

Кравченко В. В.

Роганов Л. Л.

Донбасская
государственная
машиностроительная
академия

УДК 621

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВИБРОЗАЩИТЫ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА ПРИ РАСКАЧИВАНИИ ГРУЗА

Представлено результати розробки засобів для автоматизації розрахунку параметрів віброзахисту портального крана та оптимізації вантажопідйомності на основі критерію вантажної стійкості.

In the article describe results of automation counting parameters vibration protection, of portal crane. And in the article described optimization tonnage basic on coefficient tonnage steadiness.

С ростом требований к качеству обработки грузов в пределах производственного пространства – строительного-монтажных площадок плотин, речных или морских портов, возрастает потребность в повышении производительности портальных кранов, что может быть достигнуто за счет увеличения рабочих скоростей и оптимизации грузовой нагрузки, рассчитанной с учетом погодных условий (ветер, оледенение крана и проч.) [1]. Однако при таких режимах работы от раскачивания груза возникают боковые силы, вызывающие дополнительные динамические нагрузки вибрационного характера, которые необходимо уменьшать до максимально возможной величины [2]. Поэтому обеспечение виброзащиты портального крана при выполнении им рабочих операций технологического процесса перемещения груза является актуальной проблемой как для краностроителей так и для эксплуатационников.

Решению этой проблемы в последнее время посвящен ряд работ. Общие методы оптимизации и создания динамически совершенных подъемных машин рассмотрены в работе [1]. На основе этих методов в работе [3] разработан алгоритм оптимального управления всем циклом горизонтального перемещения груза. В работе [4] изучаются нелинейные колебания подвесных канатов, а в [5] рассматриваются вопросы по оптимизации грузоподъемности. Однако вопросы автоматизированного определения параметров виброзащиты и грузоподъемности портальных кранов в работах [1-5] рассмотрены еще недостаточно.

Цель настоящей работы - исследовать особенности силового взаимодействия подъемных канатов с внешней нагрузкой и

предложить математическую модель и алгоритм для автоматизации расчета параметров, обеспечивающих виброзащиту крана и повышение грузоподъемности. Задачи работы: изучение режимов работы крана; разработка математической модели для оптимизации амплитуды качания груза по критерию минимизации боковой силы; разработка математической модели для оптимизации грузоподъемности портального крана на основе заданного критерия грузовой устойчивости; разработка методики исследования; разработка информационной модели для программно-методического комплекса (ПМК) «ПОРТАЛЬНЫЙ КРАН» и моделирование. Решение этих задач обеспечит создание динамически совершенных портальных кранов.

Как указывалось выше, при подъеме и перемещении грузов часто происходит отклонение подъемных канатов от вертикали на угол α (рис. 1).

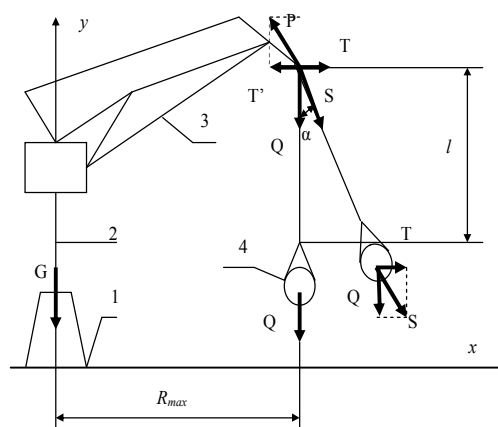
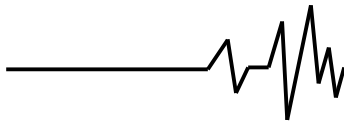


Рис. 1. Схема колебаний груза на подъемном канате: 1- портал; 2 - колонна с кабиной; 3 – стрела; 4 – груз



Причинами, вызывающими отклонение являются [2]: горизонтальные силы инерции T_1 при пуске/торможении механизмов поворота и изменения вылета - T_2 ; центробежная сила груза - T_3 ; давление ветра P_e на груз и др. Вследствие медленного затухания колебаний груза, находящегося на крановом подвесе и неизменности плоскости колебаний, амплитуды последних могут складываться с амплитудами колебаний в перпендикулярной плоскости после поворота крана на 90° относительно предыдущего положения [6]. Поэтому колебания груза следует устранять сразу, при захвате и подъеме грузов, не дожидаясь поворота крана на 90° град.

В результате отклонения появляется боковая сила T , представляющая собой горизонтальную составляющую натяжения канатов S , получающуюся от совместного действия груза Q и вышеупомянутых сил T_i ($i = 1, \dots, 4$) и приложенная к концу стрелы (см. рис. 1).

Величина этой силы определяется по формуле:

$$T = Qtg\alpha, \quad (1)$$

где Q – вес груза, каната и грузозахватных устройств.

Если теперь к концу стрелы приложить активную силу P , равную по модулю S и противоположно ей направленную, то горизонтальная составляющая этой силы T' уравновесит величину силы T , что приведет к совмещению подъемных канатов с вертикалью и равенству нулю угла α ($tg\alpha=0$). Прикладывание силы P активно и синхронно с изменением силы S и будет удерживать груз Q от раскачивания.

Определим величину силы P , для чего рассмотрим взаимодействие всех сил, действующих на кран и механизм подъема в момент наибольшего отклонения (колебания) грузоподъемного каната от вертикали, на которой он находился в момент захвата груза (см. рис. 1).

Согласно [2], наибольший угол отклонения зависит от взаимодействия вышеперечисленных факторов рассчитывается по формуле

$$tg\alpha = (T_1 + T_2 + T_3 + P_e)/Q. \quad (2)$$

Считая силы, находящиеся в правой части (2) известными и рассматривая это соотношение как уравнение относительно неизвестного угла α , решив его, получим:

$$\alpha = arctg(tg\alpha), \quad (3)$$

где $tg\alpha$ определяется по формуле (2).

Из расчетной схемы видно, что $S = Q/\cos\alpha$. С учетом соотношения (3) максимальное значение силы S от действующих на кран текущих нагрузок рабочего состояния будет равно:

$$S = Q/\cos[arctg(tg\alpha)]. \quad (4)$$

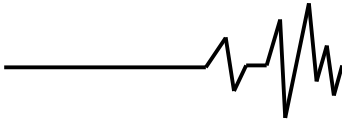
Следовательно, величина активной силы P определяется по формуле

$$P = |S| = |Q/\cos[arctg(tg\alpha)]|, \quad (5)$$

а ее направление в течении всего технологического процесса от подъема до опускания груза должно быть строго противоположно направлению S . Так как в разность $P - S$ входит вес груза Q не равный нулю, то равенство нулю этой разности возможно только при $\alpha=0$. Тогда по формуле (1) $T = Qtg0 = 0$, что означает отсутствие боковой силы, вызывающей раскачивание груза. Таким образом, ликвидация колебаний груза приведет к оптимизации траектории его перемещения в зависимости от текущих параметров технологического процесса (веса груза, скорости подъема, поворота и т.д.) и состояния погоды. Практически это можно выполнить, применив мехатронные устройства [7]. Кроме того, устранение колебаний канатов позволяет эффективней использовать коэффициенты запаса и эксплуатационные ресурсы крана, заложенные еще на стадии проектирования. В частности, для увеличения грузоподъемности крана воспользуемся ресурсом по грузовой устойчивости, определяемым коэффициентом k_1 [2], который соответственно правилам Госгорпромнадзора вычисляется по формуле (расчетная схема и нагрузки, действующие на кран при направлении ветра в сторону опрокидывания стрелы с грузом, показаны на рис. 2)

$$k_1 = [G_v(b + X_0) - G_x Y_0 - P_u r - P_{eii} Y_{eii}] / S_r, \quad (6)$$

где G_v — проекция веса крана G (без груза) при угле наклона подкранового пути γ на ось y ; $G_v = G \cos \gamma \approx G$; G_x — тоже на ось x ; $G_x = G \sin \gamma$; G_x — тоже на ось x ; $G_x = G \sin \gamma$; X_0 и Y_0 — координаты центра тяжести крана без груза; b — половина расстояния между осями подкрановых рельсов; P_u — сила инерции, возникающая при торможении опускающегося груза (время торможения, если оно неизвестно, можно принимать равным 1 сек.); r — плечо силы P_u относительно ребра опрокидывания (длина перпендикуляра, опущенного из точки E на направление канатов, отклоненных от вертикали на угол α_{ii}); P_{eii} — давление ветра интенсивностью 40 кг/м^2 на весь кран без груза; Y_{eii} — расстояние от ребра



опрокидывания до линии действия силы P_{eii} ; $S = Q/\cos\alpha_{ii}$ - натяжение канатов от действия груза Q .

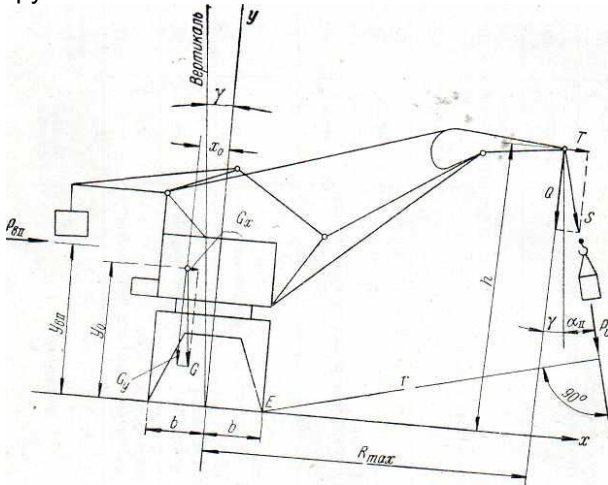


Рис. 2. Схема нагрузок

Для разработки математической модели (ММ) воспользуемся вышеприведенной расчетной схемой (см. рис. 2) и формулой для определения грузовой устойчивости (6), известной по работе [2] и, как указано выше, заимствованной из нее. Так как при расчете устойчивости угол γ поперечного наклона пути для сухопутных кранов, работающих на постоянных путях, принимается равным нулю [2], то $G_x = G \sin \gamma = G \sin 0 = 0$. Приняв время опускания груза равным 1 с, положим, что сила инерции P_u равна весу груза Q . С учетом этих допущений формулу (6) можно привести к виду:

$$k_1 = [G(b + X_0) - Qr - P_{eii} y_{eii}] \cos\alpha_{ii} / Q. \quad (7)$$

Плечо r определяется следующим образом:

$$r = [(R_{max} - b) + htg\alpha_{ii}] \cos\alpha_{ii}, \quad (8)$$

где R_{max} - наибольший вылет крана; h - высота концевых блоков хобота над головкой рельса.

Полагая коэффициент k_1 заданным, и преобразовав выражение (7) относительно груза Q получим:

$$Q = [G(b + X_0) - P_{eii} y_{eii}] \cos\alpha_{ii} / r(k_1 + \cos\alpha_{ii}). \quad (9)$$

Выражение (9) связывает постоянные характеристики крана и переменную ветровую нагрузку, что и позволяет оптимизировать величину Q в зависимости от давления ветра при одновременном соблюдении заданного коэффициента грузовой устойчивости k_1 .

Для уточнения момента от сил ветровой нагрузки, поперечное сечение крана, перпендикулярное максимальному давлению ветра рабочего состояния P_{eii} , по высоте h условно разобьем на четыре зоны, каждая из

которых имеет свою подветренную площадь A_i ($i=1,..4$) и находится на определенной высоте над головкой рельсов - «Портал $-A_1, h_1$ », «Кабина $-A_2, h_2$ », «Груз $-A_3, h_3$ », «Стрела $-A_4, h_4$ ». Силу от ветровой нагрузки будем считать приложенной на максимальной высоте данной зоны от головки рельсов, а для учета коэффициента изменения динамического давления ветра по высоте величину h_i ($i=1,..4$) примем кратной десяти метрам. Высоту груза примем равной высоте максимального подъема. Тогда:

$$P_{eii} y_{eii} = F_1 h_1 + F_2 (h_1 + h_2) + F_3 h_3 + F_4 h, \quad (10)$$

где F_i ($i=1,..4$) - статическая составляющая ветровой нагрузки которая определяется согласно ГОСТ 1457 - 77.

Рассчитав по формуле (9) с учетом формулы (10) вес груза и зная вес одной штуки груза U , можно определить количество штук груза $n=Q/U$ (целая часть дроби), поднимаемого за один подъем и являющегося оптимальным для данных погодных условий.

Моделирование процесса перемещения грузов порталным краном с использованием настоящего ПМК производится по следующей методике:

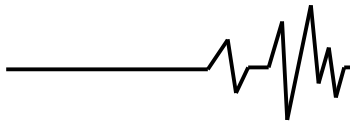
- в ЭВМ вводятся данные технологического процесса и погодных условий (вес груза, объем перевалки, допускаемые скорости подъема, поворота, давление ветра, подветренные площади элементов крановых конструкций, груза и проч.);

- производится проверка паспортных характеристик крана введенным данным и выполнение заданных ограничений;

- производится выбор математической модели в зависимости от задач, которые необходимо решить - оптимизировать перемещение или оптимизировать вес поднимаемого груза;

- производится предварительный расчет по входным данным для получения исходных данных для оптимизации. Определяются предварительные значения критериев оптимизации в зависимости от действующих нагрузок рабочего состояния;

- производится моделирование и визуализация результатов с использованием оригинального программного обеспечения, разработанного в рамках данного ПМК. При этом учитываются ограничения по времени, не более 3 мин. на весь технологический цикл (подъем груза, поворот стрелы с грузом, опускание груза) и скоростям рабочих движений, а также углу отклонения груза от вертикали, который в реалии не превышают 14° ;



- производится оптимизация (максимизация) веса поднимаемого груза по критерию соблюдения заданного коэффициента грузовой устойчивости и уменьшение амплитуды качения по критерию минимизации (равенство нулю) боковой силы (формулы 1 – 10).

- производится анализ полученных результатов.

Разработка логической модели ПМК выполняется с использованием диаграммы прецедентов [8], представляющей статическое поведение системы и показанной на рисунке 3.



Рис. 3. Диаграмма прецедентов

Основной прецедент – «Расчет и оптимизация траектории перемещения» характеризует расчет математической модели траектории перемещения грузов и ее дальнейшую оптимизацию. Данный прецедент включает в себя несколько прецедентов, которые в свою очередь взаимодействуют с другими прецедентами системы для оптимизации траектории перемещения. Система для расчета и оптимизации траектории перемещения содержит в себе

следующие прецеденты (см. рис. 3): ввод данных; расчет по модели; получение результатов до оптимизации; оптимизация по модели; оптимизация по грузовой нагрузке; получение результатов; получение отчета; получение оптимальной траектории.

Разработанная на основании диаграммы прецедентов модульная структура ПМК, состоящая из управляющей (системной) и функциональной частей, показана на рис.4.

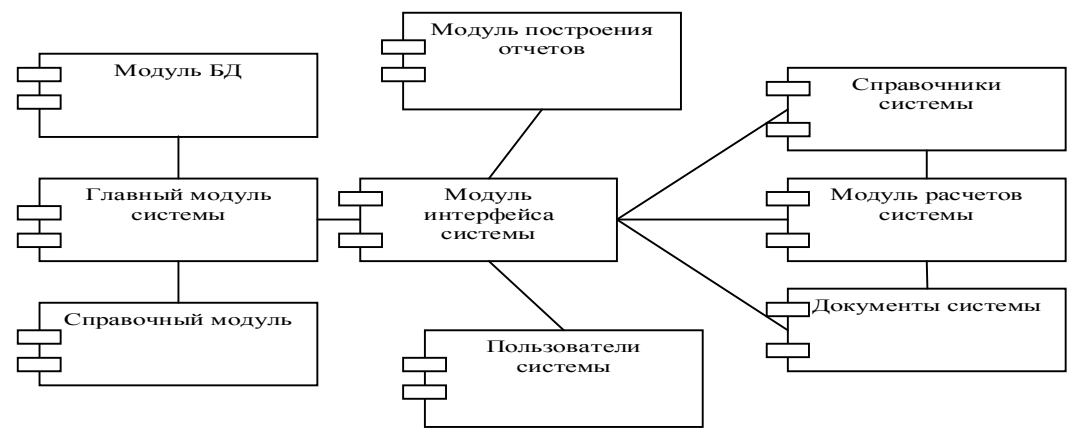
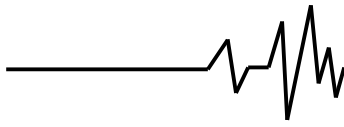


Рис. 4. Диаграмма модулей ПМК «Портальный кран»



К управляющим относятся модули, выполняющие действия по изменению состояния предметной области, поддержанию и реализации функциональных связей и связей по определению, а также преобразованию самой модели предметной области (МПО). Таким образом, управляющая часть ПМК обеспечивает выполнение четырех основных функций:

- формирование начального состояния МПО;
- формирование очередных состояний МПО;
- управление вызовом и выполнением функциональных (обрабатывающих) модулей;
- преобразование динамической МПО.

Обслуживающие модули обеспечивают связь управляющей части ПМК с пользователем, связь с данными (файлами), не входящими в информационную базу комплекса.

Главный модуль предназначен для контроля всей системы передачи данных между модулями ПМК. Его функции:

- получение входных данных от пользователей через модуль интерфейса системы;
- проверка входных данных на корректность;
- передача корректных данных через модуль интерфейса системы в модуль расчетов;
- модуль расчетов;
- получение готовых результатов;
- выдача готовых результатов пользователю через модуль построения отчетов;
- обращение к другому приложению через модуль БД.

Модуль базы данных (БД) обеспечивает:

- хранение информации о производимых расчетах;
- выдачу отчетов о проведенных расчетах.

Справочный модуль обеспечивает:

- предоставление информации о программном продукте;
- предоставление помощи при работе программного продукта;
- ссылку на сайт разработчика.

Модуль расчетов системы PORTAL осуществляет непосредственно расчеты по математической модели. Осуществляет взаимодействие только с модулем интерфейса системы, модулем справочных и документационных систем. Из модуля интерфейса системы, он получает команды на

выполнение расчета и данные для расчета, а возвращает готовые результаты. Его функции:

- получение данных от управляющего модуля;
- обработка данных;
- расчет по математической модели;
- передача результата в модуль интерфейса системы.

Декомпозиция модуля расчетов системы PORTAL, структура которого показана (рис. 5), заключается в разбиении его на ряд модулей, основные из которых предназначены для решения следующих подзадач:

- моделирование и оптимизация колебаний груза по критерию минимизации боковой силы (GRUOPTIM);
- моделирование и оптимизация грузоподъемности крана по критерию сохранения заданного коэффициента грузовой устойчивости (GRUUST).

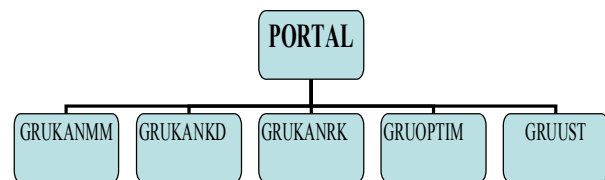


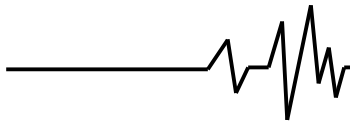
Рис. 5. Структура расчетного модуля PORTAL

Модуль GRUOPTIM выполняет оптимизационные расчеты траектории движения груза по ММ, описываемой формулами (1 – 5). Работа модуля начинается с ввода данных, характеризующих параметры крана, груза и погодные условия (рис. 6).

```
введите вес груза, т 3
наибольший вылет, м =30
введите длину каната, м 25
введите скорость поворота крана, об/мин 3
давление ветра на высоте 10 м 0
{Вводятся значения переменных (Q, rmax, ld, n, qd)}
```

Рис. 6. Фрагмент диалога пользователя

После ввода данных и выполнения расчетов происходит переход в графический режим и отрисовывается процесс колебаний груза до оптимизации. При этом белым цветом анимируются колебания груза, и фиксируется их наибольший размах. Затем выполняется пауза, и после нее красным цветом снова анимируются колебания груза и их устранение, а также фиксируется их наибольший размах.



Таким образом, можно сравнить амплитуды колебания груза до и после оптимизации. В целом работа программы выполняется в последовательности как показано на рис. 7.

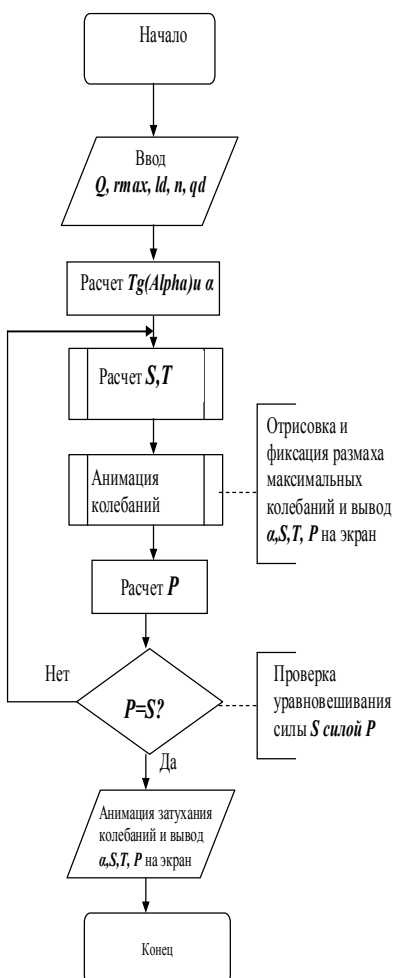


Рис. 7. Блок-схема расчета и оптимизации колебаний груза

Модуль GRUUST также является основным модулем ПМК и предназначен для оптимизационных расчетов веса поднимаемого груза по критерию сохранения заданного коэффициента грузовой устойчивости, интеграции с вышеописанными модулями, хранения технических характеристик кранов, параметров технологического процесса погрузки/разгрузки и прочих операций с БД. Общий вид интерфейса ПМК представлен на рис. 8.

Интерфейс модуля GRUUST ориентирован на пользователя, обладающего основными навыками работы с ЭВМ, и предназначен для облегчения крановщику доступа к функциональным возможностям ПМК. Работа приложения регламентируется опциями главного меню - «Файл», «Расчет

устойчивости», «Расчет колебаний», «База данных», «Справка» выбор которых и обеспечивает реализацию соответствующих функций. Порядок работы с главным меню рассмотрим на примере опции «Расчет устойчивости» и соответствующей закладки. Работа с остальными пунктами меню осуществляется аналогично.

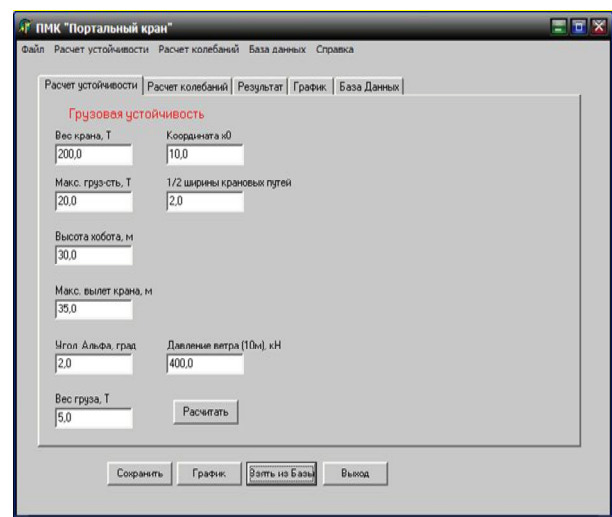


Рис. 8. Общий вид главной формы ПМК «Портальный кран»

Основной работы с этим пунктом меню, как и предусмотрено, является представленная выше ММ (см. формулы 7 – 10). Информационную модель, соответствующую этой ММ, представим в виде блок – схемы, показанной на рис. 9.

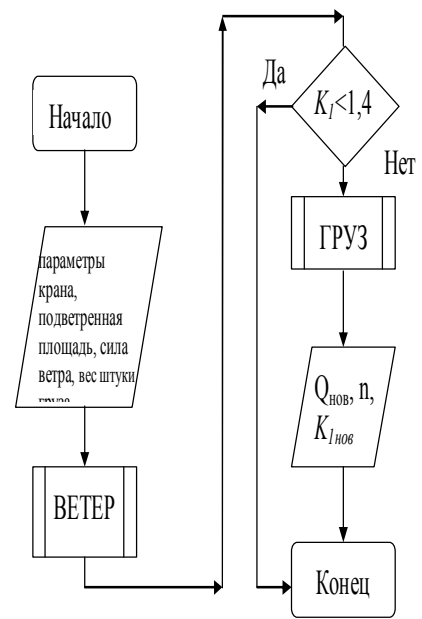
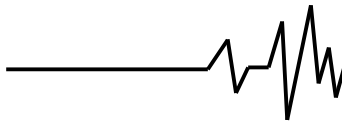


Рис. 9. Блок – схема процедуры «Расчет устойчивости»



После ввода характеристик крана в подпрограмме «Ветер» вычисляются ветровые нагрузки, действующие на кран и отвечающий им коэффициент грузовой устойчивости. Если он окажется меньше нормативного 1,4 то работа программы прекращается и пользователю выдается соответствующее сообщение. В противном случае подпрограмма «Груз» рассчитывает новые значения величин Q , n и k_1 .

Результаты работы программы, разработанной в соответствии с вышеизложенной информационной моделью показаны на рис. 10, а также в табл. 1.

Таблица 1
Результаты оптимизации грузовой нагрузки

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
G, T	205	Q, T	15	h, m	31	$\alpha_{ит}^0$	4	k_j	2,3101	$Q_{нов}, T$	20,69
X_0, m	1,5	$P_{вет, кН/м^2}$	14,25	R_{max}, m	30	U, T	3	$k_{j, нов}$	1,4	$n, шт.$	6

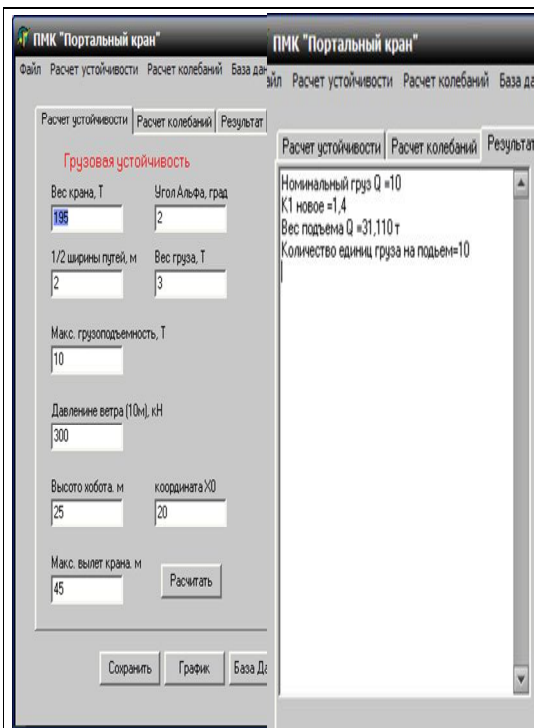


Рис. 10. Результаты моделирования

Моделирование проводилось для крана типа КППК 15-30-10,5 с различными исходными данными. Из табл. 1 видно, что кран номинальной грузоподъемностью в 15 т. рассчитанной при максимальном ветровом напоре 28,5 кН (давление ветра 40 кН) при снижении ветровой нагрузки вдвое (14,25 кН) может поднимать груз весом 20 т., что на 30% превышает номинал, сохраняя при этом

рекомендуемый коэффициент грузовой устойчивости, равный 1,4. Таким образом, при обработке штучных грузов с весом одной упаковки равной 3т, кран может поднимать за один подъем шесть упаковок груза, против пяти по номиналу. Как указывалось это и позволяет использовать резервы прочности, заложенные при конструировании крана, для повышения его производительности.

Программное обеспечение комплекса разработано в системе программирования Delphi [9] и состоит из таких модулей: Portal.pas – главный модуль, содержит в себе все необходимые процедуры для расчетов колебаний, грузовой и собственной устойчивости. Отвечает за соединение с другими модулями программы. UnitBD.pas – модуль базы данных, где хранится характеристика произведенных расчетов. Portal.dfm – модуль интерфейса программы. Datas.db – файл базы данных содержащий данные для расчета. Model.db – файл базы данных содержащий информацию о рассчитываемой модели. Portalkran.db – файл базы данных содержащий информацию о типе портального крана. Traektoria.db – файл базы данных содержащий информацию о траектории перемещения.

Структура файлов БД и некоторые элементы работы пользователя с базой данных ПМК представлены на рис. 11, 12. В частности, на рис. 12 показано использование элемента управления *TDBNavigator* для

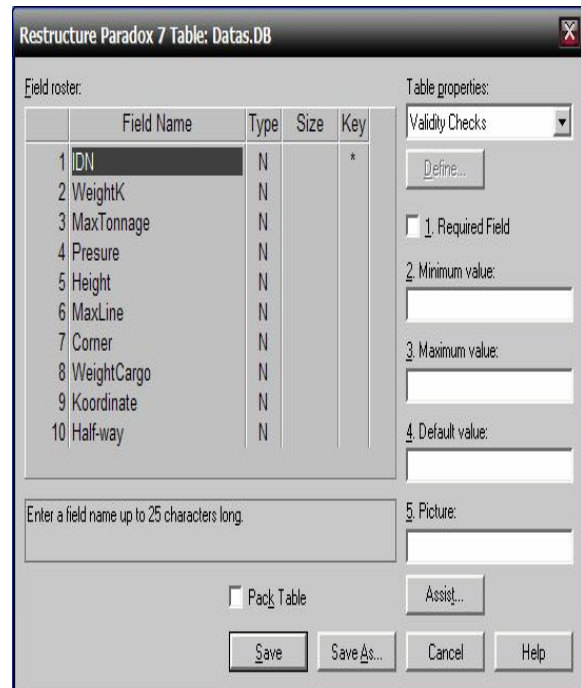


Рис. 11. Структура файла Datas.Db

База Данных "Портальный кран"

Траектория

KodTraek	KodGruz	Naimenov	Wieght
100	1001	Контейнер	400
101	1004	Ротор	350
102	980	Конструкция	700

Модель

TypeMod	KodTraek	VidTraek
2 массовая	100	Парабола
2 массовая	101	Парабола
1 массовая	102	Окружность

Портальный кран

KodGruz	KodKran	VidKran	Character
980	23	"Суми-мото"	Крюк, 10 тонн
1001	15	КППК 15-30-10	Крюк, 15 тонн
1004	4	Марк-40	Крюк, 40 тонн

Рис. 12. База данных ПМК

корректировки данных по крану «Марк 40» в табличных формах БД. На закладках «Расчет устойчивости» и «Расчет колебаний» можно воспользоваться автоматическим вводом данных из БД (кнопка *Взять из Базы*). Это позволяет при необходимости скорректировать какой-либо расчетный параметр не меняя остальных. Как видно из рис. 11 и 12 использование БД расширяет возможности ПМК в части автоматизации ввода данных для различного вида расчетов.

Выводы

Разработан программно-методический комплекс, позволяющий автоматизировать расчет параметров виброзащиты, обеспечивающих оптимизацию траектории движения и веса грузов, перемещаемых портальными кранами в производственном пространстве порта. Проведены оптимизационные расчеты и исследованиями установлено, что оптимизация грузовой нагрузки по критерию сохранения заданного коэффициента грузовой устойчивости

позволяет на 20-30% увеличить производительность крана. Оптимизация траектории движения по критерию минимизации боковой силы позволяет устранить колебания каната, что на 5-7% уменьшает динамические нагрузки, действующие на кран при выполнении им рабочих операций. В дальнейшем вышеуказанный подход может быть применен при модернизации кранового хозяйства портов и создании автоматизированных систем управления действующих или строящихся портальных кранов.

Литература

1. Ловейкин В.С. Динамическая оптимизация подъемных машин / В.С. Ловейкин, А.П. Нестеров – Луганськ: Вид-во СНУ, 2002. – 368 с.
2. Ланг А.Г. Портальные краны / А.Г. Ланг, И.С. Мазовер, В.С. Майзель – М – Л.: Машгиз, 1962.- 284с.
3. Ловейкин В.С. Оптимізація перехідних процесів руху кранового візка / В.С. Ловейкин, Ю.О. Ромасевич // Підійомно - транспортна техніка. – 2008. -№2 (26). – С. 3-14.
4. Ловейкин В.С. Аналіз нелінійних коливань вантажу та явище динамічного хаосу у портальних кранах, встановлених на понтоні / В.С. Ловейкин, Ю.В. Човнюк, Ю.О. Ромасевич // Підъемные сооружения. Специальная техника. – 2008. -№11 (87). – С. 28-30.
5. Кравченко В.В. Автоматизация расчета оптимальной грузоподъемности портального крана с учетом ветровой нагрузки / В.В. Кравченко, В.И. Кравченко // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2009. - №3. – С. 28 - 29.
6. Дукельский А.И. Портовые и судовые грузоподъемные машины / А.И. Дукельский - Л.: Морской транспорт, 1960. - 516 с.
7. Введение в мехатронику / Под. ред. А.К. Тугенгольда. М.: Выс. шк., 1999. – 175 с.
8. Рамбо, Д. UML: Специальный справочник / Д. Рамбо, А. Якобсон, Г. Буч. – СПб. : Питер, 2002. – 656 с.
9. Фаронов В. Delphi 6. / В. Фаронов – СПб.: Питер, 2002. – 512 с.