

С.Н. ИСАКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

О МЕТОДЕ РАСЧЕТА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СТРУКТУРНО-СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ

У статті розглянуто метод чисельного розрахунку параметрів динамічних процесів модульних високочастотних структурно-зв'язаних систем (ВЧ СЗС), що базується на об'єднанні механічних та електричних перемінних у єдиний узагальнений вектор переміщень. Це дозволяє суттєво покращити розрахункову модель в умовах кратного та щільного спектру власних частот конструкції на прикладі ультразвукових медичних інструментів.

В статье рассмотрен метод численного расчета параметров динамических процессов модульных высокочастотных структурно-связанных систем (ВЧ ССС), который базируется на объединении механических и электрических переменных в один обобщенный вектор перемещений. Это позволяет существенно улучшить расчетную модель в условиях кратного и плотного спектра собственных частот конструкции на примере ультразвуковых медицинских инструментов.

The method numerical calculations of dynamic processes parameters of modular high-frequency structure constrained systems (HF SCS) which based on the combine of mechanical and electric variables in one generalized vector of movements are considered at the paper. It allows substantially to improve a calculation model at the conditions of multiple and closed spectrum of structure Eigen-frequencies on the ultrasonic medical instruments example.

Введение. Большинство технологических процессов, выполняемых с использованием высокочастотных структурно-связанных систем (ВЧ ССС), отличаются тем, что на рабочий орган кроме формообразующего движения подачи относительно обрабатываемого изделия или среды сообщаются высокочастотные колебания определенного направления, частоты и интенсивности [1-3]. Ультразвуковые установки и аппараты являются типичными представителями таких систем и относятся к общему классу высокочастотных вибрационных систем [10], однако они выделяются в отдельную группу по следующим основным причинам.

Первая определяется принципиальными особенностями поведения материалов и сред в ультразвуковом поле, что выявлено и подтверждено многочисленными экспериментами [4, 5, 6]. Эти особенности проявляются в радикальном изменении наблюдаемых в эксперименте их упругопластических характеристик и реологических свойств.

Вторая причина обусловлена спецификой конструктивных особенностей основных элементов таких систем, которые представляют собой сложные составные колебательные системы прямолинейной, криволинейной и объемной формы, составленные, как правило, из неоднородных участков активных и пассивных материалов и работающие в режиме резонансного нагружения в условиях плотного и кратного спектра частот [7, 8, 9]. По этой причине при описании колебаний такие конструкции моделируются системами с распре-

деленными параметрами и описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, а также применяется специализированное программное обеспечение. Поскольку такие колебательные системы обладают высокой добротностью, ВЧ ССС эффективно работают в резонансных режимах, позволяющих получить достаточные для проведения технологического процесса амплитуды колебаний рабочего органа.

Отдельные составные части и элементы высокочастотных структурно-связанных систем (ВЧ ССС), имеют между собой силовые, кинематические и инерционные связи, а также используют различные системы управления, в том числе, и с обратной связью. В зависимости от поставленной задачи отдельные части сложной ВЧ ССС могут рассматриваться как самостоятельные системы.

В настоящем исследовании предложен специализированный метод расчета динамических параметров ВЧ ССС, который в дальнейшем может быть использован для модификации схем анализа чувствительности и увеличения эффективности процессов оптимального проектирования сложных ВЧ ССС.

Расчет динамических параметров. Широкий класс ВЧ ССС, применяемых на практике, представляет собой прямолинейную или плоско-криволинейную систему, свободные колебания которой могут быть описаны системой дифференциальных уравнений, представленных в [10]:

$$\frac{d\bar{y}}{d\xi} = [C]\bar{y} + \omega^2 [M]\bar{y}, \quad (1)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin \alpha & 0 & \cos^2 \alpha / (EFL^2) & \cos \alpha \sin \alpha / (EFL^2) \\ 0 & 0 & \cos \alpha & 0 & \cos \alpha \sin \alpha / (EFL^2) & \sin^2 \alpha / (EFL^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1/(EI) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & -\cos \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho IL^2 & 0 & 0 & 0 \\ -\rho FL^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho FL^4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{y} = \{u \quad v \quad \varphi \quad M_{xy} \quad Q_x \quad Q_y\}^T,$$

где E – модуль упругости, ρ – плотность материала, F и I – площадь и мо-

мент инерции поперечного сечения, L – криволинейная длина УЗ ССС, α – угол наклона криволинейной оси и $\xi = s/L$ – относительная криволинейная координата.

Систему (1) необходимо дополнить уравнениями электрического поля, которые для прямолинейного преобразователя, расположенного вдоль оси s и изготовленного из пьезокерамических шайб, поляризованных по толщине в направлении той же оси s , имеют вид

$$\frac{dD_s}{d\xi} = 0, \quad \frac{d\varphi_s}{d\xi} = -E_s. \quad (2)$$

Физические соотношения для данного случая примут вид

$$\sigma_s = E\varepsilon_s \frac{d_{33}}{S^E} E_s, \quad D_s = \frac{d_{33}}{S^E} \varepsilon_s + \varepsilon\varepsilon_0 E_s, \quad (3)$$

где d_{33} – пьезомодуль, ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная и S^E – податливость пьезокерамики.

Объединяя переменные из уравнений (1) и (2) в один обобщенный вектор перемещений и, проведя несложные преобразования, получим следующую систему дифференциальных уравнений

$$\frac{d\bar{z}}{d\xi} = [C]\bar{z} + \omega^2 [M]\bar{z}. \quad (4)$$

При этом обобщенные матрицы жесткости и масс записываются так:

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\sin\alpha & 0 & \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \cos^2\alpha}{Z_N} & \frac{\cos\alpha \sin\alpha}{Z_N} & 0 & F_{PC} \frac{d_{33} \cos\alpha}{S^E Z_N} \\ 0 & 0 & \cos\alpha & 0 & \frac{\cos\alpha \sin\alpha}{Z_N} & \frac{\sin^2\alpha}{Z_N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(EI + \frac{I_{PC}}{S^E})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\alpha & -\cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_{33} \cos\alpha}{S^E Z_N} & 0 & 0 & -\frac{F_{PC}}{S^E Z_N} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$Z_N = (\varepsilon\varepsilon_0(EF + \frac{d_{33}^2}{S^E}) + d_{33}^2 F_{PC})L^2; \quad \bar{z} = \{u \quad v \quad \varphi \quad M_{xy} \quad Q_x \quad Q_y \quad \varphi_x \quad D_x\}^T;$$

$$[M]= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -(\rho I + \rho_{PC} I_{PC}) L^2 & 0 & \dots & 0 \\ -(\rho F + \rho_{PC} F_{PC}) L^4 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -(\rho F + \rho_{PC} F_{PC}) L^4 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

где ρ_{PC} – плотность пьезокерамики, F_{PC} и I_{PC} – площадь и момент инерции поперечного сечения пьезошайбы.

Решение (4) проводится методом начальных параметров с численным интегрированием системы и ортогонализацией, а также с разбиением системы на подконструкции для лучшей сходимости.

В конечном итоге, задавая величину приложенного на электродах пьезопреобразователя напряжения, мы получаем распределение перемещений и деформаций по объему ВЧ ССС и, соответственно, можем вычислить все динамические параметры системы.

Уравнение энергетического баланса. Электрические характеристики пьезопреобразователя определяются из уравнения энергетического баланса, которое для ВЧ ССС может быть записано в виде:

$$P = \Delta W_{\Sigma} f_0, \quad (5)$$

где P – мощность подводимая в систему, f_0 – рабочая частота возбуждения генератора, а ΔW_{Σ} – суммарные потери энергии в системе определяются как

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W + \Delta W_C + \Delta W_{CZ}, \quad (6)$$

где ΔW – потери энергии в материале конструкции, ΔW_C – потери в конструктивных соединениях и ΔW_{CZ} – потери энергии в зоне контакта.

Учитывая, что

$$P = UI, \quad (7)$$

где U – напряжение на электродах пьезопакета, получим выражение для силы тока I в пьезоэлементах в виде

$$I = \frac{\Delta W_{\Sigma} f_0}{U m_{pc}}, \quad (8)$$

где m_{pc} – количество пьезошайб в пьезопакете.

Электроэнергетические характеристики ВЧ ССС рассчитываются следующим образом:

- сопротивление пьезошайбы

$$R = U / I \quad (9)$$

- добротность

$$Q = 2\pi E_k / (\Delta W_\Sigma), \quad (10)$$

где E_k – кинетическая энергия ВЧ ССС

- коэффициент эффективности

$$\chi = \alpha^2 / P, \quad (11)$$

где α – амплитуда на рабочем торце

- коэффициент

$$k_{0,7} = \omega / Q. \quad (12)$$

Тестовые расчеты. Для криволинейных ВЧ ССС характерен достаточно плотный (и даже кратный) спектр собственных частот [9], когда в зоне автоподстройки генератора находится несколько собственных форм колебаний.

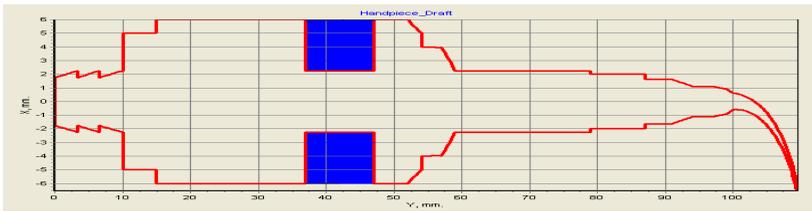


Рисунок 1 – Плоско-криволинейная ВЧ ССС

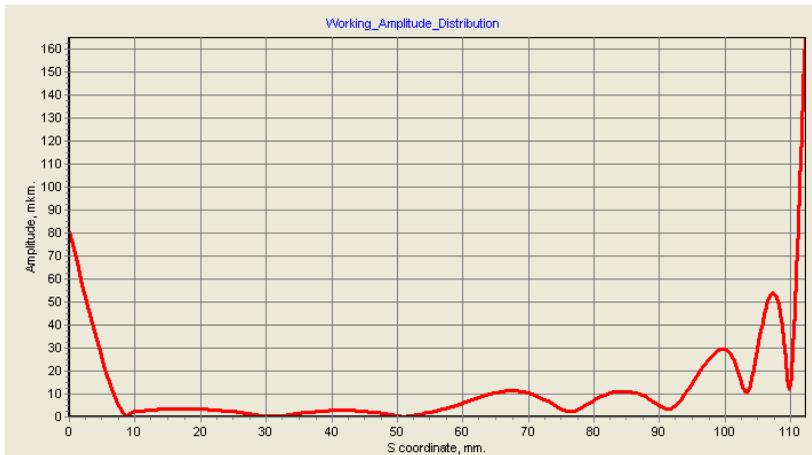


Рисунок 2 – Рабочая форма 1 колебаний на частоте 30,96 кГц

Так для ВЧ ССС, представленной на рис. 1 и исследованной в [10], при напряжении на электродах пьезопакета 100В формы колебаний системы представлены на рис. 2 и 3, соответственно, а распределение потенциала по

длине пьезопреобразователя представлено на рис. 4

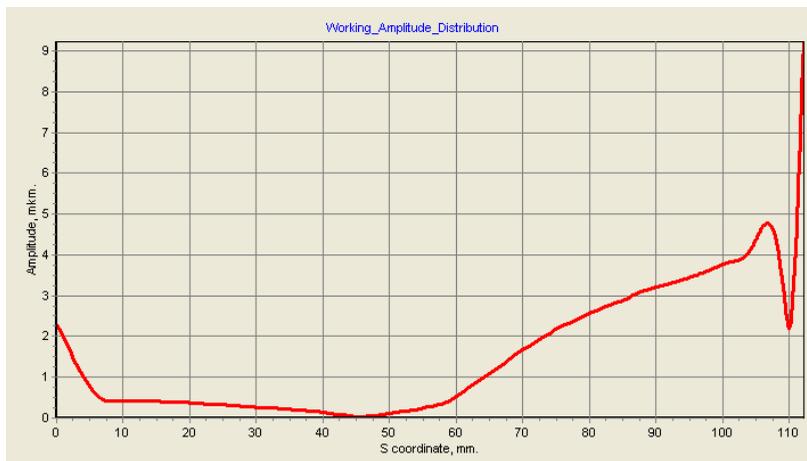


Рисунок 3 – Рабочая форма 2 колебаний на частоте 33,38 кГц

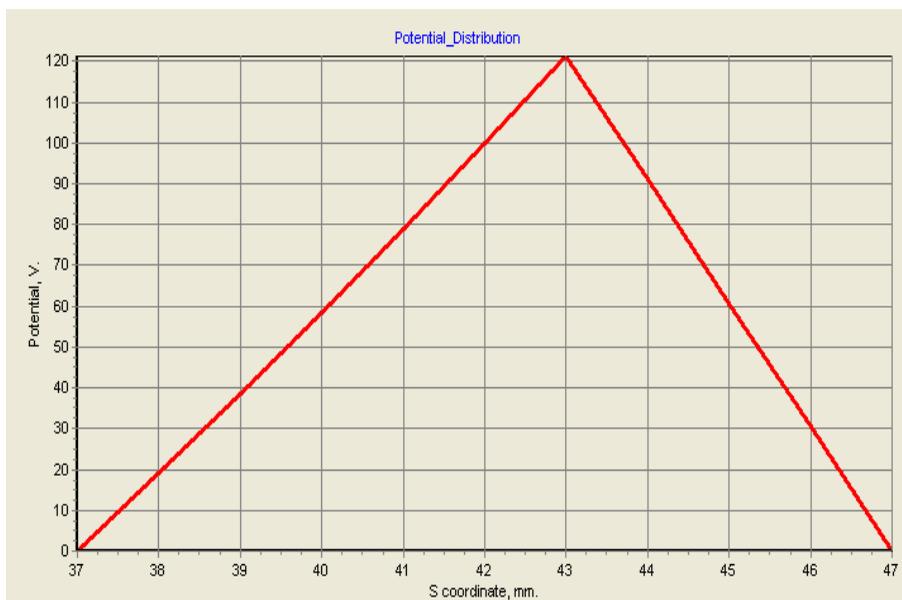


Рисунок 4 – Распределение потенциала по длине пьезопреобразователя

Характеристики пьезопреобразователя на близких формах колебаний представлены в таблице.

Таблица

Характеристики	Форма 1	Форма 2
Рабочая частота, кГц	30,96	32,38
Рабочая амплитуда, мкм	165	9,2
Мощность, Вт	48,8	0,75
Сила тока, мА	240	3,7
Соппротивление, Ом	410	2682
Добротность	520	470
Коэффициент эффективности, мкм ² /Вт	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент $k_{0.7}$	373	435

Исходя из анализа результатов, можно заключить, что вторая форма колебаний является «паразитной» и при ее захвате системой автоподстройки генератора будет происходить существенное снижение амплитуд колебаний, что скажется на эффективности всего процесса в целом. Поэтому в дальнейшем необходимо провести изменение конструкции с целью расширения диапазона между рабочей и «паразитной» частотами.

Список литературы: 1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. / Под ред. И.П. Голяминой. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. 2. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с. 3. Харитонович М.В., Эскин Г.И. Ультразвук в процессах пластической деформации металлов и сплавов. Обзор отечественной и зарубежной литературы 1955-1969 гг. – М.: ВИЛС, 1970. – 112 с. 4. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность.– Минск: Наука и техника, 1976. – 446 с. 5. Асташев В.К. О влиянии ультразвука на процессы пластического деформирования. – Машиноведение, 1983, № 2. – С. 3 - 12. 6. Youshikazu K., Takeshi T. Sadayuki U., Electrical equivalent circuit of loaded thick Langevin flexural transducer // Japanese Journal of Applied Physics.– 1997.– V.36, №1. – P.3121-3125. 7. Simson E., Taranukha F. Shape optimization of large ultrasonic tools // Proc. 3rd Int. Conf. OPTI' 93 - 1993. – p. 31 - 42. 8. Богомолов С.И., Симсон Э.А. Оптимизация механических систем в резонансных режимах. - Харьков: Вища школа, 1983. – 152 с. 9. Isakov S., Kedrovskaya O. Designing of ultrasonic waveguides in conditions of spatial oscillations, MicroCAD'99 " Information technologies: Science, Technique, Technology, Education, Health ", issue 7, part 1, 1999. – p.293-299. 10. С.Н. Исаков, А.С. Исаков, С.И. Марусенко. Вынужденные колебания высокочастотных структурно-связанных систем // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2009 – № 4/10 (40). – С. 41-44.

Поступила в редколлегию 21.03.11