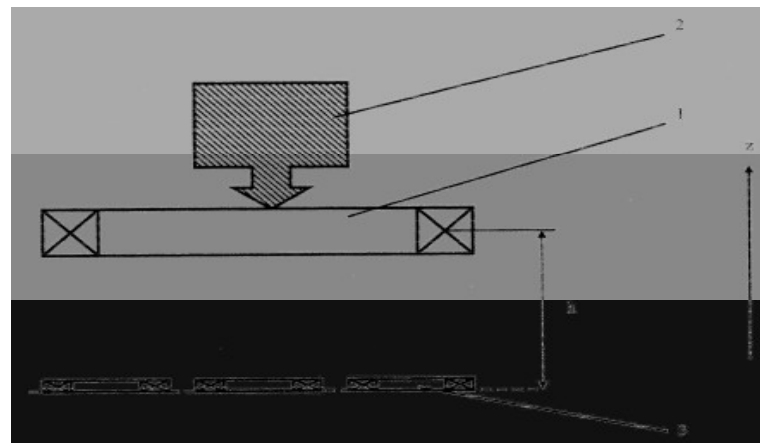


Рис.1. Физическая модель электродинамического подвеса

Заметим, что строгая адаптация бортовой магнитной системы к поверхности путевой структуры для транспортного средства с электромагнитным принципом подвеса, ограничивает возможности использования амортизационных реакций конструкции. Применить эту физическую модель можно только для электродинамического подвеса, клиренс которого допускает амплитуду колебаний 0,05-0,1 м и, следовательно, возможна самостабилизация.

В пределах этой модели была получена обратная задача. Магнитный поток от бортового контура, приводимого в движение силовым устройством, имитирующей силовую функцию, возбуждает в путевых контурах вихревые токи. Сопротивление изменению этих токов, выражающееся в тепловых потерях, имеет обратное действие на бортовой магнит, направленное встречно его смещениям. Эта реакция тормозит рост амплитуды колебаний магнита.

Интерпретируем физическую картину рассматриваемого процесса с энергетической точки зрения. Вертикальные колебания увеличивают кинетическую энергию бортового магнита квадратично скорости \dot{z} . Те же колебания индуцируют в путевых контурах токи, забирающие у магнита энергию, в соответствии с темпом ее диссипации. От баланса поступлений и потерь энергии зависит характер изменения амплитуды возмущений. Возможность возникновения в системе процессов, противодействующих росту амплитуды колебаний, свидетельствует только о наличии резервов самостабилизации. Перевес баланса в пользу диссипативных процессов при определенных конструкциях исполнения позволяет разработать самостабилизирующееся транспортное средство. Если скорость диссипации энергии в путевой структуре больше скорости возрастания энергии колебаний магнита, то амплитуда вертикальных колебаний при движении стабилизируется или уменьшается. Решение задачи состоит, следовательно, в сравнении скоростей роста тепловой энергии и энергии колебаний. Поступления механической энергии в узел подвеса увеличивают скорость \dot{z}_m поперечного смещения.

Максимального значения скорости \dot{z}_m магнит достигает в точке пересечения его колебательной траектории с линией начального или усредненного клиренса h_0 . Во времена, соответствующие этим точкам, потенциальная энергия магнита равна нулю вследствие равенства сил $FL(z) = mg$, и, следовательно, энергия колебаний магнита равна его кинетической энергии.

Вычисление механической компоненты энергии проводится путем определения хода зависимости \dot{z}_m и далее - $m \dot{z}_m^2(t)/2$ в последовательности указанных точек траектории. Диссипативная компонента энергетического баланса магнита вычисляется следующим образом. Определяются токи, индуцируемые в трех путевых контурах бортовым магнитом, который колеблется с заданной амплитудой $z=z(t)$ и, соответственно, их мощность и энергия. Выводы относительно возможностей самостабилизации такой системы подвеса могут быть сделаны на основании сопоставления механической и тепловой энергий, полученных расчетным путем.

Математическая постановка для исследования этой задачи строится следующим образом. Рассчитываются амплитуды вертикальных колебаний бортового магнита, движущегося с продольной скоростью V , над дискретной путевой структурой. Расстояние между путевыми контурами d задано.

При решении поставленной задачи использовались следующие допущения. Бортовой магнит был представлен прямоугольной токовой рамкой длиной l_0 , шириной b_0 с некоторым фиксированным током I_0 ; при расчете коэффициентов самоиндукции в путевых контурах сечения проводников считались бесконечно малыми; явление поверхностного эффекта не учитывалось. Влияние путевых дискретных контуров друг на друга также не учитывалось.

Уравнения, описывающие вертикальные колебания движущейся токовой рамки в системе электродинамической левитации, имеют вид

$$m\ddot{z} = -mg + F_z \quad (1)$$

Здесь m - масса сверхпроводящего магнита; z - вертикальная координата его; g - ускорение силы тяжести; $F_z = I_0 \sum_{i=1}^N I_i \frac{\partial M_{0i}(Vt - x_i, z)}{\partial z}$ - сила взаимодействия магнита с вихревыми токами, наводимыми в путевой структуре при движении бортового магнита; I_i - токи, наводимые в путевых контурах; M_{0i} - коэффициенты взаимной индуктивности между бортовым магнитом и короткозамкнутыми контурами дискретной путевой структуры.

Для переходных процессов в короткозамкнутых контурах справедливы уравнения

$$L_k \frac{dI_k}{dt} + \sum_{i=1}^N I_i \frac{dM_{ik}}{dt} + R_k I_k = -I_0 \frac{dM_{0k}}{dt}, \quad (2)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N)$$

где L_k, R_k - собственная индуктивность и сопротивление путевого токового контура; M_{ik} - коэффициенты взаимной индуктивности; N - число контуров дискретной путевой структуры.

Для соосных токовых рамок путевой структуры и движущегося сверхпроводящего магнита, имеющих одинаковую ширину выражения для коэффициентов взаимной индукции имеют вид [7].

Нетрудно видеть, что уравнения (1) и (2) являются связанными только через коэффициенты взаимной индукции $M(Vt-x, z)$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (1), (2) дополняется начальными условиями, которые задавались в виде:

$$z \Big|_{t=0} = h_0 + \Delta z_0, \dot{z} \Big|_{t=0} = \dot{z}_0, I_k \Big|_{t=0} = 0.$$

Данная математическая модель была использована для расчета амплитуды вертикальных колебаний в системе электродинамической левитации с дискретной путевой структурой.

Рассматривались вертикальные колебания единичного бортового магнита с током $I_0 = 105$ А. Во всех расчетах длина подвижной токовой рамки составляла $l_0 = 1$ м, ширина $b_0 = 0,3$ м, начальное возмущение $\Delta z_0 = 0$. В качестве путевых контуров были выбраны квадратные токовые рамки длиной $l_i = 0,3$ м, выполненные из алюминиевой проволоки радиусом $\delta_i = 0,15$ м. Расстояние между путевыми контурами d равнялось $0,03$ м.

На первом этапе решения определялась амплитуда вертикальных колебаний бортового магнита, на втором этапе рассчитывалась энергия рассеивания в путевом стационарном контуре, моделирующем путевую

структуру, по формуле $E_r = \int_0^t RI_r^2 dt$.

Для нахождения тока I_r , наводимого в путевом контуре, было проведено интегрирование дифференциального уравнения

$$L_r \frac{dI_r}{dt} + R_r I_{kr} = -I_0 \frac{dM_{0r}}{dt}$$

при начальном условии $I_r(0)=0$.

Связь первого и второго этапа решения исходной задачи осуществлялась через коэффициент взаимоиנדуктивности M_{0r} между движущимся магнитом и контуром, моделирующим путевую структуру. То есть в выражение для определения величины $M_{0r}(0, z)$ подставляется значение амплитуд вертикальных колебаний $z=z(t)$, полученных на первом этапе решения задачи.

Сопоставление результатов расчетов энергии рассеивания E_r (кривая 1) и максимальной кинетической энергии колебаний $E_m = m\dot{z}_m^2(t) / 2$ бортового магнита (кривая 2) для скорости продольного движения $V = 50$ м/с представлено на рис 2.

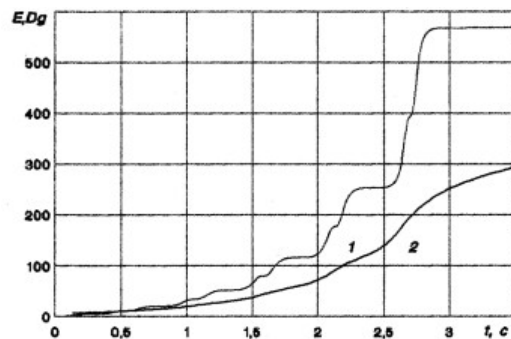


Рис. 2. Изменение энергии рассеивания и энергии колебаний бортового магнита в зависимости от времени :
1- энергия рассеивания; 2-энергия колебаний

В проводимых расчетах второго этапа длина моделирующего путевого короткозамкнутого контура составляла $l_r = 1$ м.

Анализ полученных результатов показывает, что на начальном этапе движения бортового магнита прирост кинетической энергии его вертикальных колебаний опережает рост энергии диссипации для всех скоростей V . На всех продольных скоростях имеется точка, в которой наблюдается равенство энергий E_m и E_r . Далее потери энергии превышают ее прирост. Это означает, что в начале движения амплитуда колебаний увеличивается вплоть до момента, соответствующего равенству энергий. Далее система теряет энергии больше, чем получает. Когда энергии уравниваются, магнитная система возвращается к балансу, соответствующему точке пересечения

кривых (1) и (2). Следовательно, эта точка пересечения показывает, в какой момент времени начинается стабилизация колебаний системы. Удаленность точки пересечения от начала движения может служить показателем уровня стабилизирующих возможностей данной системы подвеса. Для различных скоростей движения равенство энергий наступает через разное время от начала движения.

Решающим следствием проведенного анализа является тот факт, что энергии в принципе могут уравниваться. Для практики разработок экипажей ВСНТ важно также и то, что энергии уравниваются в большом диапазоне скоростей, что уравнивание наступает на начальных стадиях движения, когда левитация еще не потеряла устойчивости из-за постоянного увеличения амплитуды колебаний экипажа. Это свидетельствует об эффективности возбужденных колебаниями процессов самостабилизации.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. С использованием общепринятых математических упрощений показано, что диссипация энергии на всех скоростях продольного движения, реализуемых в системах ВСНТ, с некоторого момента времени становится больше прироста механической энергии колебаний экипажа. Это означает, что система электродинамической левитации даже в простейшем ее виде обладает резервами самостабилизации. Теоретически предсказанный неограниченный рост амплитуды вертикальных колебаний на практике таковым не является. Исследования также показали, что ожидаемого полного подавления колебательной компоненты не происходит, однако интенсивность равновесных колебаний невелика и имеются предварительные данные о возможности их уменьшения конструктивными приемами. Практическое использование полученных результатов дает возможность существенно изменить характеристики вторичной подвески экипажей ВСНТ. Если вторичная подвеска в колесных видах транспорта должна рассеивать всю энергию возмущений, то в магнитолевитирующих транспортных средствах значительную часть энергии колебаний напрямую рассеивает сама система в элементах силовых узлов. Таким образом, на амортизационно-диссипативные детали вторичной подвески ложится гораздо меньшая нагрузка, и они могут быть предельно упрощены (для пассажирских вариантов) и выполнены в виде масляных или воздушных демпферов, которые только повышают комфортность в салоне, но не влияют на устойчивость движения экипажа. Для грузовых транспортных средств вторичная подвеска может быть полностью упразднена. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками экипажей ВСНТ для увеличения резервов самостабилизации системы подвеса.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Байко А.В., Воеводский К.Э. О вертикальной неустойчивости в системах электродинамического подвешивания экипажей ВСНТ // Изв. ВУЗов СССР. Элек-тротехника.-1979..№11.-С.983-990.

2. Кочетков В.М., Ким К.И., Трещев И.И. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи. // Изв.АН СССР. Энергетика и транспорт.-1981.№1.-С.72-91.
3. Дзензерский В.А., Зевин А.А., Филоненко Л.А. Устойчивость вертикальных колебаний в системах электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой // Прикладная механика.-1995.-31, №7. - С.88-93.
4. Горский О.И., Дзензерский В.А., Зельдина Э.А. Частотные характеристики многоконтурных систем подвешивания // Изв РАН . Энергетика и транспорт, -1992.-Т. 38 . С.125-129.
5. Дзензерский В.А., Омеляненко В.И., Васильев С.В., Матин В.И., Сергеев С.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. – Ки-ев. : Наукова думка, 2001. - 318 с.
6. Дзензерский В.А., Радченко Н.А. Динамика транспорта на сверхпроводящих магнитах.-Днепропетровск.: Арт-Пресс, 2003. – 232 с.
7. Kratki N., Oberreti K Ausglechs organge and schwingungen beimelec namischen magnetkissen system.// Archiv fur elecrutecnik BRD.-1975-67, N2. - p.59.

УДК 624.012.45

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПІДСИЛЕНИХ У СТИСНУТІЙ ЗОНІ ЕФЕКТИВНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

О. І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. ЄРЬОМЕНКО, аспірант М.

О. ВАЛОВОЙ, аспірант,*

Криворізький технічний університет

**Київський національний університет будівництва і архітектури*

Значна частка будівель і споруд в Україні збудовані із залізобетонних конструкцій. Вони експлуатуються багато років, частина з них мають дефекти і пошкодження, інші перевантажені внаслідок збільшення тимчасових та постійних навантажень. Замінити ці конструкції часто економічно недоцільно. Ефективним способом продовження експлуатації залізобетонних конструкцій є їх підсилення. Особливо раціонально використовувати підсилення нарощуванням стиснутої зони елементів, застосовуючи при цьому сучасні матеріали.

Такі матеріали, як сталеві фібробетон та полімербетон мають високу міцність, особливо на розтяг, тріщиностійкість, водонепроникність, тріщиностійкість, корозійну стійкість. Їх використання при підсиленні залізобетонних елементів дає можливість підвищити ефективність роботи підсилених елементів, покращити їх напружено-деформований стан при експлуатаційних навантаженнях.

При проектуванні залізобетонних елементів і конструкцій розрахунок за деформаціями має важливе значення. Як, відомо настання одного з граничних станів конструкції характеризується саме розвитком надмірних деформацій від статичних і динамічних навантажень

У зв'язку з цим є випадки, коли конструктивні можливості залізобетонних конструкцій (перекриття і покриття виробничих і громадських будівель, підкранові балки, мости) диктуються розрахунками за деформаціями (розрахунок за деформаціями змушує вносити корективи у розмірі перерізів шарів підсилення, що задовільняють міцнісний розрахунок).

Актуальність проблеми визначення деформацій у залізобетонних конструкціях значно зросли в останні роки. Це пояснюється, насамперед, збільшенням прогонів сучасних конструкцій, переходом при виготовленні або підсиленні конструкцій до високоміцних матеріалів.

Варто відзначити, що незважаючи на досить великі обсяги підсилення залізобетонних конструкцій, експериментальних досліджень роботи підсилених елементів відносно небагато. Особливо не вистачає дослідних даних про комплексні конструкції з використанням сталеві фібробетону та полімербетону.

З метою аналізу впливу матеріалів підсилення (сталеві фібробетону, полімербетону) на деформаційні характеристики залізобетонних балок підсилених у стиснутій зоні було зроблено наступне [1]:

- запроєктовані та виготовлені залізобетонні балки підсилені у стиснутій зоні шаром армованого полімербетону (серія БУП), армованого сталеві фібробетону (серія БУФ), армованого дрібнозернистого бетону (серія БУМ), а також, для порівняння, непідсилені зразки балок (серія БКСП);

- проведені експериментальні випробування підсилених і непідсилених зразків.

Дані експериментальних досліджень прогинів у середині прольоту усіх серій балок наведені у табл. 1. Ці значення були отримані при рівні навантажень, які складають 0,7...0,8 від руйнівних, тобто знаходяться у діапазоні експлуатаційних навантажень.

Таблиця 1

Результати досліджень прогинів залізобетонних елементів

№ п/п	Марка балки	Зусилля, кН		Середні дослідні прогини, f , мм	$\frac{f_i}{f_0}$	Допустимі прогини за нормами, $[f]$, мм	$\frac{f_i}{[f_0]}$
		Руйнівне, P_u	Визначення прогину, P_i				
1	БКСП	22	16	4,6	1	9	0,51
2	БУМ	50	36	5,4	1,17	9	0,6
3	БУФ	56	42	6,1	1,33	9	0,678
4	БУП	62	48	5,6	1,22	9	0,622

Примітка. f_0 – прогин балок серії БКСП.