

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛИРА 10.6**

Гераймович Ю.Д., к.т.н., с.н.с.,
Евзеров И.Д., д.т.н., в.н.с.,
Марченко Д.В.,
Шполянський О.Г., к.т.н., с.н.с.,
Група компаній ЛІРА
yury@lira.com.ua

Аннотация. Приведен обзор методов расчета на сейсмические воздействия, реализованных в программном комплексе ЛИРА 10.6 согласно ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010: расчет методом поперечных сил, модальный расчет спектра реакции, нелинейный статический расчет и нелинейный динамический расчет во времени. Реализованные в программном комплексе ЛИРА 10.6 методы расчета зданий и сооружений позволят специалистам использовать в практике проектирования строительные нормы, разработанные на основе национальных научных достижений и гармонизированные нормативные документы Европейского Союза, имплементированные в нормативное пространство Украины.

Ключевые слова: ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010, ПК ЛИРА 10, сейсмическое воздействие, расчет методом поперечных сил, модальный расчет спектра реакции, нелинейный статический расчет, нелинейный динамический расчет во времени.

**РЕАЛІЗАЦІЯ ПОЛОЖЕНЬ ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010
У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЛІРА 10.6**

Гераймович Ю.Д., к.т.н., с.н.с.,
Евзеров І.Д., д.т.н., п.н.с.,
Марченко Д.В.,
Шполянський О.Г., к.т.н., с.н.с.,
Група компаній ЛІРА
yury@lira.com.ua

Анотація. Наведено огляд методів розрахунку на сейсмічні впливи, що реалізовані у програмному комплексі ЛІРА 10.6 згідно ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010: розрахунок методом поперечних сил, модальний розрахунок спектру реакції, нелінійний статичний розрахунок і нелінійний динамічний розрахунок у часі. Реалізовані в програмному комплексі ЛІРА 10.6 методи розрахунку будівель і споруд дозволять фахівцям використовувати у практиці проектування будівельні норми, розроблені на основі національних наукових досягнень і гармонізовані нормативні документи Європейського Союзу, імplementовані в нормативний простір України.

Ключові слова: ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010, ПК ЛІРА 10, сейсмічний вплив, розрахунок методом поперечних сил, модальний розрахунок спектру реакції, нелінійний статичний розрахунок, нелінійний динамічний розрахунок в часі.

**REALIZATION OF DSTU-N B EN 1998-1:2010 REGULATION
IN SOFTWARE PACKAGE LIRA 10.6**

Yuri D. Geraymovich, Ph. D.,
Isaak D. Ievzerov, Dr. Sc.,

Abstract. The article covers the methods of seismic design which are implemented in software package LIRA 10.6 according to DSTU-N B EN 1998-1:2010 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings: lateral force method of analysis, modal response spectrum analysis, non-linear static (pushover) analysis and non-linear time-history analysis. Methods of analysis of buildings and structures, which have been implemented in LIRA 10.6 software package, will allow engineers to use in practical design purposes building codes, which have been developed on the basis of national scientific achievements, and harmonized normative documents of European Union, which have been integrated in the normative field of Ukraine.

Keywords: DSTU-N B EN 1998-1:2010, software package LIRA 10, seismic action, lateral force method of analysis, modal response spectrum analysis, non-linear static (pushover) analysis, non-linear time-history analysis.

Введение. С 1 июля 2014 года в Украине вступил в действие механизм одновременного действия строительных норм, разработанных на основе национальных научных достижений и нормативных документов Европейского Союза, имплементированных в нормативное пространство Украины. Порядок одновременного действия строительных норм определяется постановлением Кабинета Министров Украины от 23 мая 2011 года №547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу».

Анализ нормативных документов. Начало одновременного действия устанавливается с момента вступления в силу ДБН А. 1.1-94:2010 «Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення» [1] и до потери им силы или до прекращения действия строительных норм, разработанных на основе национальных научных достижений.

В 2013 году разработаны Национальные приложения к 58 национальным стандартам, гармонизированных с Еврокодами. Национальные приложения – это дополнения к части Еврокода, содержащие параметры, определяемые на национальном уровне, которые следует использовать для проектирования зданий и сооружений в Украине (национальные приложения, вышли в виде соответствующих изменений).

Изменения к шести частям DSTU-N B EN 1998 были приняты приказом Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства от 27 декабря 2013 года № 629 «Про прийняття Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-1:2010, Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-2:2012, Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-3:2012, Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-4:2012, Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-5:2012, Зміни № 1 DSTU-N B EN 1998-6:2012» с вступлением в силу с 1 июля 2014 года.

Начиная с 1 июля 2014 года в задании на проектирование конструкций зданий и сооружений должно быть определено, по каким нормативным документам выполнять проектирование, одновременное использование обоих нормативных документов при проектировании одного объекта не допускается.

DSTU-N B EN 1998-1:2010 «Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 1. Загальні правила, сейсмічні дії, правила щодо споруд (EN 1998-1:2004, IDT)» [2] устанавливает требования к проектированию зданий и инженерных сооружений в сейсмических районах. Он подразделяется на 10 разделов, требования некоторых разделов распространяются только на проектирование зданий.

- Раздел 1 DSTU-N B EN 1998-1:2010 описывает область применения, ссылки на другие документы и части Еврокода, термины, определения и обозначения, требования к

характеристикам и критерии соответствия.

- Раздел 2 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержит основные требования к характеристикам зданий и инженерных сооружений в сейсмических районах, а также основные критерии, которым должны соответствовать эти здания и сооружения.

- Раздел 3 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержит правила определения сейсмических воздействий и их комбинаций с другими воздействиями. Для некоторых типов конструкций, рассматриваемых в ДСТУ-Н Б EN 1998-2:2012 - ДСТУ-Н Б EN 1998-6:2012 [3-7], требуются дополнительные правила, приведенные в этих частях.

- Раздел 4 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержит общие правила проектирования, относящиеся к зданиям.

- Разделы 5 - 9 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержат особые правила для различных конструктивных материалов и элементов, относящиеся к конкретным видам зданий:

- раздел 5 – для бетонных зданий;
- раздел 6 – для зданий из стальных конструкций;
- раздел 7 – для зданий из составных сталежелезобетонных конструкций;
- раздел 8 – для деревянных зданий;
- раздел 9 – для каменных зданий.

- Раздел 10 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержит основные требования и другие соответствующие положения проектирования и безопасности, относящиеся к изоляции фундаментов конструкций, и в том числе к изоляции фундаментов зданий.

- Приложения А и В ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержат дополнительные сведения, относящиеся к спектру реакции упругого смещения и к заданному смещению для анализа, основанного на последовательности разрушения элементов конструкции при приложенной нагрузке.

- Приложение С ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 содержит дополнительные требования, касающиеся применения арматуры жестких каркасов в бетонных плитах в составных сталежелезобетонных балках в соединении балка-колонна.

Цели. Для того чтобы пользователям ПК ЛИРА дать возможность использовать в практике проектирования строительные нормы, разработанные на основе национальных научных достижений и нормативные документы Европейского Союза программный комплекс был существенно доработан. Ниже речь пойдет о ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 для проектирования в сейсмических районах.

В связи с имплементацией нормативных документов Европейского Союза в Украине, Республике Беларусь [8] и Республике Казахстан [9] модуль динамики для сейсмического воздействия по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8) претерпел существенную переработку при добавлении требований национальных приложений этих стран (рис. 1).

Постановка задачи. При проектировании зданий и гражданских инженерных сооружений в сейсмических районах ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 предлагает использовать следующие методы расчета на сейсмические воздействия:

- расчет методом поперечной (боковой) силы (lateral force method of analysis);
- спектральный метод с использованием модального анализа (modal response spectrum analysis);
- нелинейный статический расчет (non-linear static (pushover) analysis);
- нелинейный динамический расчет (non-linear time-history analysis).

Основной материал. Расчет методом поперечной (боковой) силы применяется к зданиям, реакция которых в значительной степени зависит от основной формы колебаний в каждом главном направлении, при этом здания должны удовлетворять следующим условиям:

- периоды колебаний T_1 в двух основных направлениях меньше следующих значений:

$$T_1 = \begin{cases} 4 \cdot T_C \\ 2.0 \text{ сек} \end{cases},$$

где T_C – верхний период постоянного спектрального ускорения;

- здания отвечают критериям регулярности по высоте, приведенным в п.4.2.3.3 [2];
- сейсмическая сила сдвига в основании F_b для каждого горизонтального направления, по которому проводится расчет здания, определяют по следующей формуле:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda,$$

где $S_d(T_1)$ – ордината горизонтального расчетного спектра при периоде T_1 ;

T_1 – основной период колебаний здания в рассматриваемом поперечном направлении;

m – полная масса здания над фундаментом или над верхом жесткого основания, вычисленная в соответствии с п.3.2.4(2) [2];

λ – поправочный коэффициент; $\lambda = 0,85$, если $T_1 \geq 2 \cdot T_C$ и здание имеет более двух этажей;

$\lambda = 1,0$ – во всех других случаях.

Расчет методом поперечной (боковой) силы в ПК ЛИРА 10.6 добавлен в модуль динамики как для распределения горизонтальных сейсмических сил по основной форме собственных колебаний:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum_{j=1}^n s_j \cdot m_j},$$

так и в случае аппроксимации горизонтальными перемещениями, линейно увеличивающимися по высоте:

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum_{j=1}^n z_j \cdot m_j},$$

где F_i – горизонтальная сила, воздействующая на i этаж;

F_b – сейсмическая сила сдвига в основании;

m_i – масса m_i этажа, рассчитанная в соответствии с п.3.2.4(2) [2];

s_i – смещение массы m_i по основной форме колебания;

z_i – высота массы m_i над уровнем приложения сейсмического воздействия (фундамент или верх жесткого основания).

Спектральный метод с использованием модального анализа должен применяться к зданиям, которые не удовлетворяют условиям для расчета методом поперечной (боковой) силы. В ПК ЛИРА 10.6 расчет спектральным методом реализован с возможностью использовать как упругий, так и неупругий спектры реакции. В расчете необходимо учитывать такое количество форм собственных колебаний, чтобы сумма эффективных модальных масс составляла не менее 90 % от общей массы здания. Сочетание модальных реакций по различным формам собственных колебаний реализовано в двух вариантах:

- 1) по правилу квадратного корня SRSS (Square Root of the Sum of Squares), если модальные реакции можно рассматривать как независимые друг от друга;
- 2) по полной квадратичной комбинации CQC (Complete Quadratic Combination), если модальные реакции не могут рассматриваться как независимые друг от друга.

Для оценки поведения конструкций при сейсмическом воздействии за пределами упругости в ПК ЛИРА 10.6 используют нелинейный статический метод, известный, как анализ на предельную прочность. Нелинейный статический метод, основанный на последовательном разрушении элементов сооружения под действием приложенной нагрузки, выполняемый в условиях постоянных гравитационных нагрузок и монотонно возрастающих горизонтальных нагрузок.

Параметры сейсмического воздействия по EN 1998-1:2004 (Eurocode 8)

Расчет

по спектру реакции

Сдвигающая сила в основании
(распределение горизонтальных сейсмических сил)

равномерное распределение

линейно возрастающее по высоте

по собственной форме колебаний №

Поправочный коэффициент к инерционным силам

Тип расчета

Тип спектра

Тип грунта

Расчетное ускорение грунта, a_g (п.3.2.1(3)) м/с²

Кoeffициент демпфирования, η (ф.3.6)

Уровень фундамента (жесткого основания)

Нижний показатель границы для горизонтального расчетного спектра, β (п.3.2.2.5(4))

Горизонтальный коэффициент поведения, q

Поправочный коэффициент, λ (п.4.3.3.2.2)

Вертикальный коэффициент поведения, q

Способ суммирования вклада форм

Направляющие косинусы равнодействующей сейсмического воздействия в ГСК

CX CY CZ CX²+CY²+CZ² = 1

Использование спектра реакции из национального приложения

График спектра реакции для горизонтальных осей

Масштабный множитель к графику коэффициента динамичности

Прочитать график коэффициента

Коэффициент динамичности по

Количество точек

Сохранить в файл

	Период,сек	Коэффициент
▶ 1	0	2.5
2	0.48	2.5
3	0.7516667	1.5964523
4	0.8875	1.3521127
5	1.0233333	1.1726384
6	1.1591667	1.0352265
7	1.295	0.9266409
8	1.4308333	0.8386721

График спектра реакции для вертикальной оси

Масштабный множитель к графику коэффициента динамичности

Прочитать график коэффициента

Коэффициент динамичности по

Количество точек

Сохранить в файл

	Период,сек	Коэффициент
▶ 1	0	2.5
2	0.1936	2.5
3	0.4772	1.5923644
4	0.619	1.3981294
5	0.7608	1.261123
6	0.9026	1.1578306
7	1.0444	1.0763642
8	1.1862	1.0099822

Рис. 1. Внешний вид режима задания исходных данных для расчета по EN 1998-1:2004

В ПК ЛИРА 10.6 при выполнении расчета по нелинейному статическому методу задается предшествующая история загрузки рассматриваемой конструкции, дается ссылка на загрузку спектральным методом с использованием модального анализа, в котором задаются параметры сейсмического расчета согласно ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010, указывается номер формы собственных колебаний, для которой будут вычислены инерционные силы для нагружения рассматриваемой конструкции или использование результатов расчета методом поперечной (боковой) силы. В процессе решения задачи результаты сохраняются для дальнейшего анализа и обработки, с шагом указанным пользователем.

Нелинейный статический расчет может применяться для проверки характеристик конструкции вновь проектируемых и существующих зданий в следующих целях:

- для проверки или корректировки значений коэффициента запаса прочности $\frac{\alpha_u}{\alpha_1}$

(п.5.2.2.2, п.6.3.2, п.7.3.2 [2]);

- для оценки предполагаемых пластических механизмов и распределения повреждений;
- для оценки характеристик конструкции существующих или реконструируемых зданий в соответствии с требованиями ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010;
- в качестве альтернативного проектирования, основанного на линейно-упругом расчете, в котором используется коэффициент поведения q . В этом случае целевое смещение, указанное в п.4.3.3.4.2.6(1)Р [2], следует использовать в качестве основы проектирования.

Распределение горизонтальных поперечных сил для нелинейного статического расчета следует применять по одной из схем:

- равномерная схема, основанная на поперечных силах, пропорциональных массе;
- модальная схема, основанная на поперечных силах, пропорциональных основной форме собственных колебаний, при этом используется горизонтальный упругий спектр реакции, $S_e(T)$.

Статические расчеты предполагают, что нагрузки являются постоянными или прикладываются весьма медленно до тех пор, пока они, не достигнут своих полных значений. Такое допущение предполагает, что скорости и ускорения узлов расчетной модели принимаются нулевыми, т. е. статические расчеты пренебрегают инерционными силами и силами демпфирования. Но во многих практических случаях такое приложение нагрузки не соответствует действительности и для таких случаев используется прямое интегрирование уравнений движения. В ПК ЛИРА 10.6 реализовано прямое интегрирование уравнений движения на основе разностной схемы для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой скорости, ускорения и перемещения аппроксимируются конечноразностными выражениями в перемещениях.

Кроме решения линейных и нелинейных задач прямым динамическим расчетом в версии ПК ЛИРА 10.6 была добавлена возможность динамического расчета во времени для смонтированной конструкции. После окончания возведения здания выполняется расчет на нагрузки, изменяющиеся во времени, в том числе на акселерограммы и сейсмограммы землетрясения.

Здания, запроектированные на основе значения коэффициента поведения q превышающего 1.5, должны подтвердить требования к пластичности (п.4.4.2.3(1) [2]). Для зданий коэффициент пластичности определяется на основе горизонтального смещения здания в уровне крыши (статический нелинейный анализ). Важно обеспечить требуемую конфигурацию пластических шарниров и предотвратить хрупкое разрушение (п.4.4.2.3(2)Р [2]). В многоэтажных зданиях ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 (п.4.4.2.3(3)Р [2]) требует исключить формирование пластического механизма этажа, поскольку такой механизм может вызвать чрезмерные требования в местной пластичности для колонн гибкого этажа. В каркасных зданиях, включая эквивалентные каркасные здания, определенные в п.5.1.2(1) [2], с двумя или более этажами, для выполнения требования п.4.4.2.3(3)Р [2] во всех соединениях первичных (несущих) или вторичных (не несущих) сейсмических балок с первичными сейсмическими колоннами должно выполняться следующее условие (ф.4.29 [2]):

$$\sum M_{Rc} \geq 1.3 \cdot \sum M_{Rb},$$

где $\sum M_{Rc}$ – сумма фактических значений несущей способности колонн, примыкающих к узлу; $\sum M_{Rb}$ – сумма фактических значений несущей способности балок, примыкающих к узлу. Под фактическими значениями несущей способности имеется в виду несущая способность с учетом фактической (а не теоретической) арматуры. Выполнение условий п.4.4.2.3 ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 для сейсмического проектирования позволяет

предположить, что возникновение пластических шарниров в балках произойдет раньше чем в колоннах. Проектирование как продольной, так и поперечной арматуры в колоннах зависит от фактической несущей способности балок. Таким образом, необходимо обязательно рассчитать и запроектировать балки прежде, чем приступить к расчету и проектированию колонн.

Требования п.4.4.2.3(1)Р и п.4.4.2.3(2)Р [2] считаются выполненными, если выполняются все следующие условия:

- обеспечиваются механизмы пластического деформирования, определенные путем простого нелинейного статического расчета;
- потребности в общей, межэтажной и местной пластичности, а также потребности в деформативности, определенные простым нелинейным статическим расчетом (с различными схемами горизонтальных нагрузок), не превышают соответствующих возможностей;
- хрупкие элементы работают в упругой области.

Выводы. Разработчики ПК ЛИРА 10.6 надеются, что реализованный инструментарий облегчит проектирование конструкций зданий и сооружений как для строительных норм, разработанных на основе национальных научных достижений так и для нормативных документов Европейского Союза, имплементированных в нормативное пространство Украины.

Литература

1. ДБН А. 1.1-94:2010. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 22 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 1. Загальні правила, сейсмічні дії, правила щодо споруд (EN 1998-1:2004, IDT). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 304 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1998-2:2012. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 2. Мости (EN 1998-2:2005, IDT+ NA:2013). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 197 с.
4. ДСТУ-Н Б EN 1998-3:2012. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 3. Оцінка стану та відновлення будівель (EN 1998-3:2005, IDT+ NA:2013). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 126 с.
5. ДСТУ-Н Б EN 1998-4:2012. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 4. Силосні башти, резервуари та трубопроводи (EN 1998-4:2006, IDT+ NA:2013). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 126 с.
6. ДСТУ-Н Б EN 1998-5:2012. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 5. Фундаменти, підпірні конструкції та геотехнічні аспекти (EN 1998-5:2004, IDT+ NA:2013). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 59 с.
7. ДСТУ-Н Б EN 1998-6:2012. Єврокод 8. Проектування сейсмостійких конструкцій. Частина 6. Башти, вежі і димові труби (EN 1998-6:2005, IDT+ NA:2013). – К.: Мінрегіонбуд, 2012. – 66 с.
8. ТКП EN 1998-1-2011 Єврокод 8. Проектирование сейсмостойких конструкций. Часть 1. Общие правила, сейсмические воздействия и правила для зданий. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2013. – 158 с.
9. СН РК EN 1998-1:2004/2012 Проектирование сейсмостойких конструкций. Часть 1. Общие правила, сейсмические воздействия и правила для зданий. – Астана: Агенство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства, 2012. – 222 с.

Стаття надійшла 29.09.2016