

**Ларин Е.В.**  
**Михайлюк Д.Л.**  
**Феоктистов Н.А.**  
**ИГУПИТ (Москва)**  
**Ходжаев В.Д.**  
**НИИТП (Москва)**

## **Исследования режимов и электромагнитной совместимости аппаратов на базе электролизно-водных генераторов большой мощности**

Исследование и разработка аппаратов на базе электролизно-водных генераторов (ЭВГ) ограничивается малыми мощностями (до 1-2 кВт) и в основном их применение ограничивается в быту и при ремонте изделий народного потребления: ремонт ювелирных изделий зубопротезное производство и т.д. [1]. Однако, учитывая экологичность и экономичность ЭВГ, применение аппаратов на базе ЭВГ в автосервисе, жилищно-коммунальном хозяйстве, ремонте холодильной и другой аппаратуры, требует увеличения мощности и производительности [1, 2, 3]. В этом случае целесообразно использование трехфазной сети и трехфазных систем управления. Электромагнитные процессы в схемах выпрямления от трехфазной сети зависят от применяемой схемы управления и эквивалентной схемы электролизера. При общем подходе к анализу  $m$ -фазной схемы и принятой эквивалентной схеме электролизера ( $E_0$ ,  $R_3$ ) (рис.1) получены основные соотношения для расчета электрических параметров.

Среднее значение тока электролизера

$$I_{d3} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} i_3 d\vartheta = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{\sqrt{2}U_2}{r} (\cos \vartheta - \cos \theta) d\vartheta = \frac{U_d}{r} \cdot \frac{m}{\pi} (\operatorname{tg} \theta - \theta) \quad (1)$$

где  $m$  – фазность схемы выпрямления;  $\theta = \frac{U_d}{\sqrt{2}U_2}$  – угол отсечки;  $\sqrt{2}U_2$  – амплитуда выходного напряжения;  $U_d = E_0$  – противоэдс;  $r$  – эквивалентное внутреннее сопротивление вентиля и обмоток.

Среднее значение тока через вентиль  $I_{в.ср.} = \frac{I_{d3}}{m}$ .

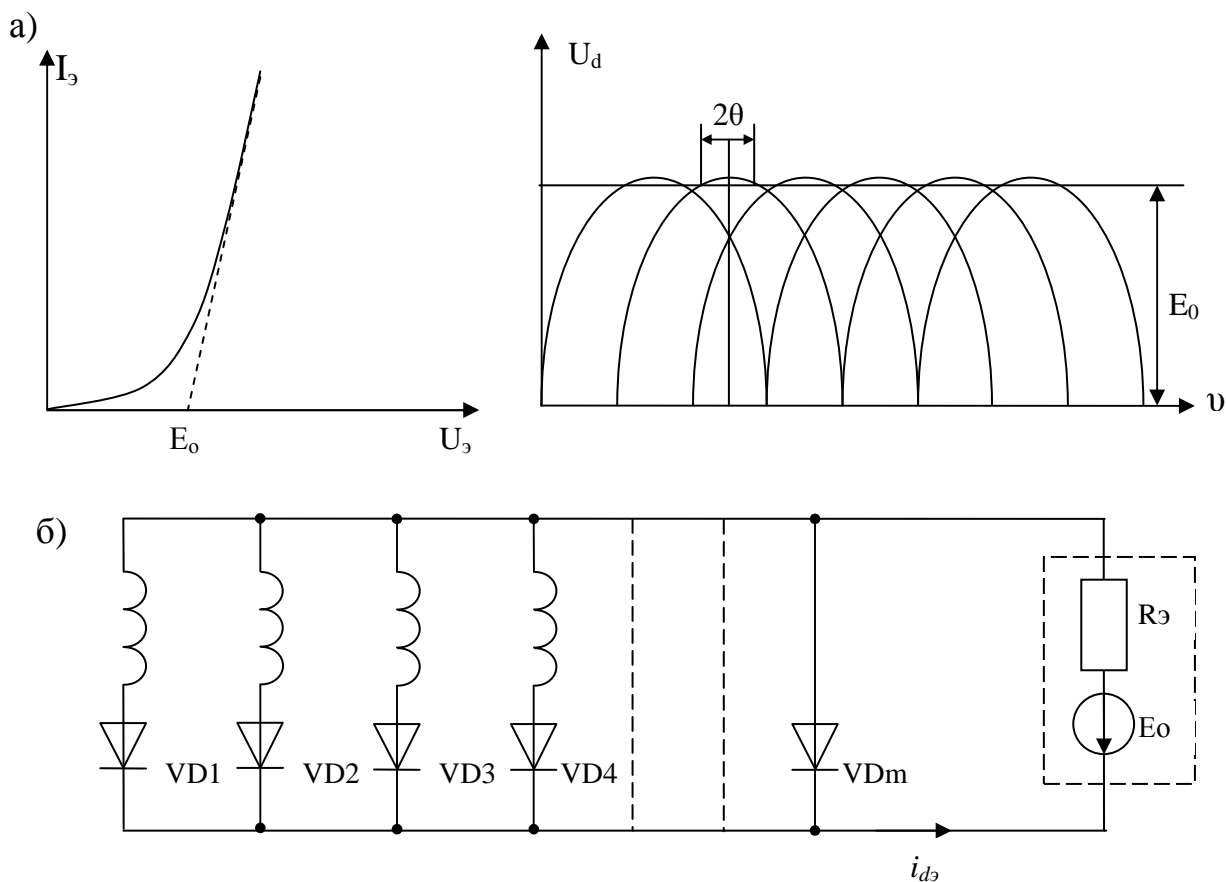


Рис. 1. Вольтамперная характеристика электролизера и многофазная схема выпрямления при работе на электролизер.

Из выражения (1) можем определить

$$\operatorname{tg} \theta - \theta = \frac{r\pi I_d}{mU_d} = \frac{r\pi I_d}{mE_0} = \frac{r\pi}{mR_3}$$

Разлагая переменную составляющую напряжения по отношению к периоду повторяемости  $\frac{2\pi}{m}$  в ряд, получаем, что гармоническая первой кратности по отношению к периоду повторяемости является  $m$ -ой гармоникой по отношению к  $2\pi$ . При этом  $k$ -тая гармоника уложится по отношению к периоду повторяемости в  $km$ -раз, т.е. частота этой гармоники равна  $f_k = kmf$ .

Гармонические наиболее полно представлены, если энергия, накопленная в электролизере (как эквивалентной емкости) достаточна для непрерывного тока нагрузки. В этом случае амплитуда  $n$ -ой гармоники ( $n = km$ ):

$$U_{mn} = \frac{m}{2\pi} \int_{\theta=-\frac{\pi}{m}}^{\theta=\frac{\pi}{m}} \sqrt{2}U_2 \cos \vartheta \cos m\vartheta d\vartheta = \frac{2U_d}{n^2 - 1} \quad (2)$$

Из последнего выражения определим коэффициент пульсаций или отношение  $\frac{U_{mn}}{U_d} = \frac{2}{(km)^2 - 1}$ .

Из полученного выражения следует, что при трехфазной сети для шестифазных схем отношения амплитуд  $k$ -тых гармоник к постоянной составляющей равны:

$k$	1	2	3
$\frac{U_{mn}}{U_d}$	0,05	0,014	0,06.

Частота основной гармоники в этом случае при  $f_c=50$  Гц равно 300 Гц.

Если энергия, накопленная в электролизере (как эквивалентной емкости мала, то ток электролизера становится прерывистым и каждая фаза работает через вентиль независимо от других фаз.

Амплитуда  $m$ -ной высшей гармонической

$$U_{mn} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{\sqrt{2}U_2(\cos \vartheta - \cos \theta)}{km\omega r} \cos km\vartheta d\vartheta = \frac{U_d 2[smk\omega\theta \cos \theta - km \cos k\omega\theta sm\theta]}{km\omega r \pi[(k\omega)^2 - 1] \cos \theta} = \frac{U_d f(\theta)}{rc \ k\omega m} \quad (3)$$

Режим работы схемы при различных  $\theta$  зависит от соотношения встречной эдс  $E_0$  и среднего значения выпрямленного напряжения  $U_d$ . Если эквивалентная схема электролизера представлена как  $E_0$  и  $R_3$ , то при  $E_0 > U_d$  ток электролизера будет прерывистый, а при  $E_0 < U_d$  ток электролизера не прерывистый. Как уже отмечено, управление или стабилизацию давления в ЭВГ целесообразно производить полупроводниковыми элементами: транзисторами, тиристорами, симисторами, двухоперационными тиристорами, модульными элементами и т.д. [2]. Как известно, с наименьшими потерями электроэнергии можно управлять параметрами электролизера тиристорами или симисторами [2, 3].

Сравнение трехфазных вариантов управляемых выпрямителей показывает, что при высоких напряжениях ( $>100$  В) целесообразно применение мостовой схемы, а при больших токах и низких напряжениях ( $<50\div 100$  В) целесообразно применение кольцевой схемы [4]. Несмотря на некоторые недостатки включения управляемых элементов на стороне переменного тока или на первичной стороне трансформатора при его применении для согласования параметров электролизера и сети, это включение позволяет совместить функции регулирования, коммутации и защиты ЭВГ одними и теми же элементами.

При включении шести тиристоров анализ электромагнитных процессов произведен достаточно подробно [5]. Представляет интерес практическая реализация схемы с неполным числом тиристоров или тремя тиристорами (рис.2, а).

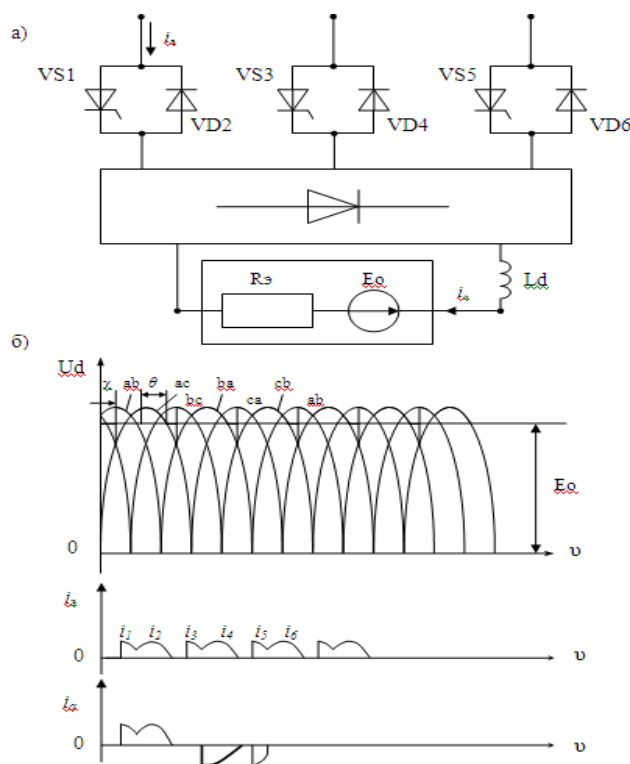


Рис.2 – Схема (а) и линейные диаграммы токов и напряжений мостовой схемы с неполным числом тиристоров (б).

При регулировании тремя тиристорами система управления и линейные диаграммы токов и напряжений приведены на рис.2, б.

Мгновенное значение тока через электролизер имеет следующие составляющие:

$$i_3 = \begin{cases} i_1 = \frac{U_{ab} - E_o}{R_3}, & \alpha \leq \nu \leq \frac{\pi}{6} + \theta; \\ i_2 = \frac{U_{ac} - E_o}{R_3}, & \frac{\pi}{2} - \theta \leq \nu \leq \frac{\pi}{2} + \theta \\ i_3 = \frac{U_{bc} - E_o}{R_3}, & \frac{2\pi}{3} + \alpha \leq \nu \leq \frac{5}{6}\pi + \theta; \\ i_4 = \frac{U_{ba} - E_o}{R_3}, & \frac{7}{6}\pi - \theta \leq \nu \leq \frac{7}{6}\pi + \theta; \\ i_5 = \frac{U_{ca} - E_o}{R_3}, & \pi + \alpha \leq \nu \leq \frac{2}{3}\pi + \theta; \\ i_6 = \frac{U_{cb} - E_o}{R_3}, & \frac{11}{6}\pi - \theta \leq \nu \leq \frac{11}{6}\pi + \theta. \end{cases} \quad (4)$$

Ток фазы

$$i_a = \begin{cases} i_1, \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{6} + \theta; \\ i_2, \frac{\pi}{2} - \theta \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2} + \theta; \\ i_4, \frac{7\pi}{6} - \theta \leq \vartheta \leq \frac{7\pi}{6} + \theta; \\ i_5, \pi + \alpha \leq \vartheta \leq \frac{3\pi}{2} + \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Ток через тиристор

$$i_{VT} = i_a = \begin{cases} i_1, \alpha \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{6} + \theta; \\ i_2, \frac{\pi}{2} - \theta \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{2} + \theta. \end{cases} \quad (6)$$

Среднее значение тока через тиристор в относительных единицах:

$$\bar{I}_{Tcp} = \frac{2\pi}{\left(\frac{U_m}{R_3}\right)} I_{Tcp} = 3 \sin \theta + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \left(\frac{\pi}{6} + 3\theta - \alpha\right) \cos \theta. \quad (7)$$

Действующее значение тока через тиристор в относительных единицах:

$$\bar{I}_{T_1} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{24} + \frac{3\theta}{4} + \frac{7 \sin 2\theta}{8} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin(2\alpha + \frac{2\pi}{3})}{8} - \cos \theta \cos(\alpha + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{2} \cos^2 \theta \left( \frac{\pi}{6} - \alpha + 3\theta \right)}. \quad (8)$$

Действующее значение тока фазы

$$I_a = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_5^2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\theta} i_1^2 dv + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\theta}^{\frac{\pi}{6}+\theta} i_2^2 dv + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}-\theta}^{\frac{7\pi}{6}+\theta} i_4^2 dv + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi+\alpha}^{\frac{3\pi}{2}+\theta} i_5^2 dv} = \quad (9)$$
$$= \sqrt{2(I_1^2 + I_2^2)} = \sqrt{2} \sqrt{I_1^2 + I_2^2}.$$

Тиристорные системы управления ЭВГ имеют высокие энергетические показатели, надежность, быстродействие, позволяют функции регулирования, коммутации и защиты обеспечить одними и теми же элементами-тиристорами. Однако, наряду с достоинствами они имеют и существенный недостаток - являются источником радиопомех, которые при определенных частотах могут достигать значительного уровня [1]. Выполнение требований «Общесоюзных норм допустимых промышленных радиопомех» приводит к необходимости теоретического и экспериментального исследования уровней радиопомех тиристорных систем электропитания и управления ЭВГ и целесообразности введения их в схемотехнических решения помехоподавляющих устройств или применения определенных законов управления тиристорами. Общеизвестным является сложность анализа факторов, влияющих на уровень радиопомех и обеспечение помехоподавления на широком диапазоне частот. Ввиду импульсного характера токов и напряжений в эксплуатационных режимах ЭВГ, а также паразитных индуктивностей и емкостей монтажа указанные системы можно рассматривать как колебательные. Наиболее целесообразно тиристорную систему при регулировании на стороне переменного тока рассматривать по отношению к сети как источник несинусоидального напряжения и тока.

Как показатели предварительные экспериментальные результаты измерений радиопомех и исследования, проведенные в [1], наибольший уровень радиопомех наблюдается при углах  $\alpha = 75-90$  эл.град. По этой причине

проведены экспериментальные исследования при  $\alpha = 90^\circ$ . Теоретически совокупность гармоник в полосе пропускания определяется по формуле:

$$U_n = \sqrt{\sum_{f=f_n}^{f=f_g} U_k^2}$$

где  $U_k^2 = a_k^2 + b_k^2$  – амплитуда  $k$ -той гармоники,  $a_k, b_k$  – амплитуды косинусоидальной и синусоидальной составляющих,  $f_g$  и  $f_n$  – высшая и низшая частота в полосе пропускания измерителя помех.

Общесоюзными нормами принято считать измерение поля помех и напряжения помех. В первом случае измерения производятся специальным измерителем с антенной при питании от автономного источника энергии. Во втором случае измерение ведется измерителем помехи. Методика измерений рассмотрена в [3]. В качестве измерителя использован прибор первого класса Т-SMV-6,1. Помехи сетевые при проведении измерений не превышали 10. При отсутствии помехоподавляющих устройств для трехфазной мостовой схемы при включении тиристоров на первичной стороне результаты измерений сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Уровень радиопомех									
Фазы	МГц	0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6	10
А	дБ	108	100	99	98	95	85	60	54
В	дБ	106	100	100	103	95	83	58	45
С	дБ	106	101	101	95	94	83	63	45

На рис.3 представлены зависимости расчетных и экспериментальных характеристик для исследуемой схемы, которые позволяют сопоставить их и показать превышение над требованиями. С целью снижения уровня радиопомех проведена серия экспериментов с емкостными фильтрами (Приложение ), которые показали, что снижение уровня

Анализ экспериментальных характеристик показывает, что наиболее эффективно включение емкостных фильтров между фазами. Наиболее трудно

подавляемыми частотами для емкостных фильтров являются частоты  $f = 0,5 \div 3$  МГц, и на практике защита от помех в этом диапазоне не обеспечивается.

Известно, что на уровень радиопомех влияет крутизна переднего фронта напряжения на тиристорах и в отдельных случаях параметры RC-цепочек включенные для защиты тиристоров от перенапряжений.

С целью повышения эффективности емкостных фильтров был проведен ряд экспериментов, в которых для повышения эффективности использовались дополнительные типовых безвитковые дроссели для защиты от  $\frac{di}{dt}$ .

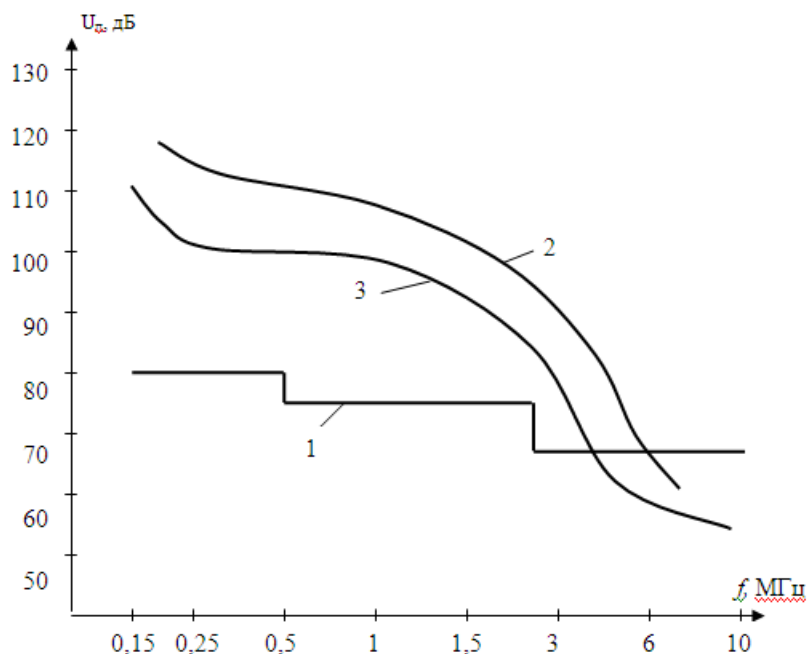


Рис. 3 Уровень радиопомех в мостовой схеме с регулированием тиристорами на стороне переменного тока: 1 – допустимые нормы; 2 – расчетные; 3 – экспериментальные.

Основным достоинством LC-фильтров является эффективность подавления радиопомех. Как показали исследования, требуемое подавление помех может быть обеспечено однозвенным П-образным LC-фильтром (рис.4, а) или однозвенным Г-образным LC-фильтром (рис.4, б) с электрическими параметрами  $L = 20$  мкГ,  $C = 2$  мкФ.



Для проверки справедливости полученных результатов были собраны П-образный и Г-образный LC-фильтры с этими параметрами. Индуктивность была выполнена как воздушный дроссель из медной шины 4 x 40, конденсаторы типа МЗГЧ и Н-75-П. Результаты подавления радиопомех П-образным и Г-образным LC-фильтрами с расчетными параметрами приведены в таблицах 2, 3 и изображены на рис.5, 6. Анализ результатов экспериментов показывает, что Г-образный фильтр более эффективен на частотах 1 МГц, однако не обеспечивает запаса в начале защищаемого диапазона (0,15 МГц). П-образный фильтр обеспечивает запас в 10 Дб на всей шкале частот защищаемого диапазона. Его использование для подавления радиопомех позволит обеспечить выполнение «Общесоюзных норм допустимых промышленных радиопомех» и при разбросе параметров агрегатов, влияющих на уровень радиопомех.

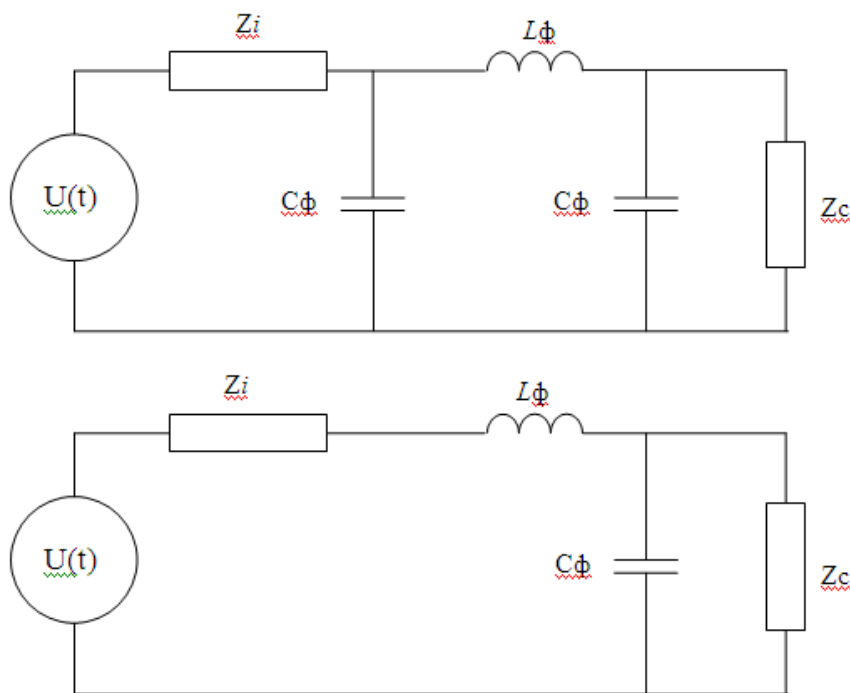


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения тиристорной системы регулирования, как источника радиопомех с П-образным (а) и Г-образным (б) LC-фильтром

Таблица 2

В каждой фазе включен П-образный LC- фильтр $C = 2 \text{ мкФ}$ , $L = 20 \text{ мкГ}$									
Уровень радиопомех									
Фазы	МГц	0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6	10
А	дБ	67	52	51	46	50	49	32	25
В	дБ	69	56	59	60	60	56	44	26
С	дБ	72	62	63	55	64	59	46	26

Таблица 3

В каждой фазе включен Г-образный LC- фильтр $C = 2$ мкФ, $L = 20$ мкГ									
Уровень радиопомех									
Фазы	МГц	0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6	10
А	дБ	81	59	68	57	55	52	25	23
В	дБ	82	62	61	63	59	52	26	21
С	дБ	82	63	63	65	55	55	25	22

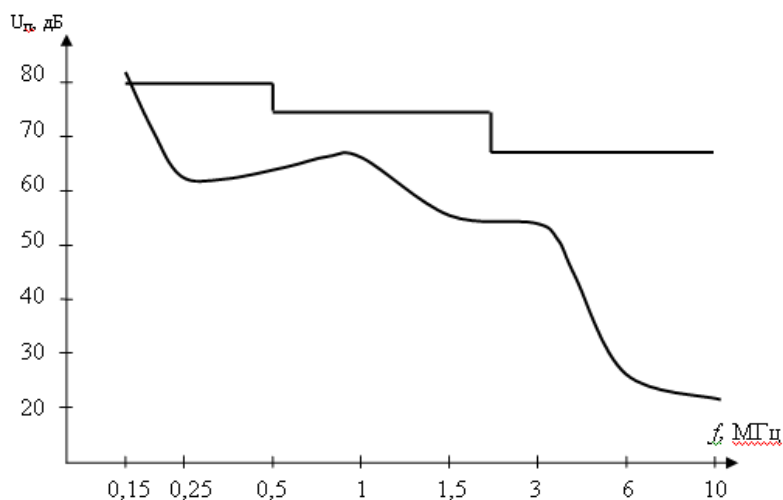


Рис. 5. Уровень радиопомех.  
 Г-образный LC-фильтр  $C = 2$   
 мкФ  
 $L = 20$  мкГ.

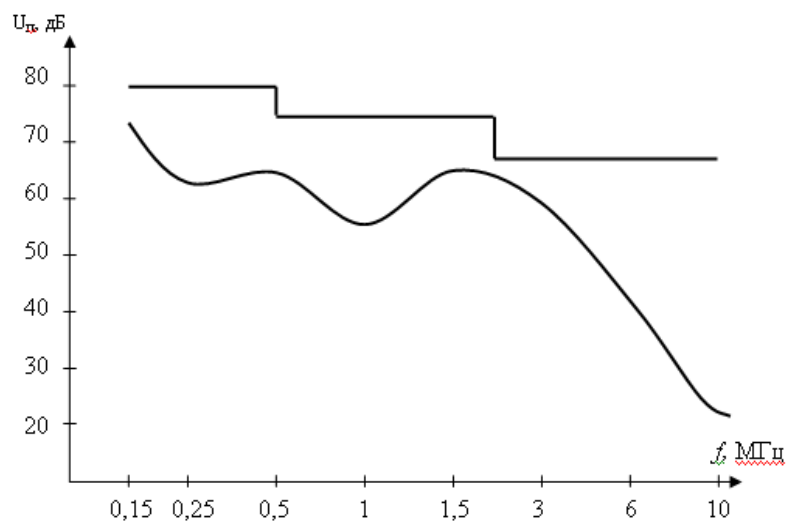


Рис. 6. Уровень радиопомех.  
 П-образный LC-фильтр  
 $C = 2$  мкФ  $L = 20$  мкГ.

### Список литературы:

1. Феокистов Н.А. Научные основы создания ЭВГ для сварки и пайки // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2001. № 1. С.56-59.
2. Варламов И.В., Феокистов Н.А., Теодорович Н.Н. Электролизно-водные генераторы кислородно-водородной смеси в технологии пайки и сварки // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2001. № 1. С.60-63.
3. Феокистов Н.А. Тиристорные устройства управления и защиты бытовых аппаратов и электротехнологических установок.- М.: МГУс, 1996.- 222 с.
4. Закс М.И. Сварочные выпрямители. Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 96 с.
5. Режимы работы электронных систем управления электролизно-водным генератором большой мощности / Д.А. Михайлюк, Е.В. Ларин, Н.А. Феокистов и др. // Сб. научн. статей «Инновационные технологии», вып.2.- М.: ИГУПИТ, РосНОУ, 2009. С. 20-30.