

УДК 534.323 : 66.069.83

## О ВОЗБУЖДЕНИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Сергей Константинович Цветаев

Москва, Россия

[stsvetaev@mail.ru](mailto:stsvetaev@mail.ru)

*Аннотация.* Описывается способ возбуждения электромеханических колебаний стержневых колебательных систем пьезоэлектрическим преобразователем, при котором раскачка производится на резонансной частоте, а поддержание колебаний на частоте антирезонанса. Это позволяет избежать недопустимых амплитуд без нагрузки и обеспечить устойчивый запуск под нагрузкой.

*Ключевые слова:* пьезоэлектрический преобразователь, электромеханические аналогии, резонансная и антирезонансная частоты, механическая добротность.

## ABOUT EXCITATION OF PIEZOELECTRIC OSCILLATORY SYSTEMS WITH VARIABLE ABSORPTION OF SOUND

Sergey Tsvetaev

Moscow, Russia

[stsvetaev@mail.ru](mailto:stsvetaev@mail.ru)

*Abstract* The way of excitation of electromechanical fluctuations, is described, in which the fluctuation begins on resonant frequency, and proceeds on antiresonant frequency. It allows to avoid inadmissible amplitudes without loading and to achieve fast excitation of fluctuations at loading.

*Key words:* the piezoelectric converter, electromechanical analogies, resonant and antiresonant frequency, mechanical absorption of sound.

Резонансные настройки колебательных систем с пьезокерамическим возбуждением механических колебаний описаны в ряде монографий и статей [1-4]. Применяются частотные, амплитудные, фазовые и многомерные способы управления режимами возбуждения колебаний. Всегда используются расчёты эквивалентных схем с питанием от генератора в виде источника напряжения на основе электромеханических аналогий [5]. Сравнительно недавно в работе [6] предложено переместить пьезоэлементы из пучности напряжений с целью исключить их разрушение. Цель настоящей работы тоже ограничить механические напряжения в режимах колебаний, близких к холостому ходу. Предлагается использовать эффективные источники тока различной мощности, выпускаемые, например, фирмой APC, аббревиатура названия которой совпадает с аббревиатурой American Piezo Ceramics.

В настоящей работе предлагается возбуждение колебаний от генератора напряжения и поддержание колебаний от генератора тока. Это оправдано, например, когда необходимо ограничить амплитуду в не нагруженном состоянии, чтобы избежать превышения усталостной прочности в узлах стоячих волн. Такое возможно в стержневых колебательных системах ультразвуковой сварки, резки, распылителях из слоя и в пьезотрансформаторах, для которых характерны то нагруженное, то не нагруженное состояние [ 7-9 ]. При переходе из одного состояния в другое изменяется механическая добротность колебательной системы, и для предотвращения значительных амплитуд необходимо регулировать подводимую электрическую мощность. Например, если волновая колебательная система [ 7 ] (Рис.7) колеблется с частотой 70 кГц и амплитуда его торца 5 мкм, а его экспоненциально-ступенчатый концентратор изготовлен из сплава Д-16Т, то через 30 минут в основании тонкой части концентратора прорастает трещина из-за недостаточной усталостной прочности металла. Такая амплитуда возможна без механической нагрузки при питании от генератора напряжения, когда механическая добротность равна 1000. Когда колебательная система (Рис.7) заторможена висящей на торце капель жидкости [ 10 ], её механическая добротность равна 10, и для раскочки и распыления капли требуется более значительная энергия, чем для поддержания колебаний.

Чтобы быстро возбудить механические колебания из положения покоя при минимальной подаваемой мощности, нужно с резонансной частотой приложить к колебательной системе силу, которая при раскочке должна превысить силу трения покоя и будет совпадать по фазе с колебательной скоростью. Может оказаться, что для преодоления трения покоя эта сила должна быть больше, чем требуется в дальнейшем для поддержания колебаний с заданной амплитудой. Поэтому можно уменьшить силу после достижения нужной амплитуды или, например, приложить её в противофазе со смещением. При этом сила опережает колебательную скорость по фазе почти на  $\pi/2$ . Как правило, можно установить величину силы для поддержания нужной амплитуды и тем самым предотвратить механические повреждения.

Можно показать, что при использовании пьезоэлектрического преобразователя раскочка в этом случае происходит на резонансной частоте, а поддержание колебаний возможно на антирезонансной частоте. Для этого можно воспользоваться эквивалентной электрической схемой преобразователя с элементами  $C_0$ , L, R и C вблизи резонанса [ 5 ]. Механические аналоги иллюстрируются пружинным маятником, который приводится для иллюстрации фаз силы и колебательной скорости. Как известно из электромеханических аналогий, сила F эквивалентна электрическому напряжению E на пьезоэлементе, колебательная скорость V эквивалентна току в цепи LRC, смещение x эквивалентно заряду Q, протекающему в цепи LRC.  $C_0$  – собственная ёмкость пьезоэлементов, L и C определяются массой и упругой податливостью (гибкостью) колебательной системы, R определяется потерями энергии (в том числе и полезными) при работе преобразователя. Совместно L, R и C определяют механическую добротность колебательной системы.

При резонансе ток I в основном идёт через цепь RLC, и он имеет ту же фазу, что и приложенное напряжение E. То есть V и F также имеют одинаковую фазу. На рис.1 они изображены векторами в момент максимума в положении равновесия маятника. Знаками + и – показаны знаки напряжений в какой-то момент времени. При резонансе знаки E и L (слева направо) совпадают и не совпадают одинаковое время.

При антирезонансе ток I в основном идёт через  $C_0$  и он опережает по фазе напряжение E на  $\pi/2$ . Ток в цепи LRC в противофазе с током через  $C_0$ , и он отстаёт по фазе от напряжения E на  $\pi/2$ . Это означает, что сила F опережает колебательную скорость V на  $\pi/2$ , её максимум

при максимальном смещении  $x$ , и она приложена к витку пружины выше груза и направлена в сторону, куда в ближайший момент времени будет направлена колебательная скорость. При антирезонансе знаки  $E$  и  $L$  совпадают по времени чаще, так как указано на рисунке.

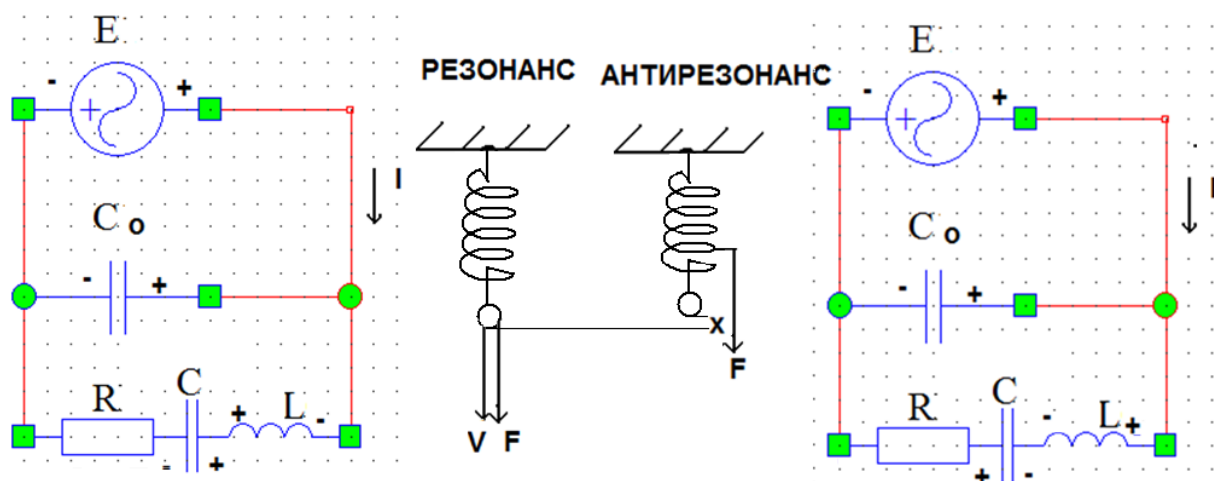


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема пьезопреобразователя и механическая иллюстрация при резонансе и антирезонансе

Чтобы при антирезонансе ограничить максимальную амплитуду  $x$ , которая по электромеханической аналогии эквивалентна проходящему в цепи LRC заряду  $Q$ , нужно ограничить заряд, вносимый током  $I$ . Вносимый за период колебаний  $T$  заряд  $\Delta Q \approx I \cdot T$ , где  $T$  – период колебаний. Следовательно, для стабилизации амплитуды генератор должен быть источником заданного тока.

Для примера на рис.2 приведены реальные векторные диаграммы (не в масштабе) токов и напряжений такой электрической схемы с добротностью 200 при резонансе (слева) и при антирезонансе (справа). Эти диаграммы подтверждают предыдущие утверждения.

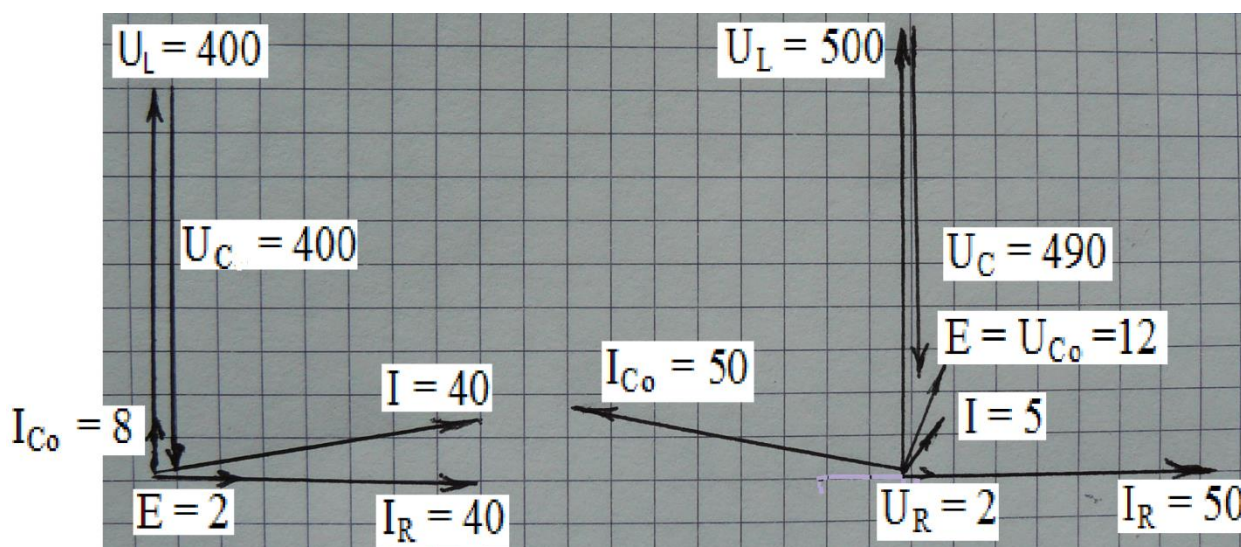


Рис.2. Векторные диаграммы токов и напряжений при резонансе (слева) и при антирезонансе (справа)

В реальной колебательной системе вблизи резонанса при механической добротности больше 10 элементы  $L$  и  $C$  изменяются на величину порядка 1% при изменении  $R$  в сотни раз, и добротности от 1000 до 10. Работа на антирезонансной частоте предполагает подачу на пьезоэлементы повышенного напряжения, что может вызвать больший их нагрев, если пьезоматериал имеет значительные диэлектрические потери.

Таким образом, требуется генератор (Рис.3), работающий на резонансной частоте до того момента, когда ток преобразователя достигнет заданного значения. В этот момент автоматическая подстройка частоты переключается на частоту антирезонанса, а питание генератора на источник тока. При этом напряжение на преобразователе возрастает, а его ток уменьшается. Так как при увеличении нагрузки напряжение источника тока увеличивается, а напряжение реального источника тока ограничено, то снова включаются питание от источника напряжения и обратная связь на резонансе. Для простоты на блок-схеме напряжение обратной связи снимается с небольших резисторов в цепях преобразователя и дополнительного конденсатора. Кроме стабилизации механической амплитуды колебаний схема позволяет отдельно настроить мощность на резонансе и на антирезонансе.

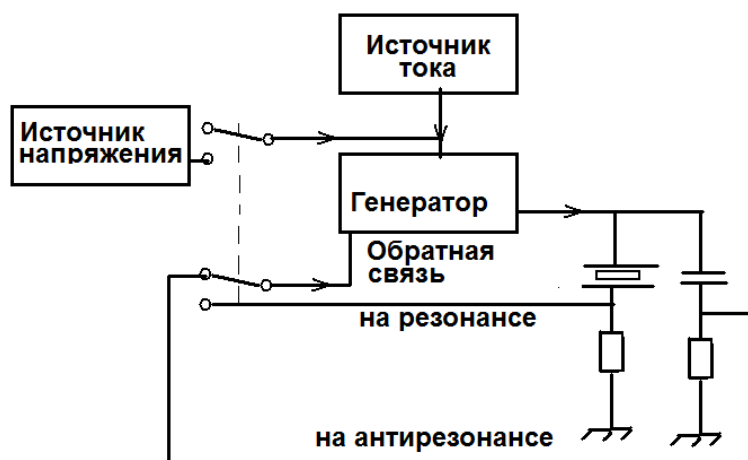


Рис.3. Блок-схема генератора

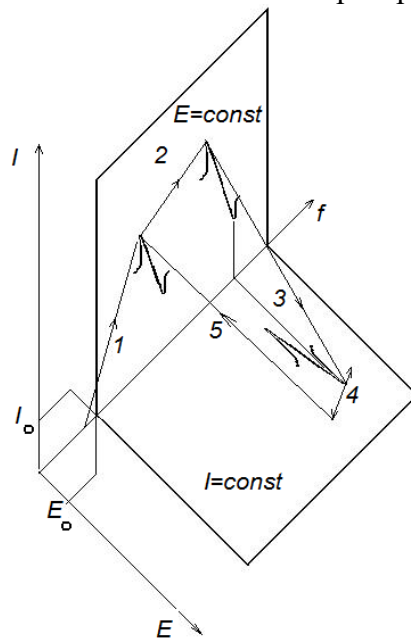


Рис.4. Стадии возбуждения колебательной системы

На рис.4 приведены стадии возбуждения колебательной системы в координатах ток  $I$ , напряжение  $E$ , частота  $f$ . Стадия 1 – включение, 2 – раскочка колебаний с одновременным повышением добротности, 3 – переход на антирезонансную частоту, 4 – поддержание постоянной амплитуды, 5 – при увеличении нагрузки (уменьшении добротности) переход в режим раскочки колебаний.

Существует удобная программа EMTLab, которая позволяет получать не только амплитудно-частотные характеристики схем, но и осциллограммы переходных процессов. На рис.5 приведена схема преобразователя с добротностью 200 и переходные процессы при его запуске от источника тока. Эквивалент преобразователя L2C1R1. Его колебательная скорость соответствует его току на осциллограмме V2. При питании преобразователя от источника напряжения амплитуда колебаний устанавливается быстрее. Видно, что при росте колебательной скорости (тока V2) напряжение V1 (то есть сила) снижается. На осциллограммах этой программы также можно наблюдать фазы токов и напряжений в разных точках схемы при переходных процессах.

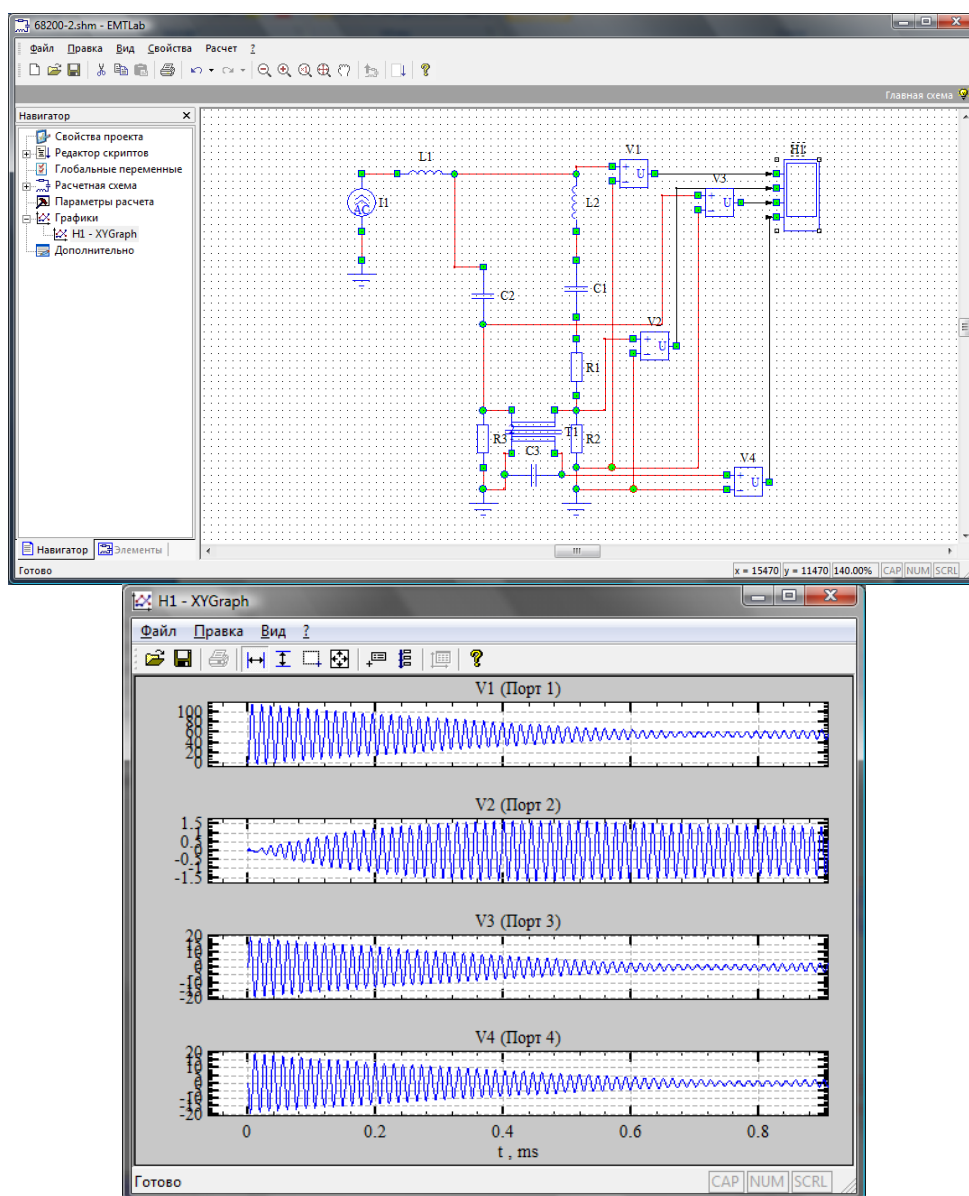
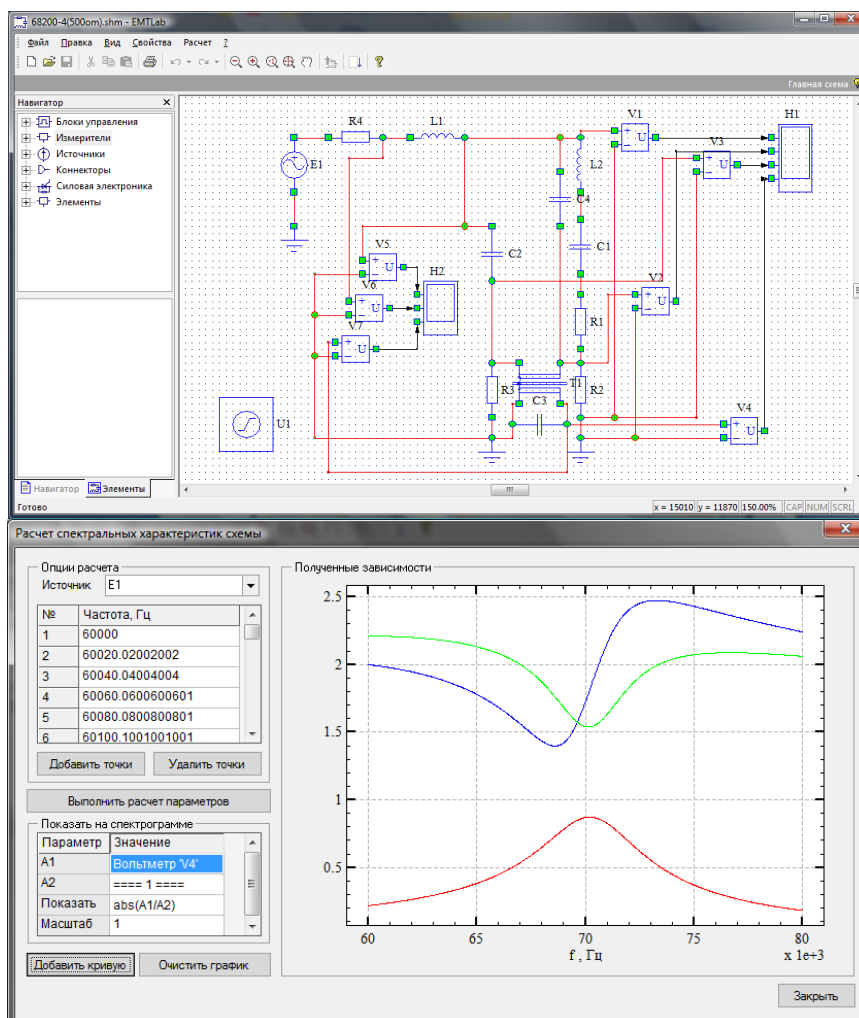


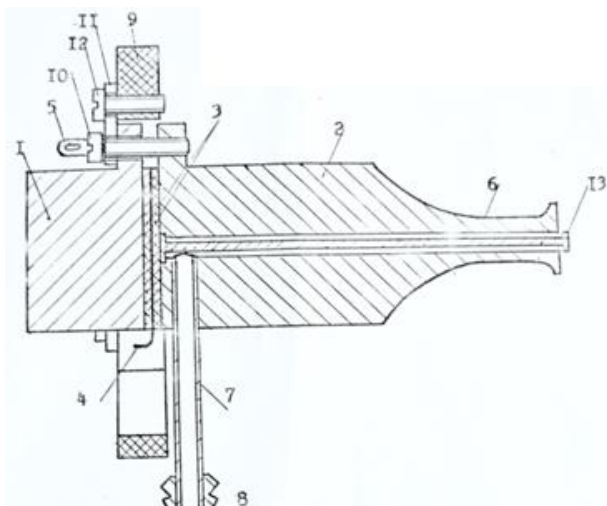
Рис.5. Схема преобразователя и её переходные процессы при запуске от источника тока

На рис.6 приведен пример схемы преобразователя с добротностью 20 и амплитудно-частотные характеристики цепи обратной связи для антирезонансной частоты (синяя кривая), для резонансной частоты (зеленая кривая), и их разность (красная кривая). Максимум красной кривой находится между частотами резонанса и антирезонанса. Этот сигнал часто используется для обратной связи в ультразвуковых мойках и при ультразвуковой сварке.



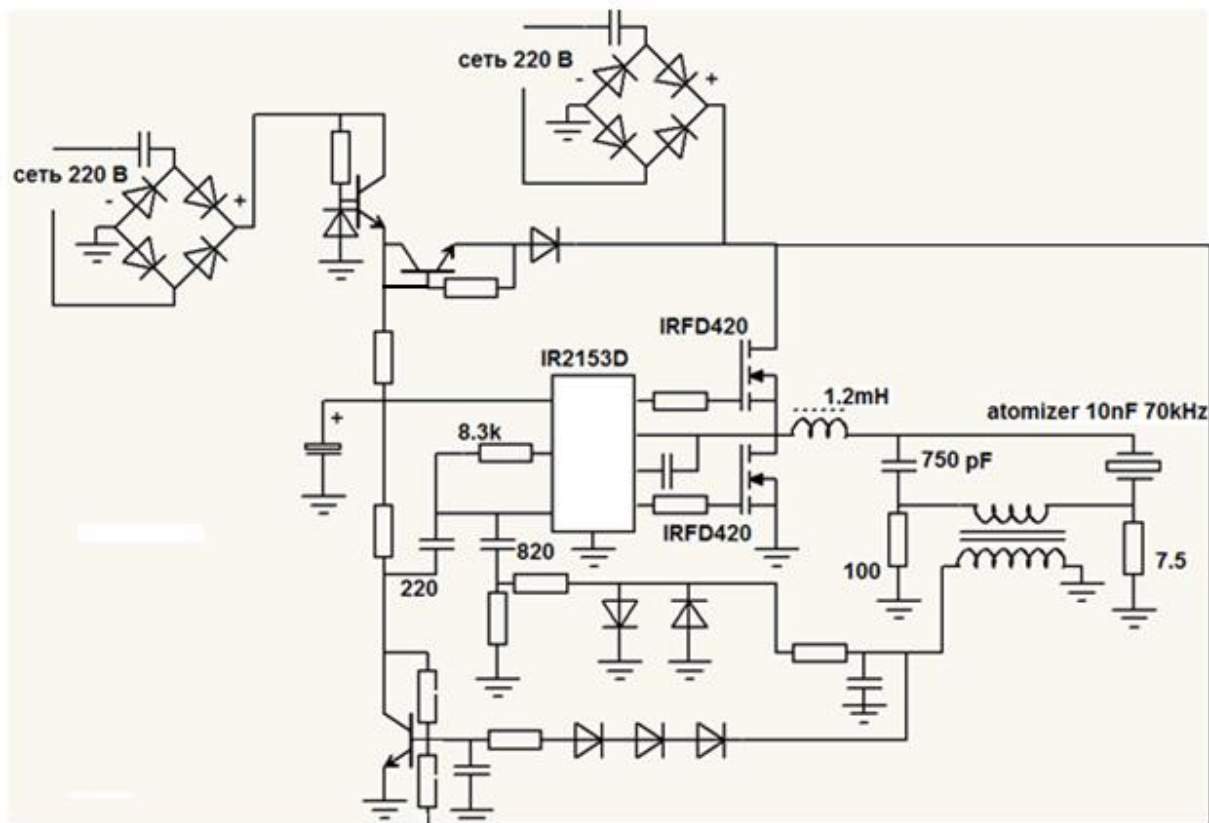
**Рис.6.** Схема преобразователя с добротностью 20 и амплитудно-частотные характеристики напряжений в её цепях

Указанные соображения и программа были применены для разработки генератора (Рис.8) ультразвукового распылителя [ 7 ] (Рис.7), имеющего следующие эквивалентные характеристики.  $L = 24$  мГн,  $C = 220$  пФ,  $R = 20 - 500$  Ом,  $C_0 = 8000$  пФ, резонансная частота без нагрузки 69,9 кГц, под нагрузкой 69,2 кГц, антирезонансная частота без нагрузки 70 кГц, под нагрузкой 69,5 кГц. Переключение с резонанса на антирезонанс и обратно производится транзистором в частотозадающей цепи микросхемы подключением и отключением ёмкости 220 пФ. Источник напряжения (слева) и источник тока (вверху) переключаются автоматически и отличаются сетевыми ёмкостями.



**Рис.7.** Ультразвуковой распылитель жидкости, 1, 2 – части волнового вибратора с экспоненциально-ступенчатым концентратором из титанового сплава ВТ-3, 3 – пьезоэлектрические диски диаметром 20 мм, толщиной 1 мм, 4 и 5 – контакты, 6 – внутренний канал для подачи жидкости, 7 – трубка с ниппелем 8, 9 – изолирующее кольцо, 10 и 12 – винты 6 штук, 11 – пластинка крепления 3 штуки, 13 – вставка с отражателем жидкости для повышения скорости распыления без образования крупных капель.

Работу распылителя с генератором можно наблюдать [10]. Видно, что колебания преобразователя устойчиво восстанавливаются после отключения и включения питания, а также после значительной нагрузки.



**Рис.8.** Электронная схема генератора.

Итак, указана удобная программа для моделирования эквивалентных схем и схем генераторов. Показана возможность ограничения амплитуды колебательной системы в режиме холостого хода при переходе на антирезонансную частоту и питание от источника тока. Приведена схема генератора и работа ультразвукового распылителя жидкости, имеющего соответствующие стадии возбуждения колебаний.

### Список литературы

1. Е.Кикучи, Ультразвуковые преобразователи. - М.: Мир, 1972.
2. А.В.Донской, О.К.Келлер, Г.С.Кратыш, Ультразвуковые электротехнологические установки. - Л.: Энергоиздат, 1982.
3. А.А.Ерофеев, Г.А.Данов, В.Н.Фролов, Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике. - М.: Радио и связь, 1988.
4. Голямина И.П., Горячев А.В., Гуляев А.А., Мастеров А.Е., Пономарев Д.М., Славинский З.М. Исследование переходных процессов в ультразвуковых колебательных системах, применяемых для микросварки// Акустический журнал. - Т.30. - С. 32-38 (1984)
5. Маленькая энциклопедия УЛЬТРАЗВУК под ред. И.П.Голяминой. - М.: 1979.
6. В.К.Асташев, К.А.Пичугин Резонансные настройки ультразвуковой стержневой системы с пьезоэлектрическим возбуждением колебаний// Вестник научно-технического развития. - 2013. - №9 (73).
7. В.В.Скобельцын, С.К.Цветаев Ультразвуковое распылительное устройство// Акустический журнал. - 1977. - Т.23, №6. - С. 951.
8. Виноградов Г.В., Цветаев С.К. Пистолет ультразвуковой сварки// Сварочное производство. - 1984. - №7.
9. Виноградов Г.В., Цветаев С.К. Установка ультразвуковой сварки плоских проводников к контактными площадкам кремниевых пластин// Сварочное производство. - 1985. - №4.
10. <https://www.youtube.com/watch?v=Vh6ifYGE3to&feature=share>

*Дата поступления: 7 декабря 2020 г.*