

THE CREATION OF AN INTEGRATED SYSTEM DESIGN OF COMPLEX HIGH-TECH PRODUCTS INSTRUMENT-MAKING ENTERPRISES

E. M. Abakumov, O. V. Ulyanin, D. B. Kozyrev
Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics",
Moscow, Russia

V. K. Kozachok
Productive Technology Systems LTD, Moscow, Russia

This article discusses approaches to the implementation of information systems engineering data management at the enterprise with a large amount of technical archives on paper, reflect the issues of practical implementation of technology-aided product design in the environment of system lifecycle management Windchill in terms of its integration into the existing IT-landscape of the company.

Keywords: electronic structure products, computer-aided design system, product data management, lifecycle management products.

Абакумов Евгений Михайлович, начальник отделения.
E-mail: abakumov@vniia.ru
Ульянин Олег Владимирович, заместитель начальника отдела.
E-mail: oleg@vniia.ru
Козырев Денис Борисович, начальник лаборатории, аспирант.
E-mail: kozirev@vniia.ru
Козачок Вадим Константинович, руководитель проектов.
E-mail: vkozachok@pts-russia.com

Статья поступила в редакцию 23 августа 2014 г.



УДК 65: 681.3

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ
МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

В. В. Жаднов, канд. техн. наук; И. Л. Лушпа
Московский институт электроники и математики национального исследовательского
университета «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Рассмотрены вопросы оценки надежности механических элементов, применяемых в электронных средствах на ранних этапах проектирования. Приведены расчеты интенсивностей отказов пружин виброизоляторов по различным методикам. Показано, что применение моделей интенсивностей отказов механических элементов, учитывающих особенности их конструктивно-технологического исполнения, позволяет решать не только задачи расчета, но и обеспечения требуемого уровня надежности и механических элементов, и содержащих их электронных средств.

Ключевые слова: электронные средства, надежность, виброизоляторы, пружины, интенсивность отказов.

В состав электронных средств (ЭС), наряду с изделиями электронной техники (ИЭТ), входят и механические элементы (МЭ). Однако при расчетной оценке показателей безотказности ЭС влияние отказов МЭ на надежность ЭС не учитывается, так как принимается допущение, что если нагрузки МЭ меньше предельно-допустимых, то вероятность их отказа пренебрежимо мала. Кроме того, и в справочнике "Надежность ЭРИ" [1] данные по характеристикам надежности МЭ не приводятся. Вместе с тем, например, отказы ЭС из-за воздействия вибрации по данным, приведенным в [2], могут достигать 28 % (рис. 1).



Рис. 1. Распределение отказов ЭС по видам воздействий

Одной из причин таких отказов ЭС являются отказы МЭ (виброизоляторов), которые ослабляют вибрационные воздействия на ИЭТ. Амортизатор (виброизолятор) представляет собой конструкцию, объединяющую упругий и демпфирующий элемент. Упругие силы в амортизаторе создаются стальными пружинами, упругой составляющей жесткости резиновых или полимерных элементов, упругостью металлорезины или троса. Силы сопротивления (демпфирование) в конструкции амортизатора образуются в результате сухого трения в материале упругого и демпфирующего элементов и вязкого

трения [3]. На рис. 2 в качестве примера приведен эскиз конструкции виброизолятора типа ДО.

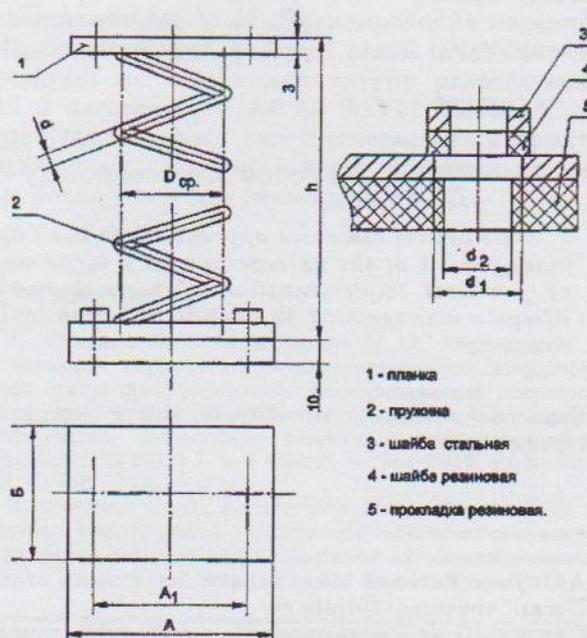


Рис. 2. Конструкция виброизолятора типа ДО

Основные технические характеристики виброизоляторов типа ДО сведены в табл. 1 и 2.

Как видно из рис. 2, основным элементом виброизолятора ДО является пружина, изготовленная из стали надежности в значительной степени определяются надежностью именно этого элемента. По классификации ГОСТ 27.003 [5] пружины относятся к изделиям общего назначения вида I, для которых нормируемым показателем безотказности является интенсивность отказов (λ). Пусть требуемое значение λ пружины для виброизолятора типа ДО-38 составляет $5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

Таблица 1

Технические характеристики виброизоляторов типа ДО

Марка	Нагрузка Р, Н		Вертикальная жесткость, Н/см	Высота в свободном состоянии	Осадка пружины под нагрузкой, мм		Число рабочих витков	Масса, кг
	Раб.	Пред.			Раб.	Пред.		
ДО-38	122	152	45	72	27	33,7	5,6	0,3
ДО-39	219	273	61	92,5	36	45	5,6	0,4
ДО-40	339	424	81	113	41,7	52	5,6	1
ДО-41	540	674	124	129	43,4	54	5,6	1
ДО-42	942	1177	165	170	56	70	5,6	1,8
ДО-43	1648	2060	294,3	192	57,2	72	5,6	2,4
ДО-44	2384	2979	357	226	66,5	83	5,6	3,65
ДО-45	3728	4660	441,5	281	84,5	106	5,6	6,45

Геометрические характеристики виброизоляторов типа ДО

Таблица 2

Марка	Размеры, мм						
	A	A ₁	B	D _{гр}	d	d ₁	d ₂
1	2	3	4	5	6	7	8
ДО-38	100	70	60	30	3	12	8,5
ДО-39	110	80	70	40	4	12	8,5
ДО-40	130	100	90	50	5	12	8,9
ДО-41	130	100	90	54	6	14	10,5
ДО-42	150	120	110	72	8	14	10,5
ДО-43	160	130	120	80	10	14	10,5
ДО-44	180	150	140	96	12	14	10,5
ДО-45	220	180	170	120	15	16	12,5

Примечания:

1. Деформация (осадка пружины) под нагрузкой, отличающейся от указанной в таблице, изменяется пропорционально нагрузке.
2. Для виброизоляторов всех типов общее число витков пружины равно 6,5.
3. Для виброизоляторов ДО-38, ДО-39 S = 2 мм, для остальных виброизоляторов S = 3 мм, S₁ равно, соответственно, 5 и 10 мм. В резиновых прокладках во всех случаях d₁ = d₂ + 3,5 мм.

Рассмотрим расчет интенсивности отказов пружины виброизолятора ДО-38 при номинальной (рабочей) нагрузке и следующих воздействиях:

- амплитуда ускорения вибрации: 40 м/с²;
- диапазон частот: от 1 до 290 Гц;
- рабочая температура: 50 °С;
- предельная температура: 70 °С, что соответствует классу 1, к группе 1.9 «Аппаратура, базирующаяся на железнодорожных платформах» по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [6].

Выбор методов расчета показателей надежности механических и электромеханических элементов, применяемых на практике, весьма ограничен [7—9]. Для расчета воспользуемся методикой, приведенной в [10], в соответствии с которой математическая модель интенсивности отказов пружины (λ₃) имеет следующий вид:

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot a_1, \tag{1}$$

где λ₀ — интенсивность отказов пружины в номинальном режиме и нормальных условиях;

a₁ — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности пружины, условия производства и эксплуатации пружины.

Значение коэффициента a₁ рассчитывается по формуле:

$$a_1 = K_{11} \cdot K_{12} \cdot K_{13} \cdot K_{14} \cdot K_{15}, \tag{2}$$

где K₁₁ — коэффициент, учитывающий воздействие вибрации;

K₁₂ — коэффициент, учитывающий воздействие ударов;

K₁₃ — коэффициент, учитывающий воздействие климата;

K₁₄ — коэффициент, учитывающий качество обслуживания;

K₁₅ — коэффициент, учитывающий качество изготовления.

Значения коэффициентов K₁₁ — K₁₄, полученные по данным таблиц, приведенных в [10], представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения поправочных коэффициентов модели (2)

Коэффициент	Классификационный признак	Значение
1	2	3
K ₁₁	Предприятия металлургические тяжелого машиностроения. Железнодорожный транспорт (неамортизированная аппаратура)	8,0
K ₁₂		4,0
K ₁₃	Климат умеренный, средняя полоса (не отапливаемое, негерметизированное помещение)	1,3
K ₁₄	Транспорт	1,5
K ₁₅		0,5

Значение λ₀, приведенное в [10] для класса "Пружины", составляет 0,05 · 10⁻⁶ ч⁻¹.

Тогда, эксплуатационная интенсивность отказов пружины виброизолятора ДО-38 равна:

$$\lambda_3 = 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Как следует из полученного результата, расчетное значение λ₃ превышает требуемое, что требует принятия мер по повышению безотказности.

Анализ данных табл. 3 показывает, что наибольшее влияние на величину λ оказывают коэффициенты K_{11} и K_{12} . Однако снизить их значения путем использования виброизолятора ДО другого номинала невозможно, так как при использовании этой методики значения коэффициентов K_{11} и K_{12} не изменятся, так как зависят только от признака «Железнодорожный транспорт» (см. табл. 3).

Поэтому воспользуемся методикой, приведенной в стандарте [11], по классификации которого пружина виброизолятора ДО относится к винтовым пружинам сжатия (рис. 3).

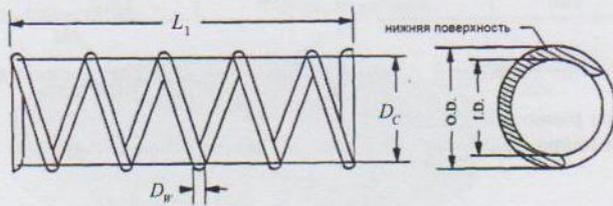


Рис. 3. Винтовая пружина сжатия

Математическая модель интенсивности отказов такой пружины (λ_{sp}) имеет следующий вид:

$$\lambda_{sp} = \lambda_{sp,b} C_G C_{DW} C_{DC} C_N C_Y C_L C_K C_{CS} C_R C_M, \quad (3)$$

где $\lambda_{sp,b}$ — базовая интенсивность отказов пружины; C_G , C_{DW} , C_{DC} , C_N , C_Y , C_L , C_K , C_{CS} , C_R , C_M — поправочные коэффициенты.

Значение коэффициента C_G , учитывающего величину модуля жесткости материала, рассчитывается по формуле:

$$C_G = \left(\frac{G_M}{11,5 \cdot 10^6} \right)^3, \quad (4)$$

где C_M — модуль жесткости материала пружины.

Значение коэффициента C_{DW} , учитывающего величину диаметра нити, рассчитывается по формуле:

$$C_{DW} = \left(\frac{D_w}{0,085} \right)^3, \quad (5)$$

где D_w — диаметр нити (см. рис. 4).

Значение коэффициента C_{DC} , учитывающего величину диаметра витка, рассчитывается по формуле:

$$C_{DC} = \left(\frac{0,58}{D_c} \right)^6, \quad (6)$$

где D_c — средний диаметр пружины (см. рис. 4).

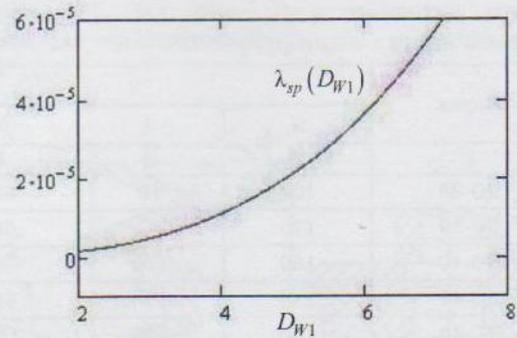


Рис. 4. Зависимость λ_{sp} от D_w

Значение коэффициента C_N , учитывающего количество активных витков, рассчитывается по формуле:

$$C_N = \left(\frac{14}{N_A} \right)^3, \quad (7)$$

где N_A — количество активных витков.

Значение коэффициента C_Y , учитывающего сопротивление растяжению материала пружины, рассчитывается по формуле:

$$C_Y = \left(\frac{190}{T_s} \right)^3, \quad (8)$$

где T_s — предел прочности материала на разрыв.

Значение коэффициента C_L , учитывающего деформацию (осадку пружины), рассчитывается по формуле:

$$C_L = \left(\frac{L_1 - L_2}{1,07} \right)^3, \quad (9)$$

где L_1 — длина пружины в свободном состоянии (см. рис. 4); L_2 — длина пружины под рабочей нагрузкой.

Значение коэффициента C_K , учитывающего воздействие сжатия пружины, рассчитывается по формулам:

$$C_K = \left(\frac{K_w}{1,219} \right)^3, \quad (10)$$

где $K_w = \frac{4 \cdot r - 1}{4 \cdot r - 4} + \frac{0,616}{r}$, $r = \frac{D_c}{D_w}$.

Значение коэффициента C_{CS} , учитывающего воздействие частоты нагружения пружины, рассчитывается по формуле:

$$C_{CS} = \frac{CR}{300}, \quad (11)$$

где CR — частота нагрузки пружины.

Численные значения параметров, необходимые для расчетов коэффициентов модели (3), приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров, используемых в формулах (4)–(11)

Обозначение	Наименование	Значение	Ед. измерения	Примечание
1	2	3	4	5
$D_w (d)$	Диаметр нити	3	мм	табл. 2
$D_C (D_{CP})$	Диаметр пружины	30	мм	табл. 2
N_A	Количество активных витков	5,6	шт.	табл. 1
T_s	Предел прочности	80	кгс/мм ²	ГОСТ 14959
L_1	Высота в свободном состоянии	72	мм	табл. 1
L_2	Высота под рабочей нагрузкой	45	мм	табл. 1
CR	Частота нагрузки	290	Гц	ГОСТ РВ 20.39.304
C_k	Влияние коррозии	1	—	NSWC-11
C_M	Качество производственного процесса	1	—	NSWC-11

Полученные в результате расчета численные значения коэффициентов модели (3) сведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов модели (3)

Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
C_G	0,949	C_L	0,99
C_{Dw}	2,658	C_k	0,829
C_{DC}	0,014	C_{CS}	1,0
C_N	15,625	C_k	1,0
C_Y	4,657	C_M	1,0

Базовая интенсивность отказов ($\lambda_{sp,b}$) для данной группы, приведенная в стандарте [11], составляет $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Тогда эксплуатационная интенсивность отказов пружины виброизолятора ДО-38 равна:

$$\lambda_{sp} = 4,947 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$$

Как следует из полученного результата, расчетное значение λ_{sp} также превышает требуемое, что требует принятия мер по повышению безотказности. Как видно из табл. 5, наибольшие значения имеют коэффициенты C_N , C_Y и C_{Dw} . Анализ модели (3), приведенный в работе [12], показал, что наибольшее влияние на λ_{sp} оказывают параметры D_w , D_C и осадка пружины $d_L = L_1 - L_2$. На рис. 4–6 приведены графики зависимости λ_{sp} от этих параметров.

Исходя из этого, для обеспечения требуемого уровня интенсивности отказов в данном случае достаточно выбрать виброизолятор ДО другого номинала. Проведя последовательно расчеты λ_{sp} , начиная с ДО-39, получим для ДО-42 $\lambda_{sp} = 1,072 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, что удовлетворяет заданным выше требованиям.

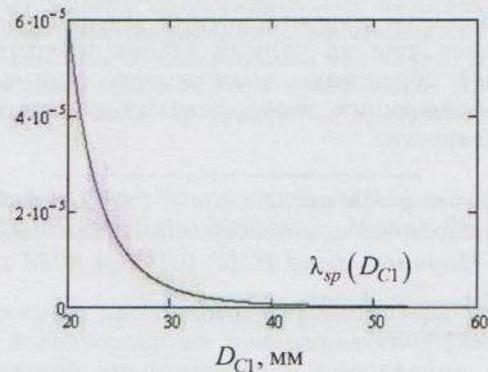


Рис. 5. Зависимость λ_{sp} от D_C

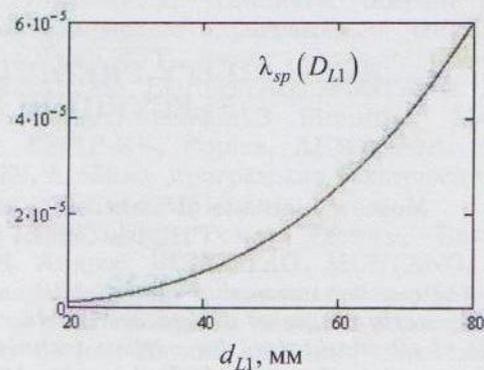


Рис. 6. Зависимость λ_{sp} от d_L

Необходимые для расчетов значения L_2 можно получить исходя из условия, что деформация (осадка пружины) под нагрузкой изменяется пропорционально нагрузке (см. примечание 1 к табл. 2) или в результате моделирования механических характеристик (рис. 7).

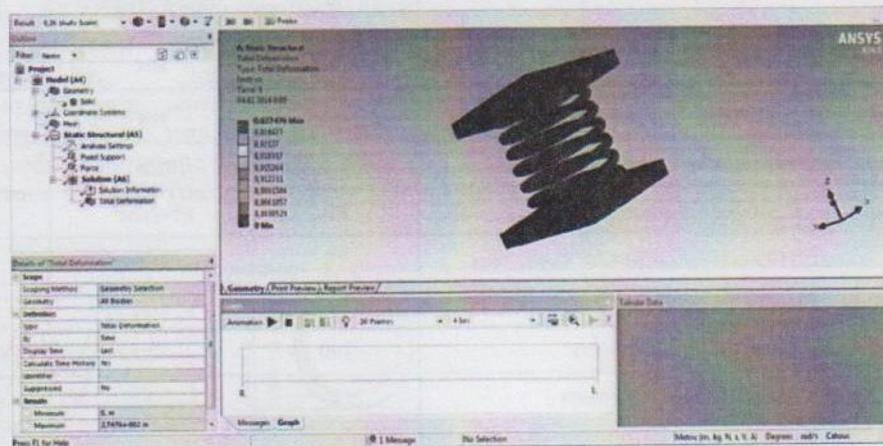


Рис. 7. ANSYS: Результаты моделирования виброизолятора типа ДО

Таким образом, можно сделать вывод о том, что методика, приведенная в [10], хотя и более простая, чем методика стандарта [11], но если полученные с ее помощью результаты не удовлетворительны, то следует применять методику стандарта [11], в которой при расчете интенсивности отказов учитываются как конструктивно-технологические особенности пружин, так и механические характеристики материалов. Это позволяет уже на ранних этапах проектирования ЭС обосновать возможность применения МЭ, обладающих необходимыми показателями безотказности.

Данное научное исследование (№ 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы "Научный фонд НИУ ВШЭ" в 2014 г.

Литература

1. Справочник "Надежность ЭРИ". — М.: МО РФ, 2006.
2. Писарев В. Система испытаний — основа обеспечения надежности / В. Писарев, М. Критенко, В. Постнов // Электроника: НТБ. 2002. № 5. С. 32—35.

3. Ильинский В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. — М.: Радио и связь, 1982. — 296 с.
4. ГОСТ 14959-79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.
5. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

6. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.

7. Жаднов В. В. Методы и средства оценки показателей надежности механических и электромеханических элементов приборов и систем / В. В. Жаднов. // Датчики и системы. 2013. № 4. С. 15—20.

8. Zhadnov V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems / V. Zhadnov // Reliability: Theory & Applications. 2011. Vol. 2. No 4. P. 94—102.

9. Маркин А. В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования / А. В. Маркин, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов // Надежность. 2010. № 2. С. 63—70.

10. Шавыкин Н. А. Оценка показателей безотказности механических элементов продукции приборостроения / Н. А. Шавыкин, Б. П. Петрухин // Датчики и системы. 2006. № 6. С. 28—35.

11. NSWC-11. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.

12. Монахов М. А. Исследование модели интенсивности отказов механических элементов класса «Пружины» / М. А. Монахов, В. М. Фокин, И. Л. Лущпа. // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. — М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. Т. 3. С. 443—446.

RELIABILITY PREDICTION OF MECHANICAL ELEMENTS ELECTRONIC EQUIPMENT FOR DESIGN

V. V. Zhadnov, I. L. Lushpa

Moscow Institute of Electronics and Mathematics of National Research University
"Higher School of Economics", Moscow, Russia

The questions assessing the reliability of mechanical components used in the electronic equipment in the early stages of design are considered in the article. The calculations of the springs' failure rate of vibroinsulators for various techniques are given. It is shown that the use of the models of failure rates of mechanical elements, taking into account the features of their structural and technological execution, allows us not only to solve the problem of calculating, but also to ensure the required level of reliability and mechanical components, and containing electronic equipment.

Keywords: electronic equipment, reliability, vibroinsulator, springs, failure rate.

Жаднов Валерий Владимирович, доцент, профессор
кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций.

Тел. 8 (495) 916-88-80.

E-mail: vzhadnov@hse.ru

Лушпа Игорь Леонидович, ассистент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций.

Тел. 8 (495) 916-88-80.

E-mail: illushpa@edu.hse.ru

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2014 г.



УДК 621.3.011

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ FACTS УСТРОЙСТВ

М. С. Балабанов

ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация», Санкт-Петербург, Россия

Р. Н. Хамитов, д-р техн. наук

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Проектирование управляемых систем электропередачи переменного тока FACTS устройств архитектуры Smart Grid — актуальная задача многих инженеринговых компаний. Выбор специализированных программных комплексов для проектирования и расчета FACTS устройств в настоящее время решается многими проектными организациями хаотично. Необходимо комплексный подход к рассмотрению возможностей той или иной программы. Приведен анализ возможностей наиболее популярных инженеринговых программных продуктов с целью реализации проектов Smart Grid.

Ключевые слова: Smart Grid, FACTS, DIgSILENT Power Factory, RastrWin1, RTDS, eMEGAsim, PSS®E, Анарэс, EUROSTAG, MUSTANG, Дакар, PAП-Стандарт, MATLAB Simulink, Mathcad, Maple, EMTP-RV, АРМСПЗА, ANSYS Maxwell.

Во всем мире наблюдается растущий интерес к бурно развивающемуся в последнее десятилетие направлению преобразования электроэнергетики на базе новой технологической основы путем создания активно-адаптивных сетей, называемых за рубежом Smart Grid ("Умные сети") [1].

Базовым кластером системы Smart Grid являются устройства, относящиеся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока, — Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS). К FACTS устройствам относят следующие основные группы устройств: устройства компенсации реактивной мощности, устройства регулирования параметров сети, преобразователи вида тока, устройства продольно-поперечного регулирования, устройства ограничения токов короткого замыкания (табл. 1) [2—7]. FACTS является одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть которой состоит в том, что электриче-

ская сеть из пассивного устройства транспортировки электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

В настоящее время на рынке проектных работ электросетевых устройств широко применяется следующее программное обеспечение (ПО): DIgSILENT Power Factory, RastrWin, PSS®E, Анарэс, EUROSTAG, MUSTANG, Дакар, PAП-Стандарт, MATLAB Simulink, Mathcad, Maple, EMTP-RV, PSpice, АРМ СПЗА, ANSYS Maxwell, а также программно-технические комплексы RTDS и eMEGAsim.

ПО DIgSILENT Power Factory, RastrWin, PSS®E, Анарэс, EUROSTAG, MUSTANG, Дакар предназначены для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем. Из них наиболее оптимальными, обладающими большим функционалом для расчета FACTS устройств являются программные продукты DIgSILENT Power Factory и RastrWin.