

Совершенствование методов проектирования контактной сети

Кудряшов Е. В., Чередников Д. И., Мартыненко Е. В.

ЗАО «Универсал – контактные сети», Санкт-Петербург, Россия

Проектирование контактной сети в широком смысле включает в себя опытно-конструкторские работы, разработку типовых проектных решений и проектирование электрификации или реконструкции контактной сети на конкретных участках железных дорог. Процесс проектирования сопряжен с выполнением большого числа инженерных расчетов. До последнего времени многие расчеты выполнялись по упрощенным методикам, разработанным еще в середине прошлого века. Например, при расчетах проводов до последнего времени применялся устаревший метод допустимых напряжений; механические расчеты контактных подвесок велись по приближенным формулам с использованием эмпирических коэффициентов; при подборе жестких поперечин по несущей способности не учитывались сосредоточенные моменты от конструкций типа консольных стоек и т.д. [1, 2]. В повседневной практике проектирования было принято использовать таблицы и номограммы, составленные для некоторых типовых условий применения, иногда отличных от тех, для которых разрабатывается конкретный проект. Кроме того, некоторые сложные вопросы, такие как особенности размещения проводов на конкретных жестких поперечинах станций, зачастую вообще на этапе проектирования досконально не прорабатывались, и фактически решались уже на этапе монтажа.

Повышение скоростей движения и ужесточение требований к контактной сети диктуют необходимость совершенствования методов проектирования. В последние годы УКС активно ведет работы по совершенствованию методов проектирования с учетом новых возможностей, открывшихся благодаря развитию вычислительной техники, а также с учетом применения положений современных международных нормативных документов по контактной сети [3, 4, 5 и др.].

На основе усовершенствованных методов УКС разрабатывает программные средства автоматизации проектирования. На сегодня УКС разработано более 20 специализированных программных модулей, составляющих рабочий инструментариум инженера-проектировщика. В их числе прикладные компьютерные программы для решения следующих задач:

1. Расчет распределенных нагрузок на свободно подвешенные провода и контактные подвески.
2. Расчет сосредоточенных нагрузок, передаваемых от свободно подвешенных проводов и контактных подвесок на поддерживающие конструкции.

3. Определение максимально допускаемых длин пролетов контактной подвески по критериям ветроустойчивости и соблюдения вертикальных габаритов контактного провода.

4. Механический расчет свободно подвешенного провода и составление монтажных таблиц и кривых при жестко закрепленных или подвижных узлах подвешивания (в качестве примера на рис. 1а показан интерфейс программы).

5. Выбор типовых наклонных неизолированных консолей и фиксаторов в зависимости от условий применения (рис. 1б).

6. Выбор типоразмеров и параметров горизонтальных изолированных консолей и фиксаторов в зависимости от условий применения (рис. 2а).

7. Выбор схем фиксации контактной подвески на жестких поперечинах и построение монтажных чертежей.

8. Расчет нагрузок и изгибающих моментов на консольные опоры и выбор типовых опор (рис. 2б).

9. Расчет нагрузок и изгибающих моментов на стойки жестких поперечин и выбор типовых стоек.

10. Расчет нагрузок и изгибающих моментов на жесткие поперечины и выбор типовых ригелей (рис. 3а).

11. Расчет рациональных параметров прохода компенсированной контактной подвески в искусственных сооружениях (рис. 3б).

12. Расчет рациональных параметров прохода полукомпенсированной контактной подвески в искусственных сооружениях.

13. Расчет мерных струн контактной подвески и выпуск монтажных чертежей установки струн.

14. Построение схем армировок опор и жестких поперечин, выпуск соответствующих монтажных чертежей.

15. Формирование сводных, поанкерных и поопорных спецификаций на перегонах и станциях.

16. Формирование планов контактной сети в интерактивном электронном формате.

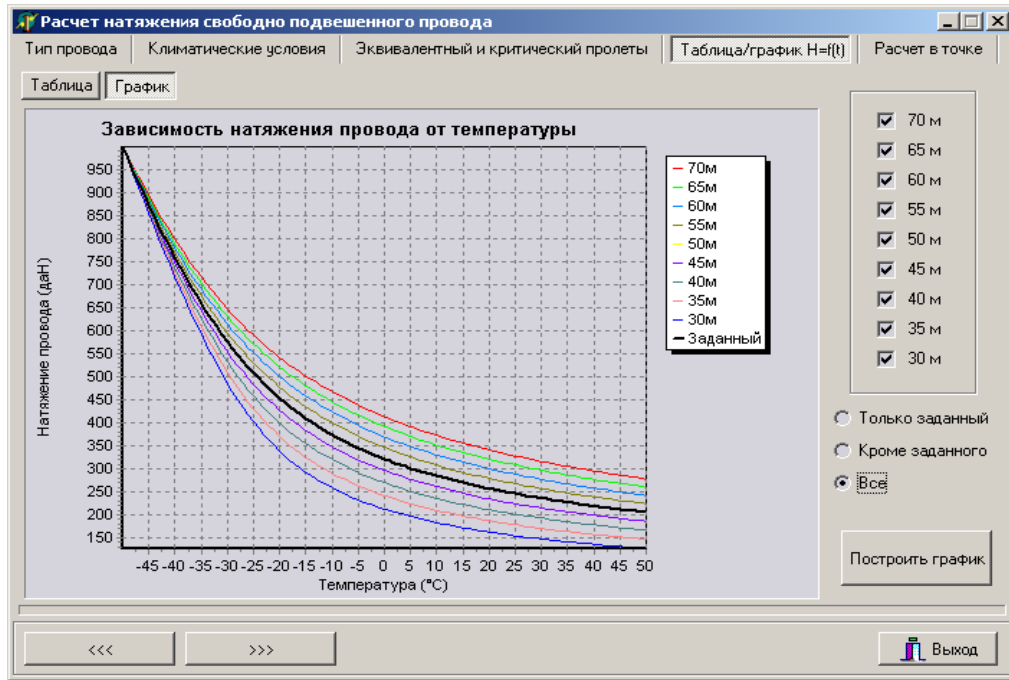
17. Расчет статических параметров контактной подвески на основе моделирования методом конечных элементов (2D).

18. Расчет статических параметров контактной подвески на основе пространственного моделирования методом конечных элементов с учетом внешних воздействий (3D).

19. Расчет динамических параметров контактной подвески как отдельной системы на основе моделирования методом конечных элементов.

20. Расчет параметров динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески.

а)



б)

Отм.	Ноп	Пр	Тип	Г, м	Л, м	В, м	hg, мм	Z, мм	ЖР	ВС	ГФ	Р-Конс.	Р-Фикс.	Р-Стр.	Р-Доп.	А+
46	o															
48	o			3,60	20,0	460		350				НТ-2п-3.0	Ф0-2у-3.0	УКС 01929	3(3) 7-8 ФНТ	
51	o			3,76	20,0	1000		350				НТ-2п-3.0	Ф0-3у-3.0	УКС 01929	2(3) 10-11	
55	o			4,41	50,0			-300				НК-2-5	ФП-3-3.0	УКС 01929	1-2/3 12-13	
57	o			5,63	50,0			300				НК-4-6.5	Ф0-5-3.0	УКС 01929	7-8/5 5-6 + ст	
61	o			4,69	50,0			-300				НК-3-5	ФП-3-3.0	УКС 01929	8-9/6 7-8	
65	o	НБ		4,69	50,0			300				Н-3-5	Ф0-4-3.0	УКС 01929	6-7/8 6-7 + ст Н-3п	
69	o	НА		4,57	50,0			-300				НК-2-5	ФП-3-3.0	УКС 01929	2-3/4 9-10 Н-3п	
71	o			4,60	50,0			300				НК-3-5	Ф0-4-3.0	УКС 01929	7-8/5 4-5 + ст	
75	o			4,42	52,0	610		400				Н-3п-6.5	Ф0-3у-3.0	УКС 01929	5-6/7 9-10 + с	
77	o			4,15	44,0	610		375				Н-3п-6.5	Ф0-3у-3.0	УКС 01929	7-8/9 6-7	
81	o			3,27	40,0	610		300				НТ-2п-3.0	Ф0-2у-3.0	УКС 01929	4(3) 4-5	
83	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
85	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
87	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
89	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
91	o	С		3,80	50,0							НТ-2п-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 7-8	
93	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
95	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
97	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
99	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
101	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
103	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
105	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
107	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
109	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	
111	o			3,30	50,0							НТК-1-3.0	ФП-2-3.0	УКС 01929	3(3) 8-9	

Рис. 1. Примеры интерфейса программ: а) механического расчета свободно подвешенного провода; б) выбора типовых наклонных неизолированных консолей и фиксаторов в зависимости от условий применения

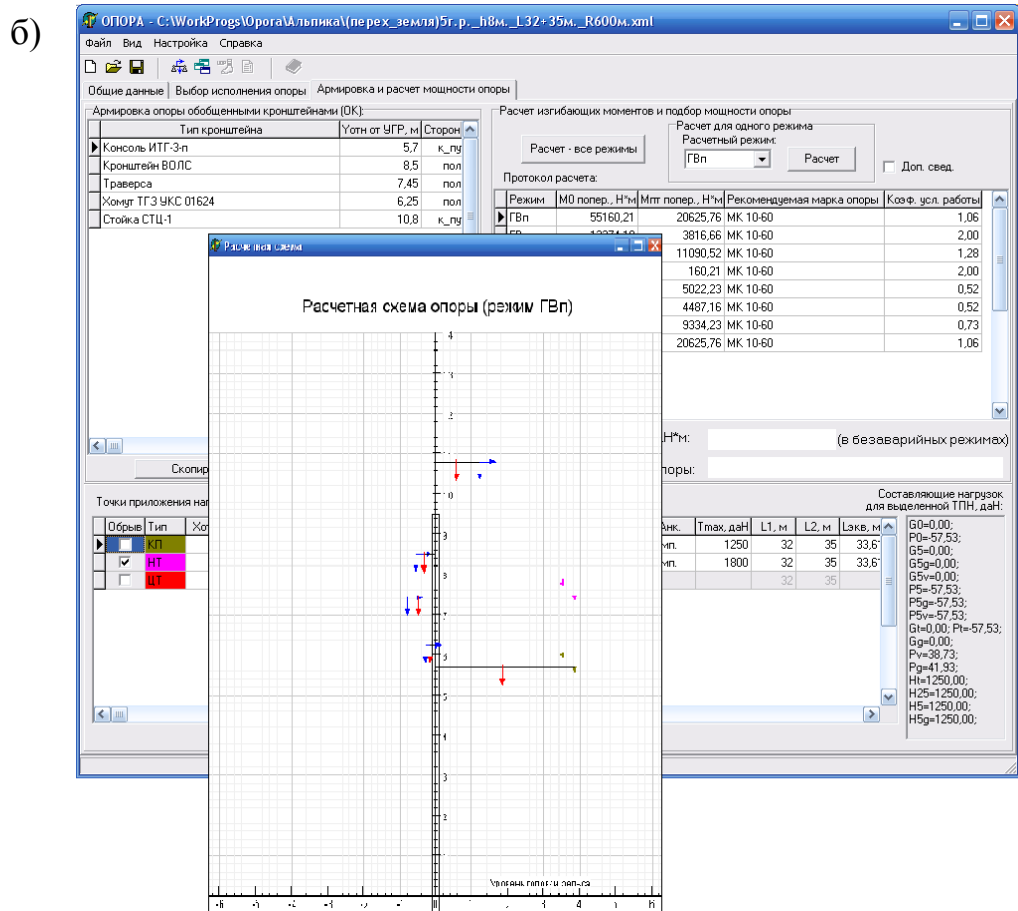
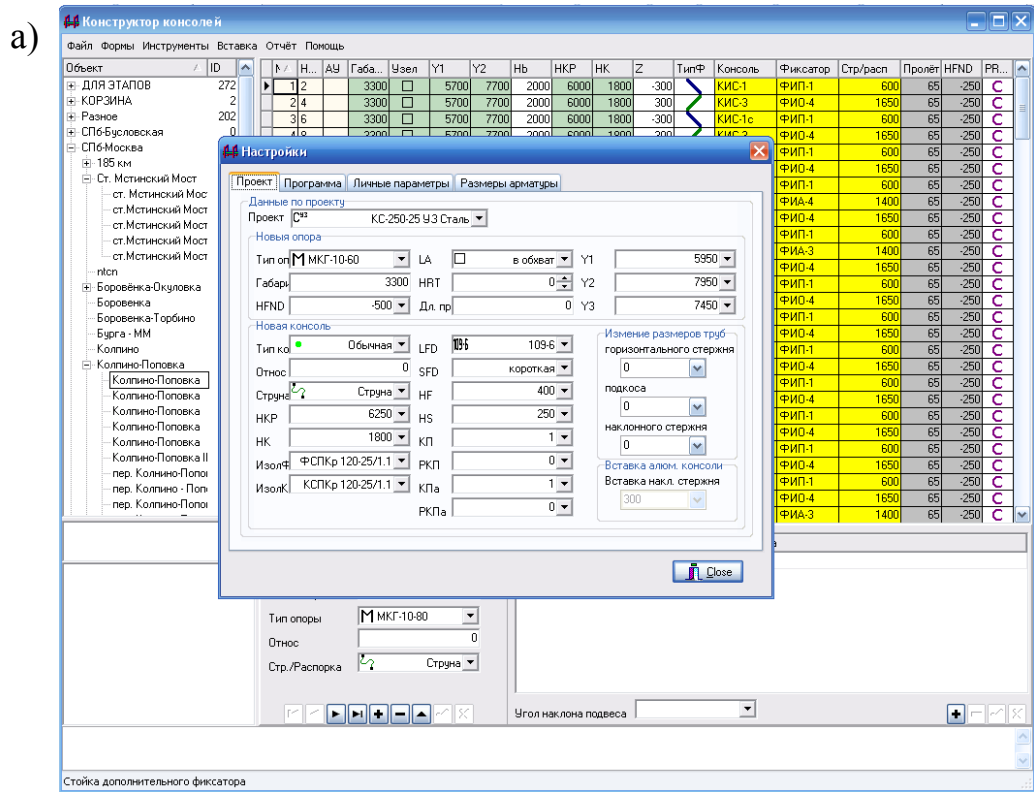


Рис. 2. Примеры интерфейса программ: а) выбор параметров горизонтальных изолированных консолей и фиксаторов в зависимости от условий применения; б) расчет нагрузок и изгибающих моментов на консольные опоры и выбора типовых опор

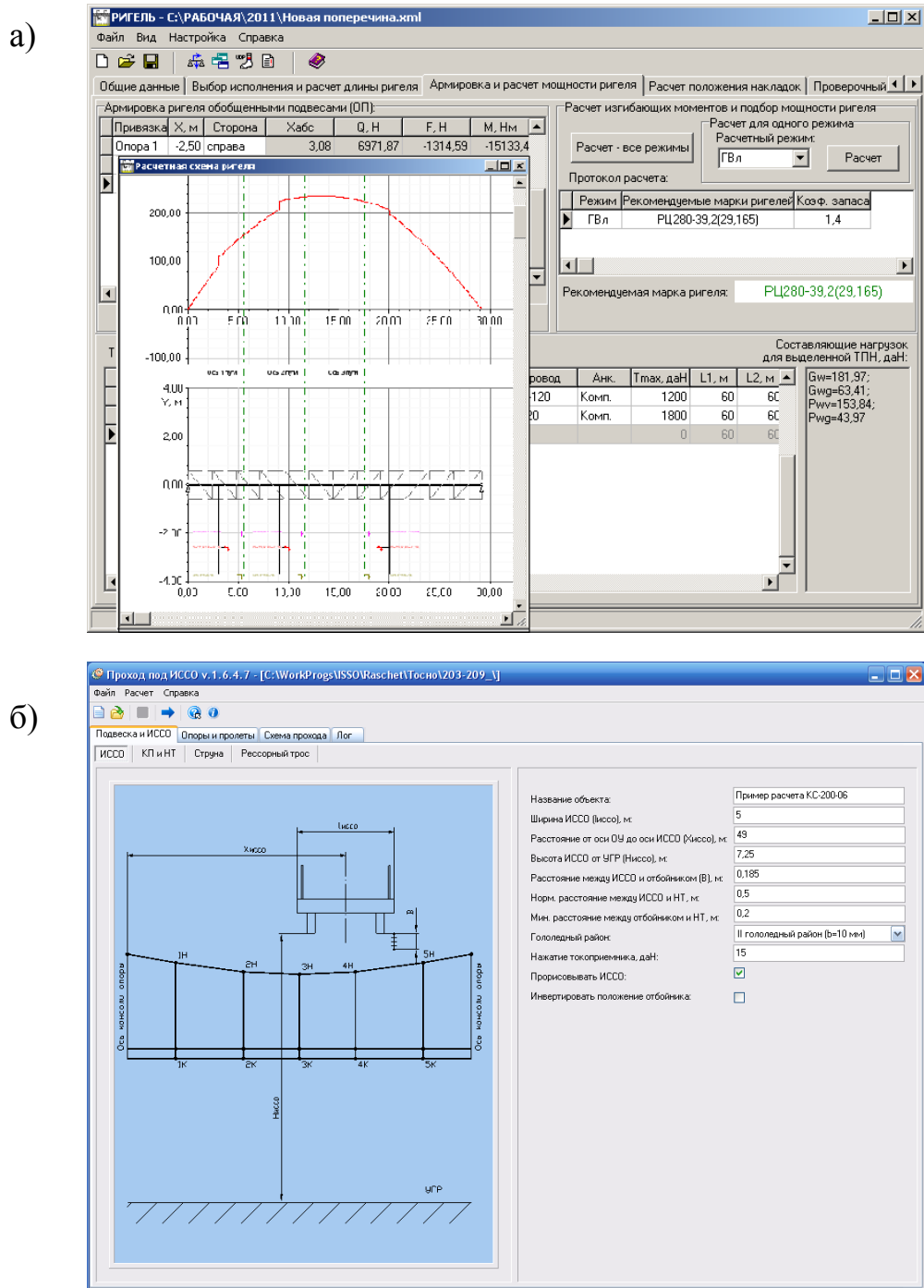


Рис. 3. Примеры интерфейса программ: а) расчет нагрузок и изгибающих моментов на жесткие поперечины и выбора типовых ригелей; б) расчет параметров прохода контактной подвески в искусственных сооружениях

Рассмотрим некоторые примеры, касающиеся совершенствования методов расчетов, используемых при проектировании.

1. Расчет допустимых натяжений проводов

По российским нормам [2, 6] расчет натяжений проводов производится по *методу допустимых напряжений*, коэффициент запаса принимается не менее 2,5. Применение метода допустимых напряжений не позво-

ляет реализовать натяжения, требуемые для обеспечения требуемых параметров взаимодействия токоприемников и контактной подвески при высоких скоростях движения (200 км/ч и более). Поэтому в ведущих европейских странах расчет допускаемых натяжений проводов для скоростной и высокоскоростной контактной сети выполняется по *методу предельных состояний* в соответствии с европейским стандартом EN 50119 [3]. Согласно этому методу критерием надежности служит не напряжение, а предельная нагрузка, которую может выдержать провод, не разрушаясь и не изменяя существенно свои характеристики. Метод позволяет определить предельные возможности провода и установить, тем самым, истинные запасы прочности. При этом вместо ранее применявшегося по методу допускаемых напряжений единого коэффициента запаса прочности используется несколько независимых коэффициентов, учитывающих особенности работы провода, каждый из которых имеет определенный вклад в обеспечение надежности и гарантии от возникновения предельного состояния. Расчет проводов по методу предельных состояний гарантирует ненаступление предельного состояния.

Так, максимальное допустимое натяжение контактного провода K в соответствии с [3] определяется по формуле:

$$K = S \cdot \sigma_{\min} \cdot 0,65 \cdot k_{temp} \cdot k_{wear} \cdot k_{load} \cdot k_{eff} \cdot k_{clamp} \cdot k_{joint}, \quad \text{где}$$

S – площадь сечения контактного провода, мм²,

σ_{\min} – временное сопротивление при растяжении, Н/мм²;

k_{temp} – коэффициент, учитывающий максимальную температуру нагрева контактного провода;

k_{wear} – коэффициент, учитывающий максимально допустимый износ контактного провода;

k_{load} – коэффициент, учитывающий внешние воздействия на контактный провод (нагрузка от гололеда, ветровая нагрузка);

k_{eff} – коэффициент, учитывающий эффективность и точность задания натяжения;

k_{clamp} – коэффициент, учитывающий воздействие арматуры на контактный провод;

k_{joint} – коэффициент, учитывающий наличие сварных и паяных швов.

Значения перечисленных коэффициентов берутся из специальных таблиц в зависимости от материала и условий применения провода.

Применение метода предельных состояний на основе [3] позволяет задать номинальное натяжение контактных проводов БрФ-120 с временным сопротивлением при растяжении $\sigma_{\min} = 411,6 \text{ Н/мм}^2$, применяемых в

настоящее время в конструкциях российских скоростных контактных сетей, равным 2000 даН. При этом общий коэффициент запаса для неизношенного провода получается равным 2,47, а при максимальном местном износе 20% – 1,98.

Применение метода предельных состояний в соответствии с [3] для расчета проводов контактной сети для скоростного и высокоскоростного движения согласовано с Департаментом электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД».

2. Подбор жестких поперечин по несущей способности

До последнего времени подбор ригелей балочного типа при действии расчетных нагрузок в вертикальной и горизонтальной плоскостях вдоль пути осуществляется в соответствии с методиками, изложенными в [1, 7], не учитывающими сосредоточенные моменты от конструкций типа консольных стоек и содержащими большое число упрощений. С учетом современных тенденций отказа от нижних фиксирующих тросов на жестких поперечинах и все более широкого распространения консольных и фиксаторных стоек применение традиционных методов подбора ригелей при проектировании чревато недооценкой их требуемой несущей способности.

УКС разработаны методика и программа подбора типовых жестких поперечин балочного типа в зависимости от схемы армировки поперечины и метеорологических условий, задаваемых пользователем. Новые программа и методика имеют следующие принципиальные отличия от ранее разработанных:

1. Учитываются сосредоточенные моменты, действующие от консольных, фиксаторных стоек, надставок и пр.

2. Расчет производится для расширенного количества расчетных режимов:

- гололеда с ветром (при различных направлениях ветра);
- максимального ветра (при различных направлениях ветра);
- наибольшей снеговой нагрузки;
- минимальной температуры;
- аварийного (обрыв несущего троса по одному из путей).

3. Расчет изгибающих моментов выполняется не только в сечениях 1/2, 1/3 (2/3), 1/4 (3/4) от длины ригеля. Рассчитывается и строится эпюра моментов по всей длине ригеля.

4. Программа позволяет максимально гибко задавать любую армировку ригеля, в том числе с консольными и фиксаторными стойками, Г-образными надставками и другими узлами. База данных узлов, которыми армируется ригель может пополняться прямо из программы

5. Для опытных проектировщиков – пользователей программы имеется возможность контроля и изменения любых промежуточных данных (в т.ч. всех составляющих нагрузок). Имеется возможность анализа влияния

любых параметров на конечный результат – максимальный изгибающий момент и тип ригеля.

Примеры эпюр изгибающих моментов, рассчитанных с применением новой методики для различных вариантов армирования ригеля для подвески по проекту КС-160.11 и расчетных условий III ветрового и IV гололедного районов приведен на рис. 4.

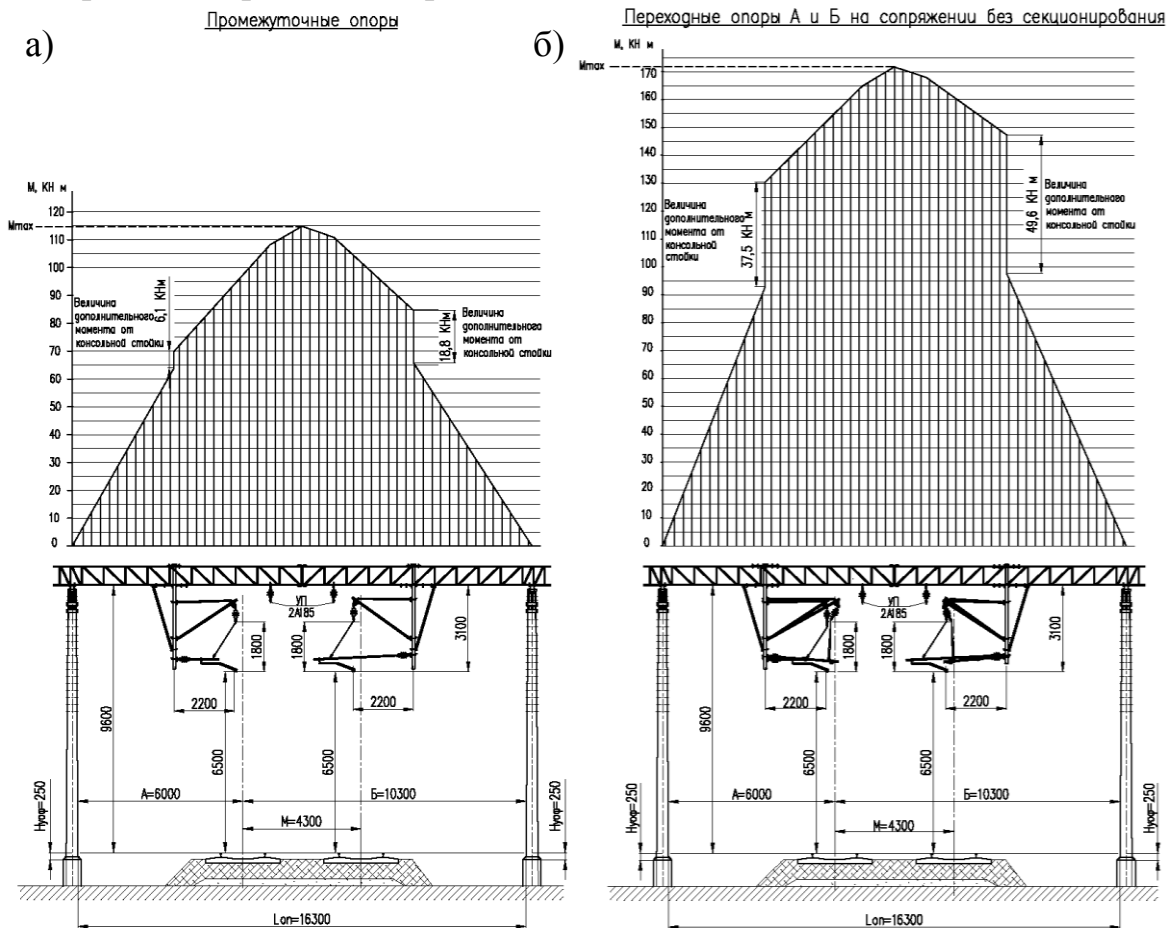


Рис. 4. Эпюры изгибающего момента: а) – промежуточные консольные стойки, б) – переходные консольные стойки

3. Размещение проводов контактной сети на опорах и жестких поперечинах

УКС разработана методика и программа для автоматизированного построения схем армировок опор и жестких поперечин. Программа позволяет детально проработать схемы размещения проводов на опорах и жестких поперечинах с учетом соблюдения всех необходимых электрических и механических расстояний на этапе проектирования, и тем самым упростить последующий монтаж. Данная программа обладает обширной базой блоков конструкций, узлов и элементов контактной сети, которая постоянно дополняется и обновляется. Пример построения армировки жесткой поперечины приведен на рис. 5.

4. Механические расчеты свободно подвешенных проводов и контактных подвесок

При проектировании контактной сети целый класс задач связан с механическими расчетами проводов и контактных подвесок. В их числе:

- расчеты пространственного положения и натяжения проводов;
- расчеты длин струн контактной подвески;
- расчеты эластичности контактной подвески и квазистатической траектории точки контакта;
- расчеты параметров проводов и контактных подвесок при изменением внешних воздействий (изменение температуры, появление добавочных нагрузок от ветра и гололеда и др.);
- расчеты ветроустойчивости контактной подвески;
- динамические расчеты контактной подвески;
- расчеты динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески и др.

Для решения задач этого класса УКС разработаны усовершенствованные методы на основе конечноэлементных математических моделей [8, 9].

Список литературы

1. **Фрайфельд А. В., Брод Г. Н.** Проектирование контактной сети. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
2. Нормы проектирования контактной сети СТН ЦЭ 141-99. – М.: Трансиздат, 2001. – 176 с.
3. **EN 50119:2009.** Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines. – European Standard, CELENEC, 2009.
4. **2002/733/EC.** Commission decision of 30 May 2002 concerning the technical specification for interoperability relating to the energy subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to in Article 6(1) of Directive 96/48/EC // Official Journal of the European Communities. – 12.09.2002. – L 245 / 280–369.
5. **UIC 799.** Characteristics of a.c. overhead contact systems for high-speed lines worked at speeds of over 200 km/h. – Translation International Union of Railways (UIC). – 2002.
6. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. – М.: Трансиздат, 2002. – 184 с.
7. **Проект 5254** «Унифицированные конструкции жестких поперечин балочного типа», ОАО ЦНИИС, 2006.
8. **Кудряшов Е. В.** Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 17.12.10: утв. 10.06.11 / Кудряшов Евгений Владимирович – СПб., 2010. – 187 с.
9. **Кудряшов Е. В.** Проектирование контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта: сб. науч. статей с международным участием. – Омск, ОмГУПС, 2011. – С. 196–206.