



# Инструмент автоматического формирования начальных несовершенств и геометрически нелинейный расчет стальных конструкций в ПК ЛИРА САПР 2021

**Мельников Алексей Александрович**

Ведущий инженер, сопровождение ПК ЛИРА-САПР

[liraland.com](http://liraland.com)

[lira.land](http://lira.land)

[liraland.ua](http://liraland.ua)

**LIRA LAND**  
GROUP

ЛИРА  
СЕРВИС



2021

# Положения норм EN 1993-1-1

## 5.2.1 Влияние перемещений конструкции

## СП РК EN 1993-1-1:2005/2011

(1) Внутренние усилия в общем случае могут быть определены путем:

— расчета по схеме первого порядка, с использованием начальной геометрии конструкции;

— расчета по схеме второго порядка, учитывающего влияние перемещений конструкции (расчет по деформированной схеме, или по-другому, расчет с учетом геометрической нелинейности).

(2) Эффекты деформации геометрической схемы (эффекты второго рода) следует учитывать в случае, если они значительно увеличивают внутренние усилия или значительно изменяют работу конструкции.

(3) Расчет по схеме первого порядка может применяться для конструкции, если увеличением соответствующих внутренних усилий или любым другим изменением работы конструкции, вызванным перемещениями, можно пренебречь. Это условие считается выполненным, если соблюдается следующий критерий:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ — для расчета в упругой стадии,} \quad (5.1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \text{ — для расчета в пластической стадии,}$$

где

$\alpha_{cr}$  — коэффициент, выражающий отношение критической нагрузки для стержня в упругом состоянии к расчетной нагрузке;

$F_{Ed}$  — расчетная нагрузка на конструкцию;

$F_{cr}$  — критическая нагрузка для стержня, полученная путем решения задачи устойчивости в упругой постановке.

$\alpha_{cr}$  is the factor by which the design loading would have to be increased to cause elastic instability in a global mode

$F_{Ed}$  is the design loading on the structure

$F_{cr}$  is the elastic critical buckling load for global instability mode based on initial elastic stiffnesses

EN 1993-1-1:2005

При расчете стальных конструкций важным расчетом является расчет на общую устойчивость. Помимо получения как такового к-та запаса (КЗУ), инженер принимает решение как ему в дальнейшем вести расчет схемы для получения внутренних усилий. Нормы EN это четко регламентируют. То есть будет ли расчет схемы происходить в линейной постановке или в нелинейной.

Первоначально в любом случае мы делаем классический расчет устойчивости по РСН. Если КЗУ в упругом расчете меньше 10, то необходим расчет по схеме второго порядка (геометрическая нелинейность).

Стоит отметить, что КЗУ должен быть получен для глобальной потери устойчивости, а не локальной потери устойчивости одного элемента.

В таких расчетах возможно понадобиться искать несколько форм потери устойчивости. В ПК LIRA САПР пользователь может задать любое кол-во форм потери устойчивости и проанализировать их.

## 5.2.2 Устойчивость рам

### СП РК EN 1993-1-1:2005/2011

(1) Если согласно 5.2.1 должно быть учтено влияние перемещений конструкции на результаты расчета, то учет этого влияния и проверка устойчивости конструкции выполняется по указаниям (2) – (6).

(2) Проверка устойчивости рам или их частей должна быть произведена с учетом несовершенств и эффектов второго рода.

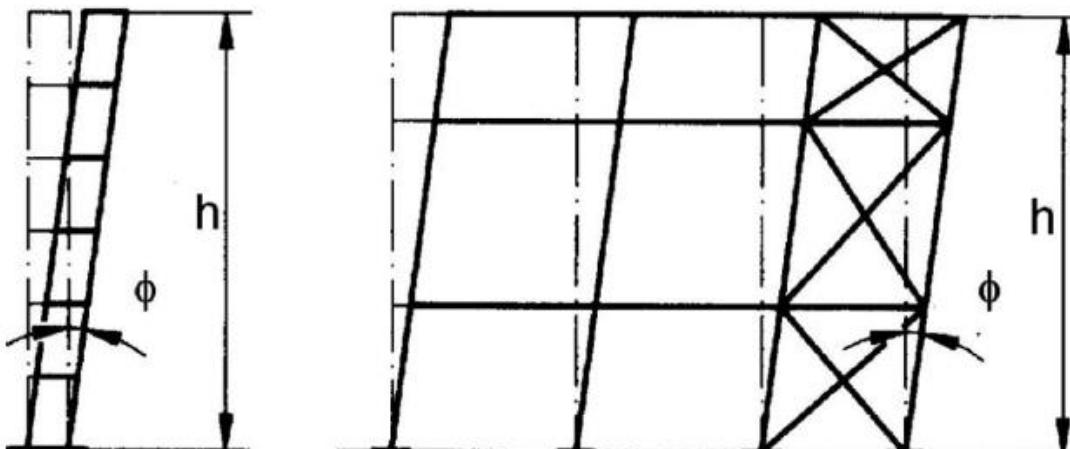
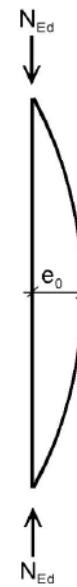


Рисунок 5.2 — Эквивалентные несовершенства при поперечном отклонении

Глобальные несовершенства



Локальные несовершенства

Повторим, что если КЗУ становится меньше 10 для упругой стадии и меньше 15 для пластической стадии, то расчет необходимо проводить с учетом **несовершенств** и эффектов второго рода (геометрической нелинейности).

Эффекты второго рода могут быть учтены с использованием соответствующего расчета конструкции (включая пошаговые или другие итерационные процедуры). Несовершенства могут быть глобальными и локальными (погиби).

(7) Начальные перекосы и начальные местные искривления могут быть заменены системой эквивалентных горизонтальных сил, приложенных к каждой из колонн, см. Рисунки 5.3 и 5.4.

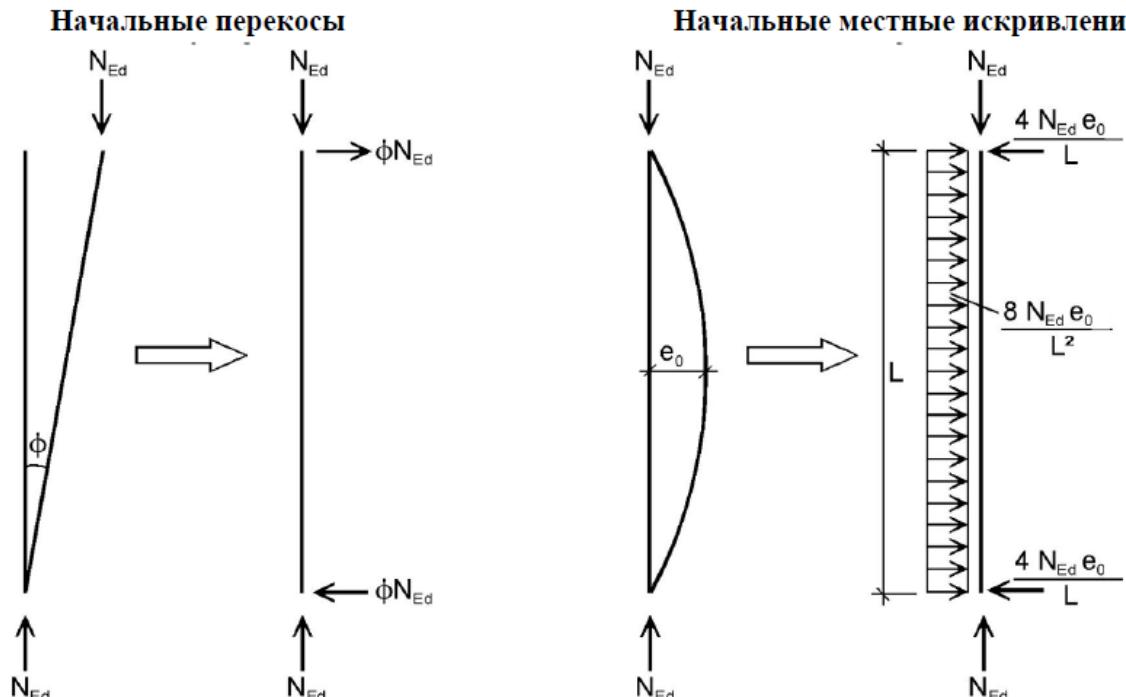


Рисунок 5.4 — Замена начальных несовершенств эквивалентными горизонтальными силами

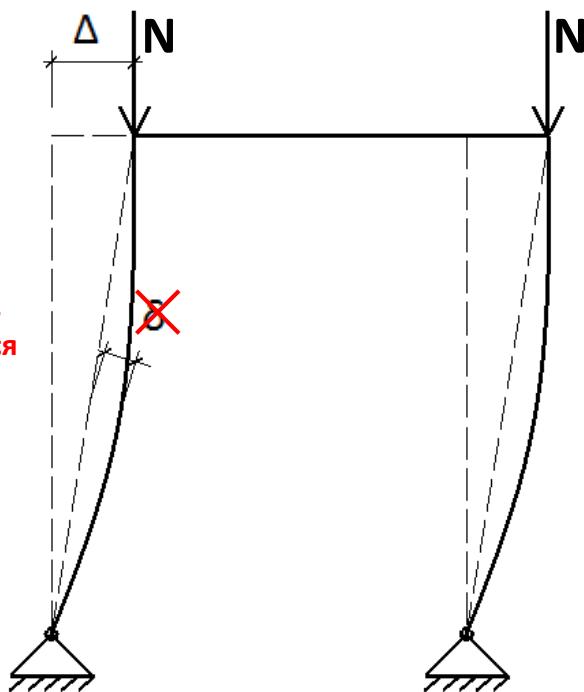
(7) В соответствии с (3) устойчивость отдельных элементов должна быть проверена следующим образом:

а) если эффекты второго рода в отдельных элементах и соответствующие несовершенства элемента (см. 5.3.4) полностью учитываются при общем расчете конструкции, то проверка устойчивости отдельных элементов согласно 6.3 не требуется;

Начальные перекосы и начальные местные искривления могут быть заменены системой эквивалентных горизонтальных сил (п. 5.3.2.7). То есть вместо моделирования реальной геометрии, что на практике является сложной задачей, допускается приложение сил, которые вызовут данные перемещения. Такой подход оказывается значительно проще. Дополнительно есть указания, что если произведен учет несовершенств и эффектов второго рода, то проверка устойчивости отдельных элементов не требуется. Но следует отметить, что для стержней при таком подходе моделирования несовершенств, мы можем смоделировать только выгиб. Несовершенства от кручения таким подходом смоделировать нельзя. Например изгибо-крутильная форма потери устойчивости, либо местная потеря устойчивости (полки, стенки). Для подобных эффектов при моделировании необходимо использовать модели из пластин или объемных конечных элементов.

б) если эффекты второго рода в отдельных элементах или некоторые несовершенства отдельных элементов (например, начальные искривления элемента при проверке устойчивости центрального сжатия и/или устойчивости плоской формы изгиба, см. 5.3.4) не учитываются полностью в общем расчете, то должна быть проверена устойчивость отдельных элементов согласно соответствующим критериям по 6.3 на воздействия, не включенные в общий расчет. Данная проверка должна учитывать усилия на концах элемента, полученные из общего расчета конструкции, включая общие эффекты второго рода и общие несовершенства (см. 5.3.2), если они попадают в пределы расчетной длины.

b) If second order effects in individual members or certain individual member imperfections (e.g. member imperfections for flexural and/or lateral torsional buckling, see 5.3.4) are not totally accounted for in the global analysis, the individual stability of members should be checked according to the relevant criteria in 6.3 for the effects not included in the global analysis. This verification should take account of end moments and forces from the global analysis of the structure, including global second order effects and global imperfections (see 5.3.2) when relevant and may be based on a buckling length equal to the system length



Расчет по деформированной схеме

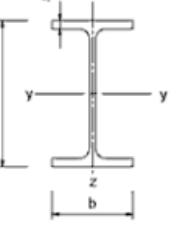
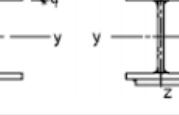
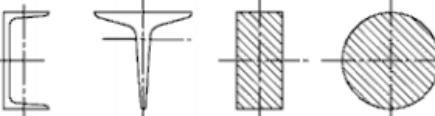
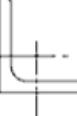
+

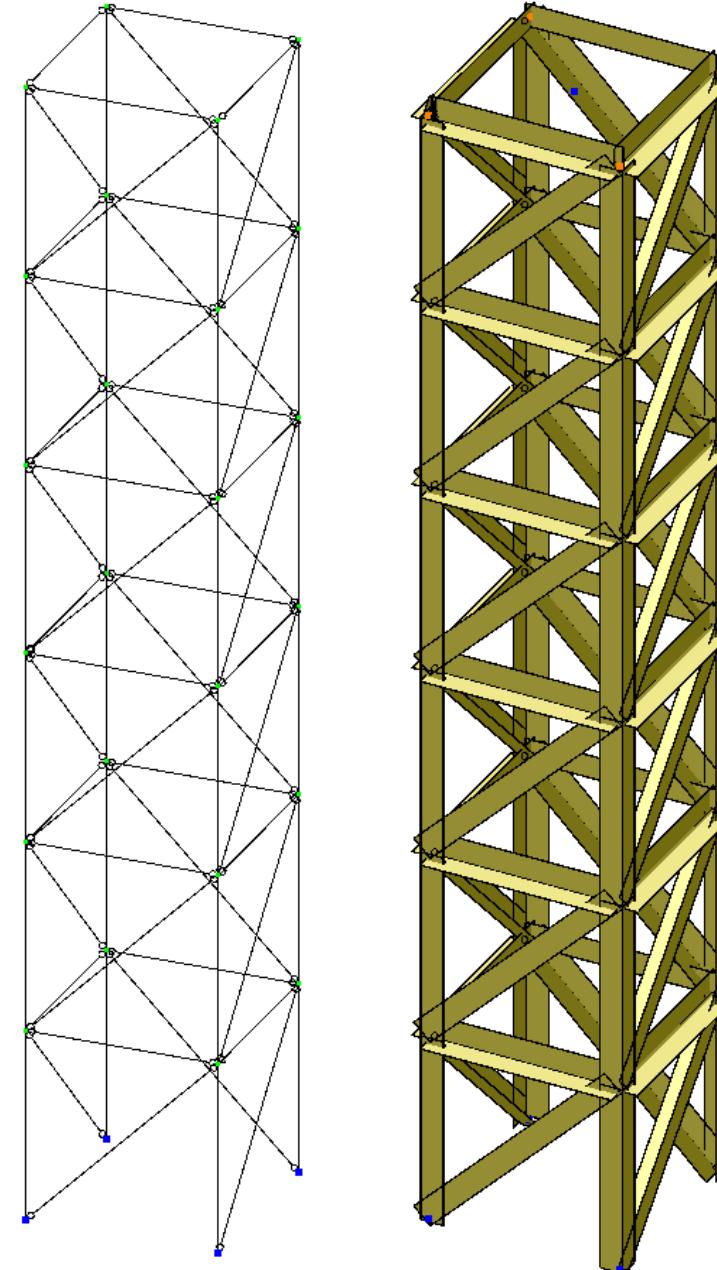
Проверка в СТК устойчивости элементов с  $K=1$   
( $K$ - коэффициент расчетной длины)

Если смоделированы глобальные несовершенства, но нет учета локальных несовершенств, то необходимо выполнить проверку устойчивости всех элементов схемы с коэффициентом расчетной длины равный 1 вне зависимости от закреплений (п.5.2.2.7). Дословный перевод « ... длина продольного изгиба равна длине системы.»

При таком подходе отпадает необходимость в определении расчетных длин. Что существенно упрощает работу инженера

Таблица 6.2 — Выбор кривой потери устойчивости

Поперечные сечения		Пределы	Потеря устойчивости относительно оси	Кривая потери устойчивости	
Прокатные сечения	Сварные двутавровые сечения			S 235	S 460
Сварные двустворчатые сечения		$t_f \leq 40 \text{ мм}$	$y - y$ $z - z$	$a$	$a_0$
		$40 \text{ мм} < t_f \leq 100 \text{ мм}$	$y - y$ $z - z$	$b$	$a$
		$t_f \leq 100 \text{ мм}$	$y - y$ $z - z$	$b$	$a$
		$t_f > 100 \text{ мм}$	$y - y$ $z - z$	$d$	$c$
Замкнутые сечения	Горячедеформированные		Все	$a$	$a_0$
	Холоднодеформирован- ные		Все	$c$	$c$
Сварные коробчатые сечения	В целом (в общем случае) (кроме перечисленных ниже)		Все	$b$	$b$
	С толщиной сварных шовов: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Все	$c$	$c$
Швеллеры, тавры и сплошные сечения			Все	$c$	$c$
Уголки			Все	$b$	$b$



При расчете на устойчивость по пункту 6.3, нормы EN рассматривают достаточно небольшой набор сечений. В основном это прокатные сечения. Для проверки составных колонн в Еврокоде 3 есть раздел 6.4. В этом разделе четко указывается как нужно моделировать колонну в случае если она представляется одним стержнем: с учетом начальных несовершенств и учетом податливости решетки. Далее проверяются только ветви и решетка. Никаких специальных формул для проверки колонны как единого стержня нет, т.к. выполнение вышеуказанных требований по моделированию и проверке ветвей и решетки обеспечивает общую устойчивость.

Чаще используется подход моделирования отдельными элементами и ветви и решетки, выполняется геометрически нелинейный расчет с учетом несовершенств (глобальных) и проверкой устойчивость отдельных стержней с коэффициентом расчетной длины 1 (поскольку локальные несовершенства, погибы, не смоделированы).

(8) Если устойчивость рамы оценена проверкой по методу эквивалентной колонны согласно 6.3, то значения расчетных длин должны быть основаны на форме общей потери устойчивости рамы с учетом жесткостей элементов и соединений, наличия пластических шарниров и распределения сжимающих усилий при действии расчетных нагрузок. В этом случае внутренние усилия, используемые при определении несущей способности, вычисляются согласно теории первого порядка без учета несовершенств.

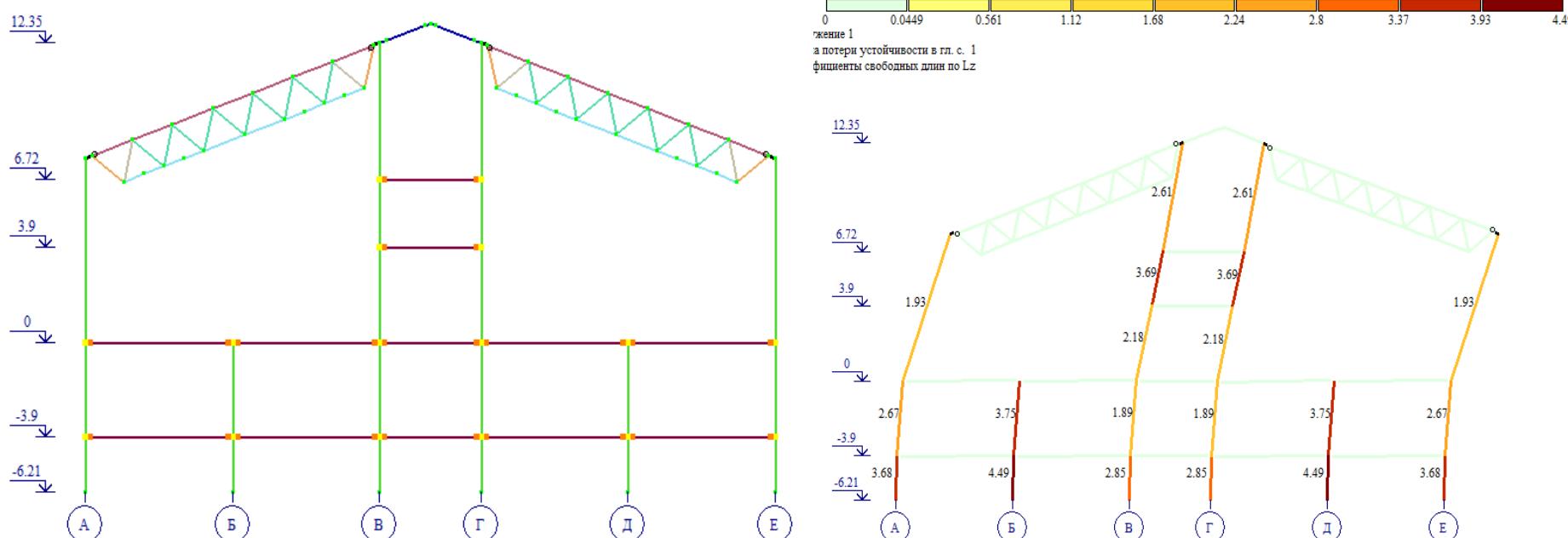
Примечание — В национальном приложении может быть приведена информация об области применения.

Отдельным пунктом 5.2.2(8) представлен еще один подход к проверке устойчивости элементов. Так как существуют схемы которые выходят за рамки, описанные в нормах проектирования стальных конструкций (например нормы РФ или EN). То можно воспользоваться полученным значением расчетных длин из расчета устойчивости. Пример которой представлен на слайде. Как видно из результатов расчета — коэффициенты свободных длин могут превышать «привычное» для инженера значение  $\mu=2$ .

Также следует отметить, что полученные из расчета на общую коэффициенты свободных не могут быть распространены на все элементы схемы.

И стоит добавить для норм РФ, что полученные таким образом расчетные длины не всегда корректно использовать для проверки предельной гибкости.

К примеру, имеем 10-ти этажную раму. Для нижних колонн получили  $\mu=1.5$ , а для верхних  $\mu=6$ . Получается, что верхняя колонна в худших условиях при проверке гибкости. Но понятно, что это не так.



## СП РК EN 1993-1-1:2005/2011

(11) Как альтернатива указаниям (3) и (6) для определения интегрального (общего и местного) отклонения может быть использовано отклонение элемента  $\eta_{cr}$  при потере устойчивости конструкции в упругой стадии. Амплитуда этого отклонения может быть определена по формуле:

$$\eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{EI\eta_{cr,max}''} \eta_{cr} = \frac{e_0}{\bar{\lambda}^2} \cdot \frac{N_{Rk}}{EI\eta_{cr,max}''} \eta_{cr}, \quad (5.9)$$

где  $EI\eta_{cr,max}''$  — изгибающий момент от  $\eta_{cr}$  в критическом поперечном сечении;

$\eta_{cr}$  — отклонение элемента при потере устойчивости в упругой стадии;

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \cdot \frac{1 - \chi \bar{\lambda}^2}{1 - \chi \bar{\lambda}^2} \quad \text{при } \bar{\lambda} > 0,2; \quad (5.10)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad \text{— условная гибкость конструкции,} \quad (5.11)$$

здесь  $\alpha$  — коэффициент несовершенства для соответствующей кривой потери устойчивости, см. таблицы 6.1 и 6.2;

$\chi$  — понижающий коэффициент для соответствующей кривой потери устойчивости, зависящий от соответствующего поперечного сечения, см. 6.3.1;

$\alpha_{ult,k}$  — коэффициент минимального увеличения осевой силы  $N_{Ed}$  для достижения нормативного значения несущей способности  $N_{Rk}$  наиболее напряженного поперечного сечения без учета потери устойчивости;

$\alpha_{cr}$  — коэффициент минимального увеличения осевой силы  $N_{Ed}$  для достижения потери устойчивости в упругой стадии;

$M_{Rk}$  — нормативное значение изгибающего момента, воспринимаемого критическим поперечным сечением, например  $M_{el,Rk}$  или  $M_{pl,Rk}$  соответственно;

$N_{Rk}$  — нормативное значение осевой силы, воспринимаемой критическим поперечным сечением, то есть  $N_{pl,Rk}$ .

Примечание 1 — Для вычисления коэффициентов  $\alpha_{ult,k}$  и  $\alpha_{cr}$  элементы конструкции можно рассматривать как нагруженные осевыми силами  $N_{Ed}$ , полученными из упругого расчета первого порядка конструкции при расчетных нагрузках.

Примечание 2 — В национальном приложении может приводиться информация об области применения (11).



1	0	24	15.35
2	0	12	15.35
3	0	0	15.35
4	8	24	15.35
5	16.765	12	15.35
6	8	0	15.35
7	16	0	15.35
8	8	12	15.35
9	26.98471	22.78895	15.35
10	34.91986	21.77243	15.35
11	42.85502	20.75592	15.35
12	50.78196	17.1424	15.35
13	58.70763	15.12584	15.35
14	77.63553	13.10929	15.35
15	95.08172	7.15188	15.35
16	102.50441	4.16798	15.35
17	109.9271	1.18407	15.35
18	25.45993	10.88622	15.35
19	33.39509	9.8697	15.35
20	41.33024	8.85318	15.35
21	58.50713	5.52989	15.35
22	66.2488	3.51333	15.35
23	73.99047	1.49678	15.35
24	90.60586	-3.98216	15.35
25	98.02855	-6.96606	15.35
26	23.93516	-1.01652	15.35
27	31.87031	-2.03303	15.35
28	39.80447	-1.10485	15.35

5 июня 2019 / Алексей Тищенко

Передача деформированной схемы в начальную геометрию

<https://www.youtube.com/watch?v=CLE7RrrbnJI>

Как альтернатива указаниям передачи горизонтальных для сил для определения интегрального (общего и местного) отклонения может быть использовано отклонение элемента при потере устойчивости конструкции в упругой стадии.

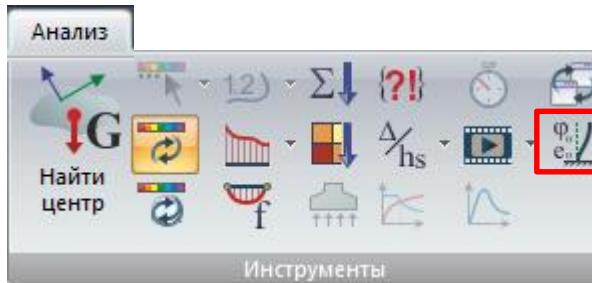
Начиная с версии 2019 ПК ЛИРА-САПР реализована технология построения расчетных схем по текстовым таблицам с данными. Она позволяет автоматизировать передачу данных в ПК ЛИРА-САПР из других программных комплексов, а так же выполнять построение/редактирование расчетной схемы в среде ВИЗОР-САПР с помощью прямой корректировки данных текущей задачи через таблицы ввода.

На нашем канале ЛИРА САПР в YouTube представлено видео, где показано как с помощью функций диалогового окна «Таблицы ввода» можно передать деформированную схему от выбранного загружения/PCH в исходную геометрию с помощью корректировки координат узлов.

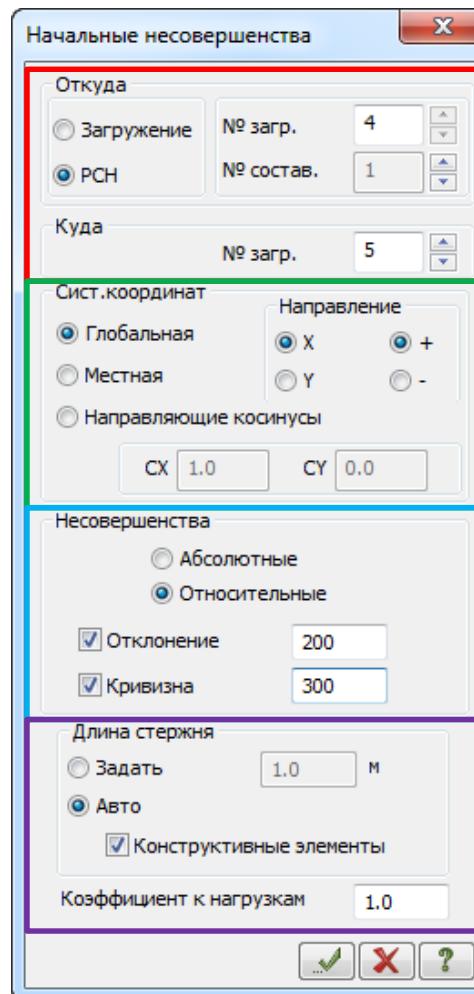


2021

# Реализация несовершенств в ЛИРА САПР 2021



Диалог «Начальные несовершенства» расположен во вкладке АНАЛИЗ в разделе Инструменты (в конце ленты)



Блок 1. Это № загружения или номер РЧН, откуда программа будет «считывать» величину вертикальной нагрузки по результатам МКЭ расчета и в какое загружение будут сформированы эквивалентные горизонтальные нагрузки (несовершенства)

Блок 2 отвечает за систему координат, в которой будут приложены данные силы. Несовершенства могут быть сформированы по любому направлению и под любым углом в плане

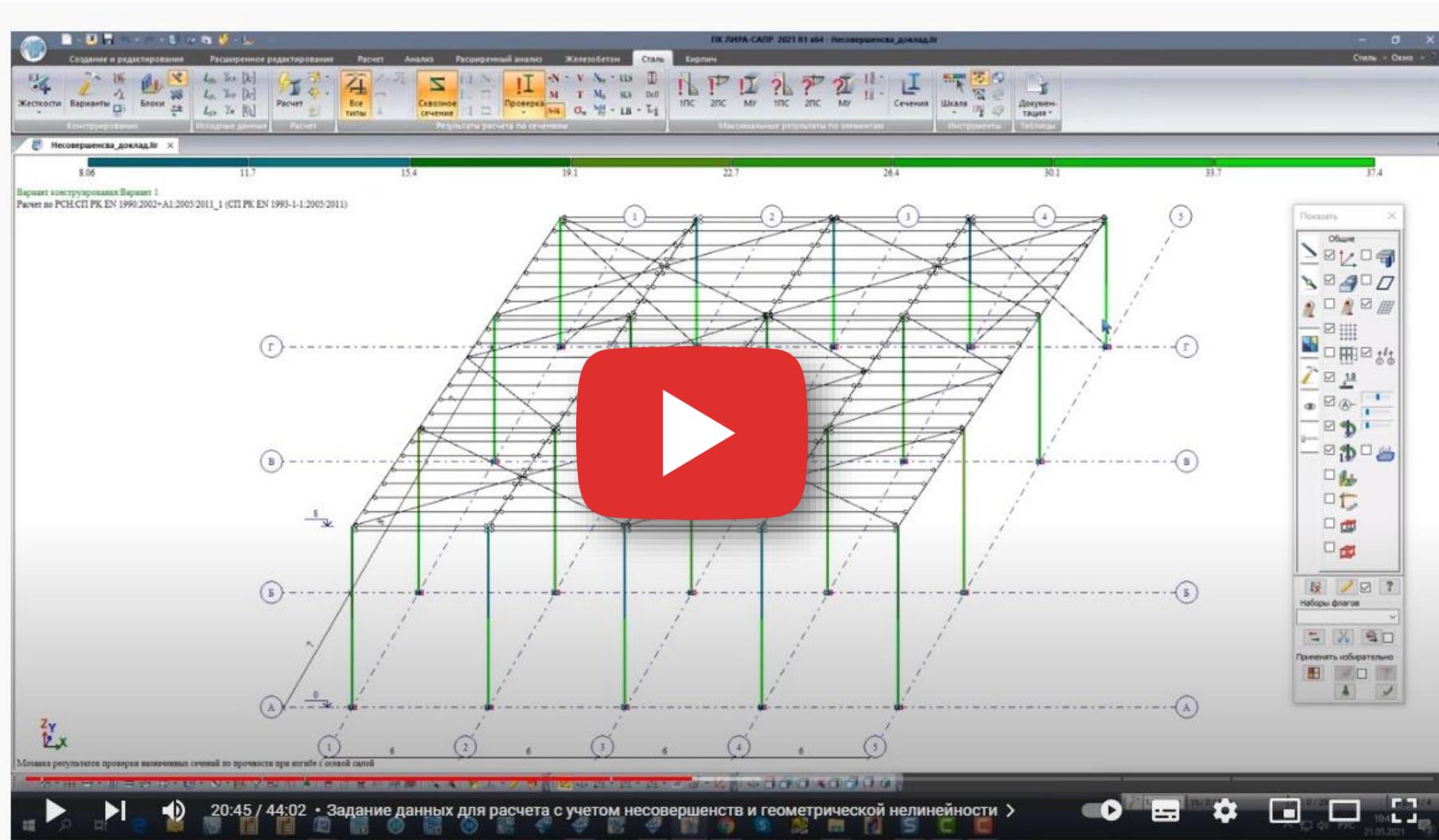
Блок 3. В нем пользователь указывает величины абсолютных или относительных несовершенств

Блок 4. Данным инструментом пользователь может управлять длиной стержня для вычисления кривизны и абсолютных отклонений



2021

# Примеры формирования несовершенств в ЛИРА-САПР



Начальные несовершенства и геомнелинейный расчет для стальных конструкций в ПК ЛИРА САПР 2021

<https://youtu.be/T6V7Kimz45U?t=521>



2021

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Хотелось сказать отдельное спасибо за консультации от коллег по цеху, в частности Андрею Голенкину, основателю проекта Structruristik.com

**Мельников Алексей Александрович**

Ведущий инженер, сопровождение ПК ЛИРА-САПР

