

СОРОКИН Павел, МИШИН Алексей

## СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ ОТ ОПРОКИДЫВАНИЯ

### *Аннотация*

*В статье рассматриваются вопросы разработки системы компенсации ветровых нагрузок для сохранения устойчивости башенных кранов.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Динамические (внешние) нагрузки при работе башенных кранов возникают при пуске/останове механизмов, повороте стрелы или башни со стрелой (в зависимости от конструкции башенного крана), внезапном изменении нагрузки на крюковой подвеске (при обрыве грузового каната или при подъеме груза «с подхватом»), из-за неровности кранового пути и/или ходовых колес, из-за рельсовых стыков, при возможном ударе буферов о тупиковые упоры и при пульсациях скорости ветра.

К нагрузкам, приложенным к конструкции башенных кранов, с явно выраженным вероятностным характером относят следующие виды воздействий: кинематическое возбуждение опор/основания в виде сейсмического возмущения и силовое возбуждение элементов конструкции, удаленных от опор/основания, в виде ветрового возмущения. Воздействие ветра на башенные краны является господствующим фактором [1].

Территория Российской Федерации разделена на 7 ветровых районов и при проектировании башенных кранов учитывают среднюю скорость ветра соответствующего района [2,3]. В нормативные документы также введен коэффициент динамичности для учета возможных пульсаций скорости ветра. И один из недостатков заключается в допущении, что скорость ветра является квазистационарной. При внезапном мгновенном усилении ветра возможны порывы, скорости которых превышают допустимые паспортные значения. То же самое наблюдается при экстремальных шквалистых ветровых воздействиях. В этих случаях учета введенного коэффициента недостаточно для сохранения устойчивого положения башенных кранов. Также в нормах нет рекомендаций по расчету грузоподъемных машин на возможное возникновение резонансных событий при динамическом воздействии ветра.

Башенный кран в рабочем состоянии более чувствителен к ветровым воздействиям, чем в нерабочем состоянии. При изменении скорости потока ветра от одного установившегося состояния к другому наблюдается импульсное ветровое воздействие с определенной повторяемостью. При этом остается проблема сохранения устойчивого положения башенных кранов в рабочем состоянии при силовом ветровом возбуждении.

Необходимым условием сохранения безопасности является обеспечение динамической устойчивости башенных кранов при действии на него ветровых нагрузок.

Актуальность работы состоит в повышении безопасности эксплуатации башенных кранов при действии ветровых нагрузок.

Целью является разработка способа обеспечения устойчивости башенных кранов с учетом действия динамических ветровых нагрузок.

Новизна заключается в учете стохастического характера динамического воздействия ветра при разработке вышеуказанного способа.

В данной работе определены следующие задачи:

- оценка динамического воздействия ветра (порывистого и шквалистого) на конструкции башенных кранов с учетом спектрального состава пульсаций ветра и собственных частот колебаний башенных кранов;
- разработка системы безопасности башенных кранов для обеспечения динамической устойчивости при внезапном мгновенном усилении ветра (порывистом ветре) и при экстремальном шквалистом ветре.

Первая задача состоит в следующем.

Из-за порывистого характера ветра возникают собственные колебания металлоконструкции крана. Поэтому для оценки динамического воздействия ветра на металлоконструкцию башенного крана с целью исключения резонанса необходимо определить соотношение собственных частот колебаний крана и возмущающих частот ветра.

Вторая задача характеризуется другой особенностью.

Т.к. металлоконструкции башенных кранов обладают значительным запасом прочности, то воздействие порывов и шквалов необходимо учитывать при проектировании системы обеспечения динамической устойчивости башенных кранов из-за их чувствительности к ветровым нагрузкам.

## **1. ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК**

### **1.1. Характеристики ветрового воздействия**

Нагрузка на узлы и металлоконструкцию башенных кранов от ветра обусловлена его скоростью. Различают среднюю (сглаженную) скорость ветра, получаемую на основе осреднения совокупности мгновенных значений за определенный период, и истинную мгновенную скорость ветра в данный момент, характеризующую порывы, т.е. осцилляции около средней скорости. Скорость ветра в порывах во много раз превосходит среднюю скорость. Средняя скорость обуславливает статическую составляющую ветровой нагрузки, а мгновенная скорость – динамическую составляющую ветровой нагрузки. Следует отметить, что мгновенная скорость ветра усредняется для компенсации инерционности анемометра (для стандартных оптоэлектронных анемометров за  $2\div 5$ с, для малоинерционных акустических ультразвуковых анемометров – доли секунд).

К характеристикам ветрового воздействия относятся:

- Средняя скорость ветра – скорость, осредненная за 2-х (или 10-и) минутный интервал времени на высоте 10м над поверхностью земли.
- Максимальная скорость ветра – скорость, определенная один раз в 2 минуты, 10 минут, 1 час, 3 часа, 1 раз в год или за несколько лет.

Для корректной оценки взаимодействия ветровых потоков на башенные краны необходимо обладать достоверной информацией о параметрах ветра. Отметим, что на метеорологических станциях скорость ветра замеряется в срок наблюдения (2 минуты, 10 минут) и между сроками (1 час, 3 часа). В указанных периодах находят средние

скорости и максимальные скорости в порывах, усредненные за  $2\div 5c$  (в основном используются оптоэлектронные анемометры).

Для исследования воздействия ветра на башенные краны необходимо определиться с набором исходных данных, т.е. использовать максимальные скорости ветра, средние скорости или мгновенные скорости.

Отметим, для оценки резонансных явлений необходимо регистрировать мгновенную скорость с определенным шагом. А система управления динамической устойчивостью должна быть адаптирована на обработку мгновенных скоростей и осредненных значений, получаемых на их основе.

Выбор периода регистрации мгновенной скорости ветра обусловлен инерцией объекта, на который воздействует ветровая нагрузка, решаемой задачей и возможностями измерительной аппаратурой.

Для оценки нагружения инерционных подъемных сооружений, таких как башенные краны, достаточно фиксировать мгновенную скорость ветра с периодом порядка нескольких секунд.

## **1.2. Спектральный анализ динамического ветрового воздействия**

Башенные краны, относятся к плохообтекаемым телам, благодаря чему обусловлены некоторые особенности их поведения в набегающем воздушном потоке. Башенные краны из-за постоянного перебазирования работают в различных условиях рельефа и поэтому необходимо учитывать различные ветровые режимы.

Одной из особенностей является работа башенных кранов, находящихся в спутной струе от других объектов, и поэтому набегающий поток является турбулентным из-за чего возбуждаются колебания, вызванные аэродинамическими импульсами.

Другой особенностью является отрыв воздушного потока с подветренной стороны конструкции башенного крана с образованием вихрей, что дополнительно ее нагружает [4].

Устойчивость конструкции башенных кранов определяется резким изменением средней скорости ветра, возникновением энергоемких порывов определенной длительности и частоты следования и резонансными характеристиками конструкции.

Резкое изменение скорости ветра обусловлено его порывистостью, являющееся следствием турбулентного течения воздушных масс, вызванного взаимным трением слоев воздуха, трением о поверхность земли и встречей с препятствиями. Турбулентное воздушное движение является случайным процессом, для которого применяются методы теории случайных процессов.

Соответственно поведение башенного крана в воздушном потоке следует рассматривать с точки зрения теории случайных процессов с использованием статистической информации о ветре. Существуют определенные соотношения между скоростью ветра и откликом объекта, на который воздействует ветер. Так как распределение плотности вероятности пульсаций ветра подчиняется нормальному закону Гаусса [5,6], то отклик также описывается нормальным законом.

При действии порывистого ветра на металлоконструкцию башенного крана возникает импульсная нагрузка и из-за порывистости скорости ударная нагрузка на башенный кран действует циклически со случайной повторяемостью, определяемой текущим состоянием ветрового потока.

Ввиду случайного характера пульсаций ветра и сложности его описания во временной области, решать задачу воздействия ветра на конструкцию башенного крана необходимо с помощью спектрального анализа, т.е. представления распределения энергии пульсаций ветра в частотной области [7,8].

Частотный анализ пульсаций скоростей ветра используется для нахождения диапазона частот с наиболее энергоемкими амплитудами порывов.

Поэтому на основе зарегистрированных реализаций скоростей ветра определяется энергетический спектр мощности пульсаций для выявления наиболее опасных частот.

Распределение спектральной мощности на основе усредненных данных дает усредненный спектр мощности порывов. Такой подход не позволяет оценить устойчивость башенных кранов к резонансным явлениям. Поэтому необходимо использовать мгновенный спектр мощности порывов для оценки динамического ветрового возмущения на основе диапазона резонансных частот с наиболее интенсивными амплитудами мощности пульсаций.

По данным Высотной Метеорологической Мачты ВММ-310 приведен фрагмент реализации скорости (рис. 1.) и направления ветра (рис. 2.). Шаг регистрации скорости и направления ветра составляет 1с.

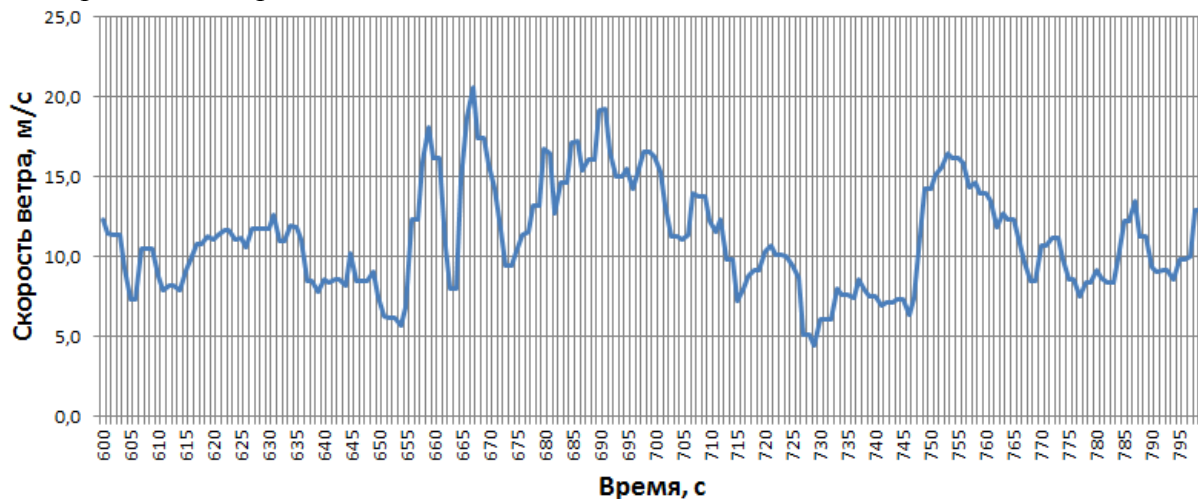


Рис. 1. Фрагмент реализации скорости ветра

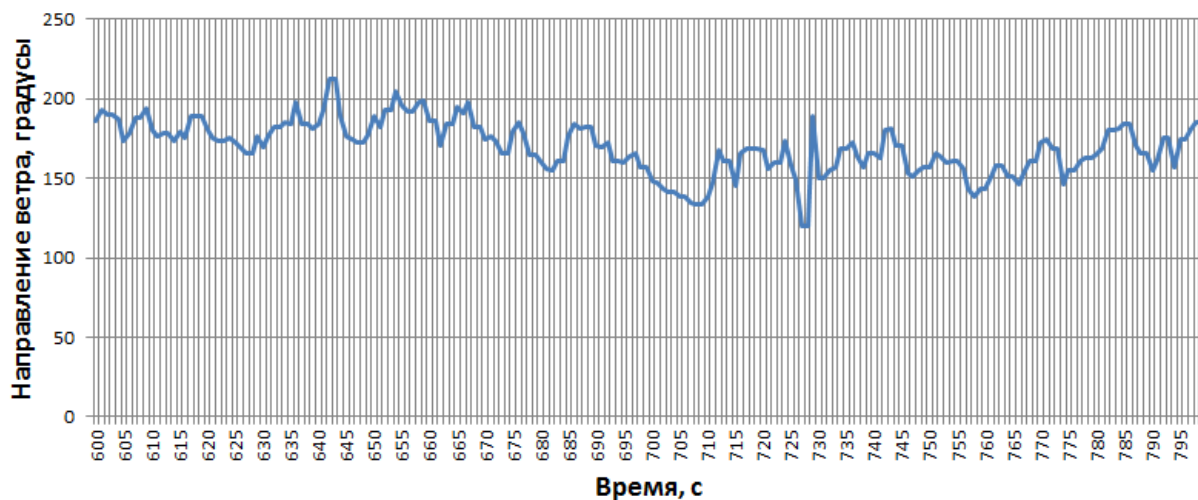


Рис. 2. Фрагмент реализации направления ветра

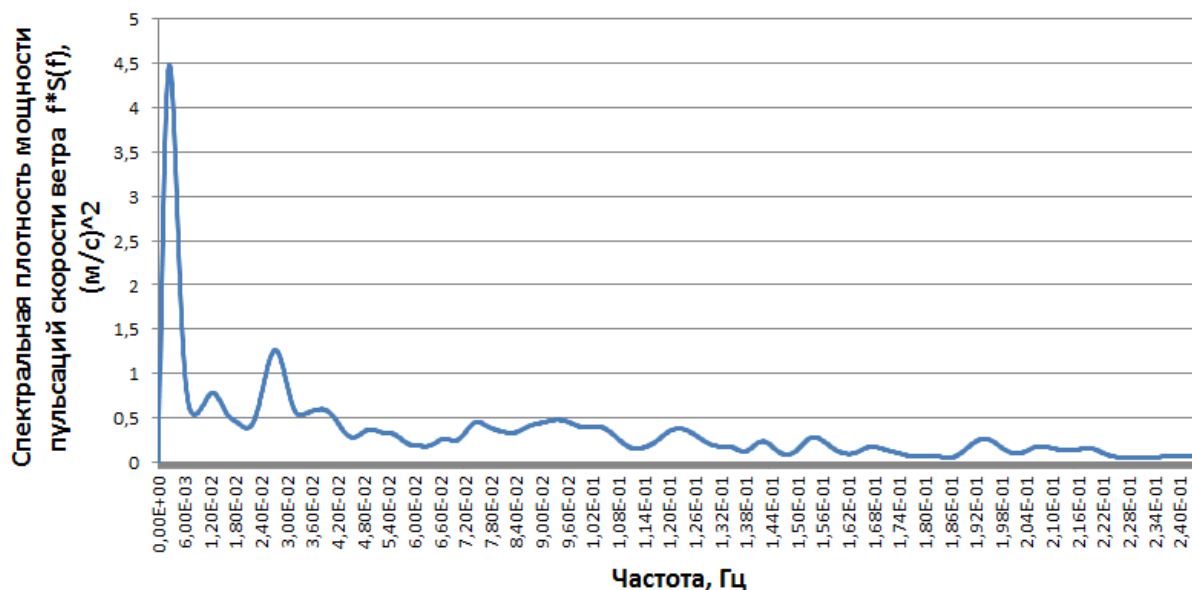


Рис. 3. Фрагмент спектра пульсаций скорости ветра

Для вычисления спектра мощности пульсаций был применен метод Уэлча с окном Хэннинга. Вычисления проводились в программном комплексе MatLab. Из графика спектральной оценки пульсаций ветра (рис. 3.) видно, что основная энергия колебаний порывов сосредоточена до 0,04 Гц. Далее, для оценки динамики ветрового воздействия необходимо определить спектр собственных частот колебаний башенного крана. Расчеты проводились для башенного крана КБ-415 без массы груза и при расположении груза на различных вылетах. Фрагмент результата приведен в табл. 1.

Табл. 1. Значения собственных частот башенного крана КБ-415 с грузом на разных вылетах грузовой тележки

Номер собственной частоты колебания	Значение собственной частоты колебания, Гц		
	Вылет грузовой тележки, м		
	5	25	50
	(груз 10т)	(груз 3т)	(груз 1,5т)
1	0,12606	0,12684	0,12622
2	0,22107	0,22317	0,22352
3	0,24992	0,25299	0,2545
4	0,7567	0,75836	0,75851
5	1,1163	1,1429	1,1708
6	1,1261	1,1558	1,1809
7	1,1309	1,1594	1,1896
8	1,1353	1,176	1,2119
9	1,153	1,1952	1,2293
10	1,4066	1,4132	1,4152

Планируется продолжить натурные эксперименты для накопления базы данных с целью обработки экспериментальных значений и получения совокупности спектров пульсаций.

## **2. СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК**

### **2.1. Системы защиты башенных кранов от воздействия ветровых нагрузок**

Системы ветровой защиты грузоподъемных кранов предназначены для измерения скорости ветра, регистрации недопустимой скорости ветра и выдачи звукового и светового сигналов, служащих командой машинисту о прекращении работы. В некоторых случаях сигнал от датчика ветра является командой для приведения в действия автоматических противоугонных захватов [9].

Когда использовались механические ограничители грузоподъемности (ОГП), то для ветровой защиты применялись анемометры. Анемометр – прибор, состоящий из датчика ветра, соединительного кабеля и блока управления. С появлением электронных ОГП функция анемометра входит в состав ОГП. Существует также вариант с использованием электронного ОГП и отдельного анемометра (где сигнал от датчика ветра обрабатывается контроллером).

Работа датчика ветра может быть основана на различных принципах действия: индукционном, оптоэлектронном и эффекте Холла. На сегодняшний момент применяются оптоэлектронные и холловские датчики ветра.

В оптоэлектронных датчиках используется 3-х секундный интервал усреднения и в зависимости от получаемых импульсов рассчитывается скорость ветра. Назначение периода осреднения в 3с объясняется требованием безопасности по переводу крана в нерабочее состояние. В датчиках на основе эффекта Холла используется цифровая линия передачи сигналов и существует возможность установки и изменения частоты опросы датчика. Система ветровой защиты с холловским датчиком является более гибкой и наиболее адаптирована к реальным условиям эксплуатации.

Согласно инструкции по эксплуатации для перевода крана в нерабочее состояние машинисту следует выполнить достаточное количество операций [10]. Следует отметить существенный недостаток в инструкции, заключающийся в том, что при резком усилении ветра крановщик остается в кабине и в случае воздействия экстремальных порывов он находится в зоне прямой опасности. Следующий недостаток связан с отсутствием предписаний при отсутствии информации об усилении ветра. В этом случае, в принципе, невозможно установить требования. Другой недостаток связан с тем, что при эвакуации крановщика возникающие порывы различной интенсивностью и повторяемостью представляют для него серьезную угрозу. Вышеупомянутые недостатки являются несоответствием требованиям промышленной безопасности.

Поэтому актуальным направлением является проектирование системы интеллектуального управления с функцией прогнозирования скорости и направления ветра.

Отметим, существующие ОГП с функциями анемометра (ОНК-160Б, ОГМ-240) обладают недостатком, который заключается в отсутствии функции прогнозирования скорости ветра. Попытки создания прогнозной системы для башенных кранов продемонстрированы в [11].

### **2.2. Система автоматического контроля устойчивости башенных кранов**

Решение второй задачи заключается в разработке системы автоматического интеллектуального управления, которая интегрируется в существующую систему управления башенного крана, и является системой предупреждения о возникновении опасных ветровых нагрузок. Для обеспечения устойчивости башенных кранов в алгоритме управления необходимо использовать идею прогнозирования ветровых нагрузок. В качестве аппарата для реализации прогнозирования выбраны искусственные нейронные сети (ИНС).

Предложенный способ основан на прогнозировании опасного нарастания скорости ветра и его направления. Идея заключается в сборе текущей информации, получаемой с совокупности датчиков, ее обработки и прогнозировании скорости и направления ветра в следующий момент времени. В случае прогноза недопустимо высокой скорости это позволит заранее автоматически обеспечить поворот стрелы (башни и стрелы) крана «по ветру» до возникновения критического момента от ветровой нагрузки и заблаговременно принять меры к эвакуации машиниста.

Достаточным условием безопасности является выдача системой управления прогностического сигнала управления для начала срабатывания привода поворота до возникновения критического опрокидывающего момента от ветра. За счет этого при повороте наветренная площадь крана уменьшается, что ведет к снижению давления от ветровой нагрузки, которая будет действовать в следующие моменты времени [12,13].

В [14,15] рассмотрены некоторые варианты реализаций системы управления приводом поворота с упреждением при возникновении порывов ветра.

Система нейросетевого прогнозирования интегрируется в существующую систему управления краном путем дополнительного оснащения программируемого логического контроллера (ПЛК) платой расширения с нейросетевым алгоритмом. Требуемые датчики для работы системы имеются в существующем ограничителе грузоподъемности ОНК160Б – датчик скорости ветра, датчик положения стрелы и датчик высоты подъема, датчик вылета грузовой тележки. Дополнительно, башенный кран необходимо оснастить датчиком направления ветра.

Программа, реализующая нейросетевую модель, записывается в память платы расширения и при прогнозировании опасных порывов ветра с определенным упреждением ПЛК заблаговременно подает сигнал управления для обеспечения поворота. Т.е. на основе измеренных значений датчиков формируется прогноз будущих значений на несколько шагов вперед. В алгоритме ПЛК предусмотрена блокировка, исключающая возможный удар крюковой подвески о возводимый объект при экстренном повороте стрелы (башни и стрелы).

В алгоритме ПЛК используются необходимые уставки, входные и выходные сигналы и логические соотношения.

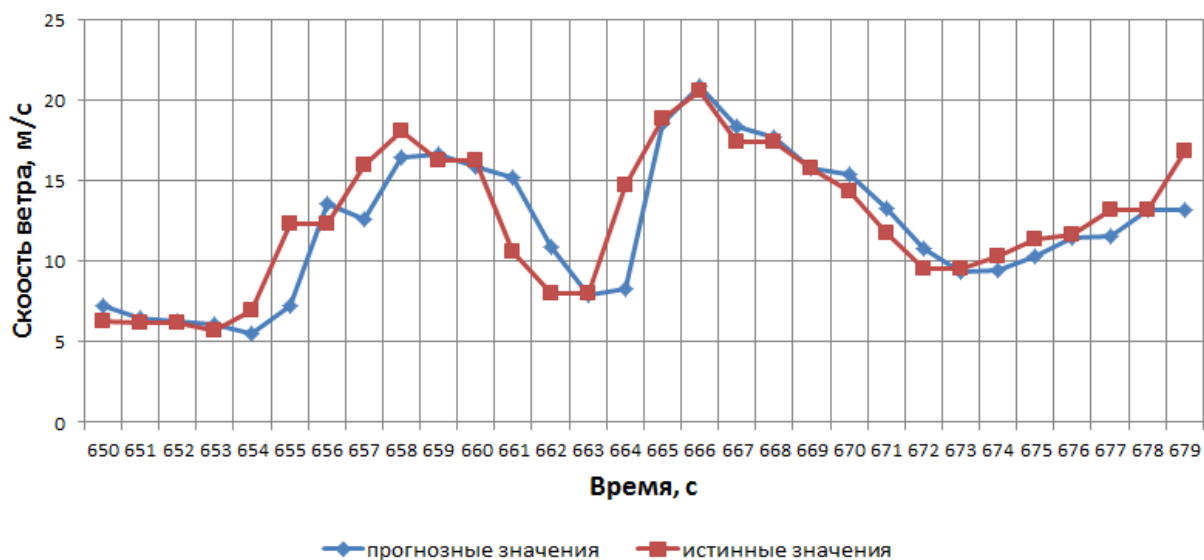
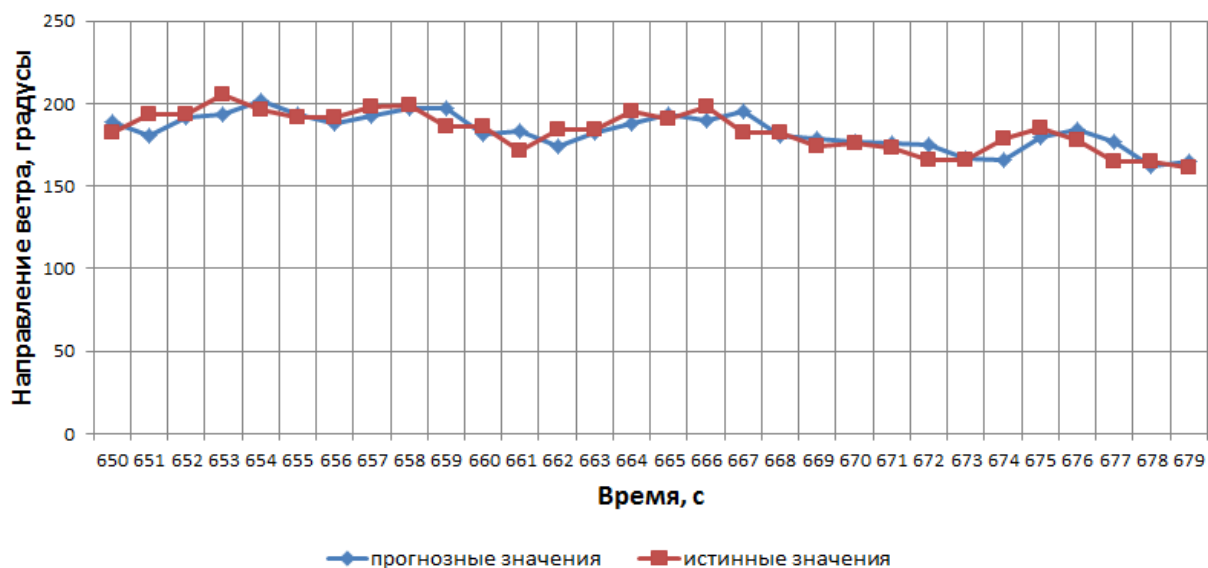


Рис. 4. Результат прогнозирования скорости ветра (фрагмент)



**Рис. 5.** Результат прогнозирования направления ветра (фрагмент)

Серия вычислительных экспериментов основана на итерационном имитационном моделировании ИНС в программном комплексе MatLab. Для моделирования ИНС использовалась сеть прямого распространения с линией задержки. Результаты моделирования для реализаций, изображенных выше, представлены на рис. 4,5.

Планируется продолжить моделирование системы управления на основе пополняемой базы данных параметров ветра для выявления недостатков и внесения корректировок в алгоритм нейросетевого прогнозирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были получены некоторые результаты. Для продолжения исследования требуется проведение новых натурных и вычислительных экспериментов.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536с.
2. ГОСТ 1455-77 Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения. – Введ. 1978-01-01
3. Руководящий нормативный документ. Краны башенные строительные. Нормы расчета. РД 22-166-86. – Введ. 1987-01-01
4. Обыденков В.А. Устойчивость грузоподъемных машин в период сильных порывов ветра: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2009. 141с.
5. Г.А. Савицкий Ветровая нагрузка на сооружения М.: Стройиздат, 1972. – 110с
6. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения/Пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово; Под ред. Б.Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984. – 360с., ил. – Перевод. изд.: Wind Effects on Structures/E. Simiu, R. Scanlan (1978).
7. Мишин, А.В. Разработка системы безопасности башенных кранов с учетом частотного состава ветрового нагружения / П.А. Сорокин, К.С. Хряков // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: материалы XVII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, и молодых ученых.



- М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва: МГСУ, 2013. – 324с., с 82-84
8. Мишин А.В. Спектральная оценка динамических ветровых нагрузок, действующих на башенные краны / П.А. Сорокин // Будущее машиностроения России: сб. тр. Шестой всерос. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 25-28 сентября 2013 г. / Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 360 с, с. 345-347
  9. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов: ПБ 10-382-00: утверждены Госгортехнадзором России 31.12.99: с изменениями от 28.10.2008 г. – Екатеринбург: Урал Юр Издат, 2012. – 222 с.
  10. Объединение машиностроительных заводов группы компаний СУ-155 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.omzv.ru/> (дата обращения: 01.10.2013)
  11. Чан Дык Хиеу Устойчивость стационарных башенных кранов при действии резких порывов ветра в условиях Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 130с.
  12. Мишин А.В. Устойчивость башенных кранов в условиях ветрового воздействия / А.В. Мишин, К.С. Хряков, Чан Дык Хиеу // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: материалы XVII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, и молодых ученых. – М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва: МГСУ, 2013. – 324с., с 85-87
  13. Мишин А.В. Компенсация экстремальных ветровых возмущений для сохранения устойчивости башенных кранов от опрокидывания / А.В. Мишин // Будущее машиностроения России: сб. тр. Шестой всерос. конф. молодых ученых и специалистов, Москва, 25-28 сентября 2013 г. / Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 360 с, с. 350-352
  14. Сорокин П.А. Реализация системы управления башенными кранами в условиях ветрового нагружения / А.В. Мишин, К.С. Хряков, Чан Дык Хиеу // Очно-заочная Международная научно-техническая конференция «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР-17) 2012
  15. Сорокин П.А. Устойчивость башенных кранов от опрокидывания при случайном воздействии порывов ветра / А.В. Мишин // TTS 9/12 Technika transport szynowego

## **THE COMPENSATION SYSTEM OF WIND LOADING FOR CONTROL THE TOWER CRANES STABILITY**

### *Abstract*

*The article deals with the implementation of compensation system of wind loading for preserve tower cranes stability.*

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Pavel Sorokin

mgr inż. Alexey Mishin – Moscow State University of Railway Communications (MIIT)