

УДК 621.314.57

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ  $du / dt$** **М.Ю. Пустоветов**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика, автоматика и системы коммуникаций», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: [mgsn2006@yandex.ru](mailto:mgsn2006@yandex.ru)

**Аннотация.** Проблема обеспечения электромагнитной совместимости при использовании частотно-регулируемого электропривода является актуальной, так как влияет на надежность и безопасность его эксплуатации. Одной из разновидностей выходных фильтров электромагнитной совместимости являются фильтры  $du/dt$  – Г-образные фильтры нижних частот. В результате анализа параметров фильтров, выпускаемых фирмой Danfoss, получены аналитические выражения для определения их индуктивности, емкости и демпфирующего сопротивления в зависимости от мощности нагрузки преобразователя частоты. Также определены численные значения важных для синтеза фильтров характеристик.

*Ключевые слова:* частотно-регулируемый электропривод, фильтр электромагнитной совместимости, преобразователь частоты, индуктивность, емкость, демпфирующее сопротивление.

**THE  $du / dt$  FILTERS PARAMETERS AND CHARACTERISTICS DETERMINATION****Mikhail Pustovetov**

Ph.D., associate professor of the “Power management, automation and communication systems” department of “Don state technical university”, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: [mgsn2006@yandex.ru](mailto:mgsn2006@yandex.ru)

**Abstract.** The problem of ensuring electromagnetic compatibility when using a frequency-controlled electric drive is relevant, since it affects the reliability and safety of its operation. One of the types of output filters of electromagnetic compatibility are  $du/dt$  filters - L-shaped low-pass filters. As a result of analyzing the parameters of the filters produced by Danfoss, analytical expressions are obtained for determining their inductance, capacitance and damping resistance depending on the load power of the frequency converter. Numerical values of the characteristics important for the synthesis of filters are also determined.

*Keywords:* frequency-controlled electric drive, EMC filter, frequency converter, inductance, capacitance, damping resistance.

**Введение.** Проблемы электромагнитной совместимости тесно связаны с надёжностью и безопасностью частотно-регулируемого электропривода [1 - 3]. В частности, установлены требования [4], ограничивающие допусти-

мую амплитуду импульса линейного (междуфазного) напряжения, подаваемого от преобразователя частоты (ПЧ) на зажимы двигателя, от времени нарастания импульса. В [5] установлено ограничение на скорость повышения напряжения, поступающего с ПЧ на двигатель,  $du / dt = 500$  В/мкс. Там же указано, что ограничения напряжения и скорости повышения напряжения можно достичь присоединением к выходу ПЧ индуктора или фильтра нижних частот (фильтр, эффективно пропускающий частотный спектр сигнала ниже частоты среза и подавляющий частоты сигнала выше этой частоты) с шунтирующим конденсатором, подключаемых последовательно.

Одним из видов фильтров нижних частот, практически применяемых для заявленной цели, является фильтр  $du / dt$ . Вариант его схемы показан на Рис. 1. Фильтр состоит из трёх фазных реакторов  $L$  и трёх конденсаторов  $C$ , включённых каждый либо между двумя фазами (схема треугольник) либо между фазой и нейтральной точкой (схема звезда). Резисторы  $R$  добавляются для настройки высокочастотных компонентов спектра напряжения [6]. Впрочем, параллельные индуктивностям  $L$  резисторы  $R$  могут отсутствовать [7]. При использовании фильтра  $du / dt$  форма напряжения на двигателе остаётся импульсной [2, 8].

Известно, что для фильтров  $du / dt$  номиналы индуктивностей дросселей и конденсаторов подбираются таким образом, чтобы обеспечивалось подавление частот выше частоты коммутации силовых ключей инвертора ПЧ (частота среза значительно выше частоты переключений транзисторов инвертора (несущей частоты широтно-импульсной модуляции напряжения)). Величина индуктивности находится в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен мкГн, емкость конденсаторов - в пределах нескольких десятков нФ [2]. Фильтры  $du / dt$  могут быть использованы при более низких частотах переключения транзисторов инвертора, чем номинальная, указанная для фильтра. Напротив, следует избегать частот переключения выше номинальной, поскольку работа на них может привести к перегреву фильтра [9]. Тем не менее, вышеприведенных данных недостаточно для синтеза фильтра.

**Цель работы.** Целью данной статьи является анализ известных технических решений в области фильтров  $du / dt$ , вывод на его основе закономерностей для синтеза параметров фильтров при их конструировании, а также проверка полученных результатов посредством компьютерного моделирования функционирования фильтров.

При разработке какого-либо нового устройства приветствуется ознакомление с существующими аналогами. В качестве такого аналога, базы для аналитического исследования будем использовать опубликованные данные о фильтрах фирмы *Danfoss* на линейное напряжение 380 В [9]. Таблица

1 содержит параметры и характеристики фильтров согласно [9]: активная мощность трехфазной нагрузки преобразователя частоты  $P$ , действующее значение тока фазы нагрузки  $I$ , индуктивность фазы фильтра  $L$ , емкость фазы фильтра  $C$ , максимальные потери в фильтре  $\Delta p_{\max}$ , минимальная частота переключений инвертора  $f_k$ .

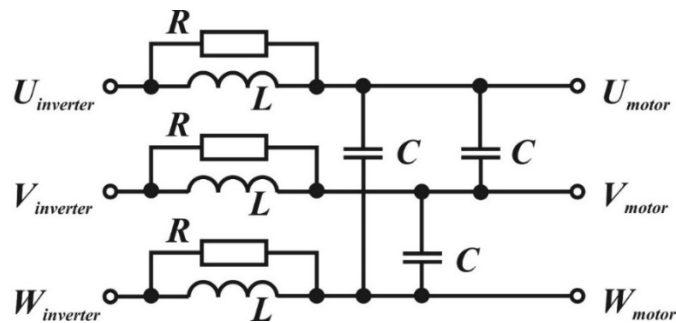


Рисунок 1 – Вариант схемы фильтра  $du/dt$

Таблица 1 – Исходные данные фильтров  $du/dt$  согласно [9]

$P$	$I$	$L$	$C$	$\Delta p_{\max}$	$f_k$
кВт	А	мкГн	нФ	Вт	кГц
11	24	150	10	37	4
15	32	150	10		4
18,5	37,5	150	10		4
22	44	150	10		4
30	61	110	13,6	130	3
37	73	110	13,6		3
45	90	110	13,6		3
55	106	95	15	145	3
75	147	111	15		3
90	177	111	15	205	3
110	212	50	20		3
132	260	50	20	315	3
160	315	50	20		3
200	395	30	43		3
250	480	30	43	398	3
315	600	17	66		2
355	658	17	66	550	2
400	745	13	99		2
450	800	13	99		2
500	880	13	99	850	2
					2

Будем считать, что величины  $C$  в [9] указаны для случая их соединения по схеме звезда.

Таблица 2 содержит результаты расчетов на основе данных таблицы 1: частота среза  $f_p$  [10, 11], падение напряжения на индуктивности при частоте 50 Гц в процентах от номинального фазного напряжения 220 В  $\Delta u_{L\%}$ , кратность частот  $f_p / f_k$ , доля потерь в фильтре от номинальной мощности нагрузки  $\Delta p_{\%}$ , эквивалентное активное сопротивление фазы фильтра  $R_{\text{экв ф}}$ , сопротивление демпфирующего резистора  $R$ , характеристическая частота  $f_x$  [11], демпфирующий коэффициент  $m$  [11]. Широкополосный фильтр второго порядка, соответствующий схеме на рис. 1, на частотах выше  $f_x$  имеет малое сопротивление для гармоник тока [11].

Таблица 2 – Расчетные параметры и характеристики фильтров  $du / dt$

$f_p$	$f_p / f_k$	$\Delta u_{L\%}$	$\Delta p_{\%}$	$R_{\text{экв ф}}$	$R$	$f_x$	$m$
кГц	о.е.	%	%	МОм	Ом	кГц	о.е.
130	32	0,51	0,17	6,37	140	114	0,77
130	32	0,69			140	114	0,77
130	32	0,80			140	114	0,77
130	32	0,94			140	114	0,77
130	43	0,96	0,29	5,35	105	111	0,73
130	43	1,15			105	111	0,73
130	43	1,41			105	111	0,73
133	44	1,44	0,26	4,30	90	118	0,78
123	41	2,33	0,23	2,18	100	106	0,74
123	41	2,81			100	106	0,74
159	53	1,51	0,20	1,06	60	133	0,69
159	53	1,86			60	133	0,69
159	53	2,25			60	133	0,69
140	47	1,69	0,16	0,58	30	123	0,78
140	47	2,06			30	123	0,78
150	75	1,46	0,15	0,42	18	134	0,79
150	75	1,60			18	134	0,79
140	70	1,38	0,17	0,37	12	134	0,91

**Материал и результаты исследований.** Расчеты в таблице 2 выполнены по следующим формулам:

$$f_p = (2\pi\sqrt{L \cdot C})^{-1}; \quad (1)$$

$$\Delta u_{L\%} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L \cdot I \cdot 100\% / U, \quad (2)$$

где  $f_1 = 50$  Гц;  $U = 220$  В - действующее значение фазного напряжения;

$$\Delta p_{\%} = \Delta p_{\max} \cdot 100\% / P; \quad (3)$$

$$R_{\text{экв } \phi} = \Delta p_{\max} / 3 / I^2; \quad (4)$$

$$f_x = (2\pi RC)^{-1}; \quad (5)$$

$$m = L / R^2 / C. \quad (6)$$

На Рис. 2 и Рис. 3 приведены уравнения линий трендов, представляющие собой математические выражения, увязывающие значения параметров фильтров  $du / dt$  с мощностью трехфазной нагрузки, питаемой от ПЧ, а также величина достоверности аппроксимации линией тренда заданных согласно таблице 2 значений параметров (точки-маркеры) - коэффициент детерминации, сообщающий о том, в какой мере данный тренд объясняет расположение исходных точек.

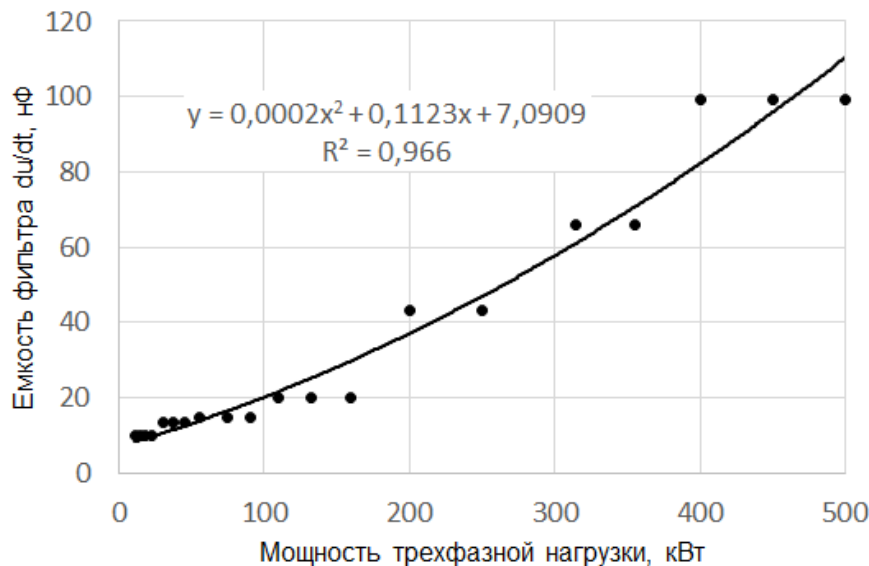


Рисунок 2 – Аппроксимация емкости фильтров  $du / dt$  аналитической функцией

Тестирование пригодности расчетных данных таблицы 2 для синтеза фильтров  $du / dt$  производилось следующим образом. Согласно аналитическим выражениям на Рис. 2 и Рис. 3 были рассчитаны параметры фильтра для питания от ПЧ асинхронного двигателя (АД) типа АЭВ 80 В2У2 номинальной мощностью 1,5 кВт (его параметры и характеристики приведены в [12]). В результате расчета получили: 250 мкГн и 7,1 нФ, при которых  $\Delta u_{L\%} = 0,11\%$  и  $f_p = 119$  кГц.

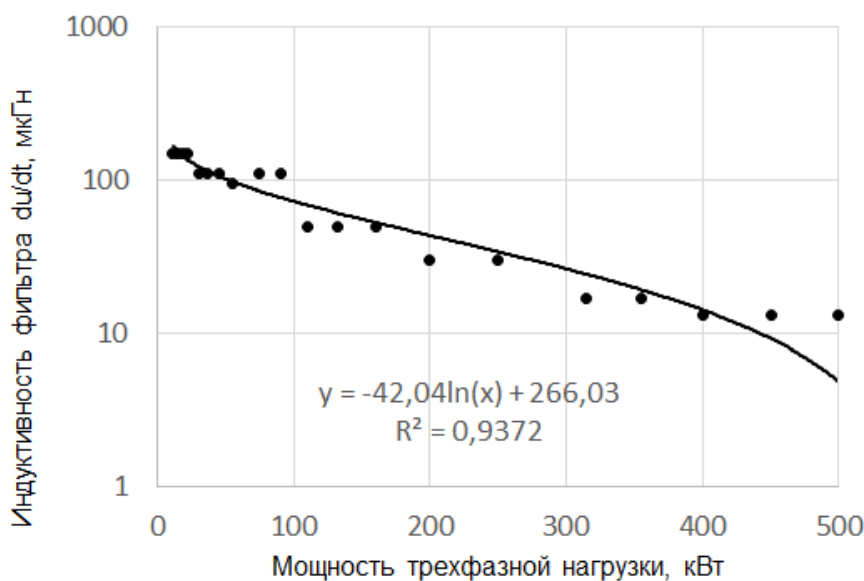


Рисунок 3 – Аппроксимация индуктивности фильтров  $du / dt$  аналитической функцией

Далее на основе компьютерной модели частотно-регулируемого электропривода, описанной в [12], при  $f_k = 2,5$  кГц были проведены вычислительные эксперименты, показавшие соответствие фильтра с рассчитанными параметрами предъявляемым требованиям по крутизне фронтов импульсов напряжения. Результаты наглядно демонстрируются на Рис. 4 и Рис. 5, где для переднего фронта импульса напряжения на входе фильтра имеем 889 В/мкс, а на выходе фильтра уже лишь 222 В/мкс (см. таблицу 3). В модели фильтра использовано значение  $R = 200$  Ом. Было выяснено, что  $R$  позволяет демпфировать возможные высокочастотные колебания напряжения на выходе фильтра. Уменьшение демпфирующего сопротивления до  $R = 20$  Ом привело в ряде случаев к невозможности ограничения  $du / dt \leq 500$ . Различие ЛАЧХ напряжения на выходе фильтра при различных значениях  $R$  (500 Ом, 200 Ом и 20 Ом) показано на рис. 6.

Видно, что отсутствие  $R$  в схеме на рис. 1 или его слишком большое значение ведут к появлению высокого резонансного пика. Слишком малая величина  $R$  приводит к расширению полосы пропускания в зону более высоких частот. Поэтому, было принято решение при выборе величины  $R$  для синтеза фильтров руководствоваться видом ЛАЧХ, подобным случаю  $R = 200$  Ом на рис. 6, где отношение выходного напряжения ко входному на резонансной частоте лежит в пределах 1,5...1,6. На рис. 7 показана полученная аппроксимирующая зависимость для  $R$ .

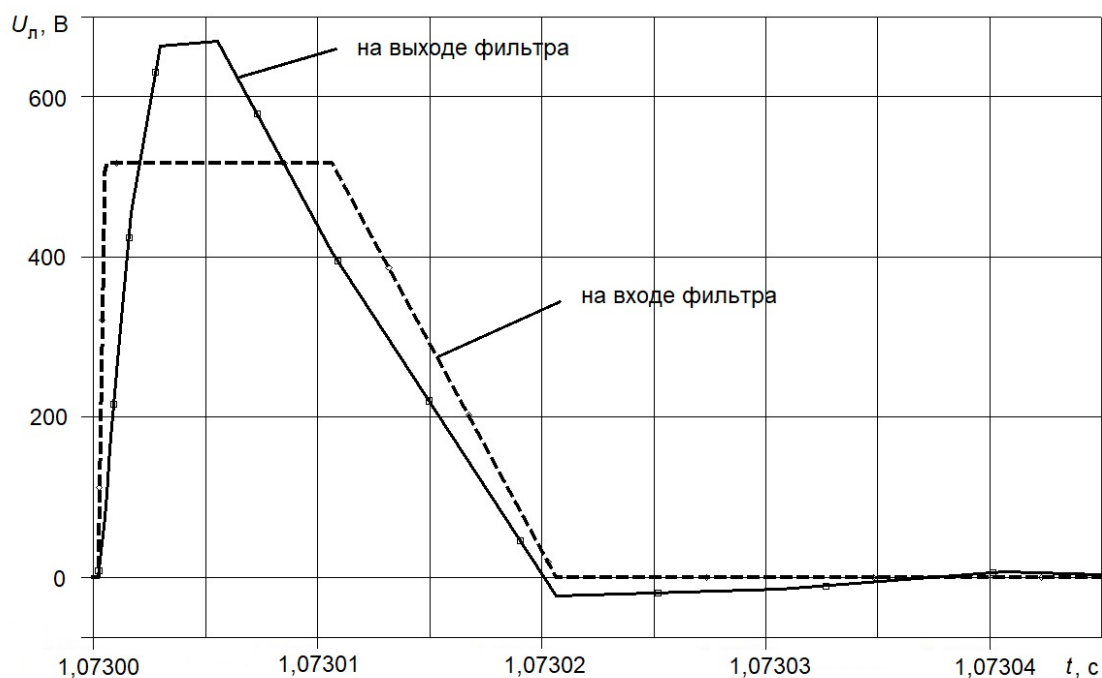


Рисунок 4 – Результаты моделирования линейного напряжения на фильтре  $du / dt$  с параметрами 250 мкГн, 7,1 нФ и 200 Ом

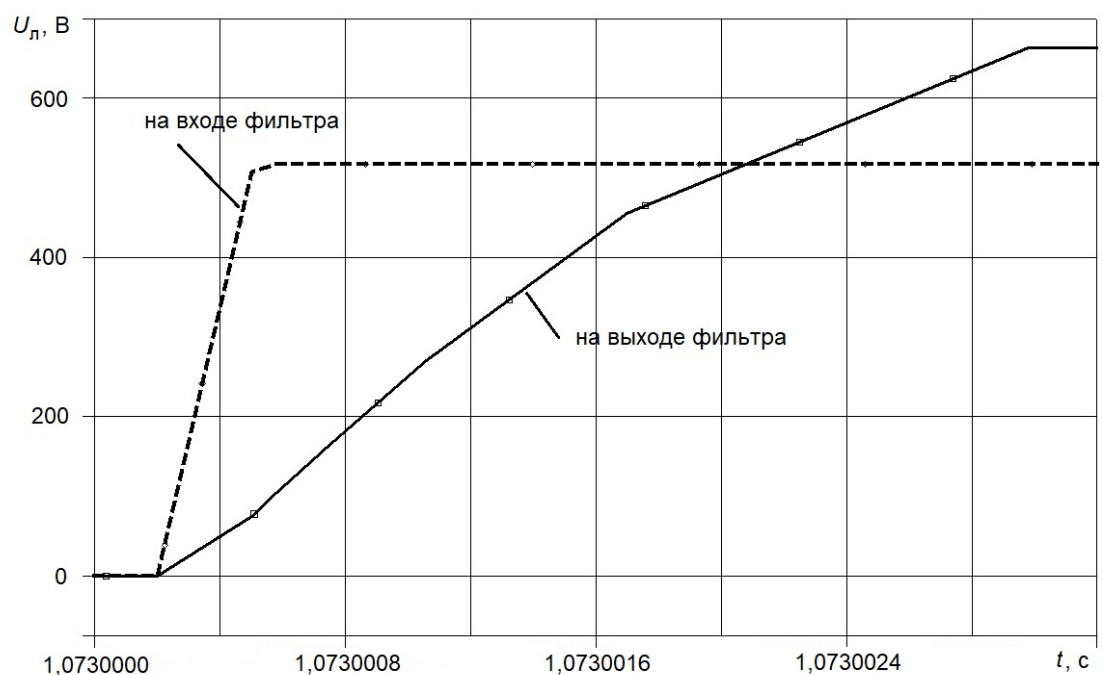


Рисунок 5 – Результаты моделирования линейного напряжения на фильтре  $du / dt$  с параметрами 250 мкГн, 7,1 нФ и 200 Ом (фрагмент рис. 4 – увеличен передний фронт импульса)

Также были рассчитаны параметры фильтра для случая питания АД типа 4А112М2УЗ номинальной мощностью 7,5 кВт, составившие: 180 мкГн и 7,1 нФ. Поскольку оба упомянутых АД соответствуют диапазону мощности

«единицы киловатт», а значение  $C$  не изменилось, было решено использовать при моделировании фильтр с теми же параметрами, что и для АД мощностью 1,5 кВт (см. таблицу 3).

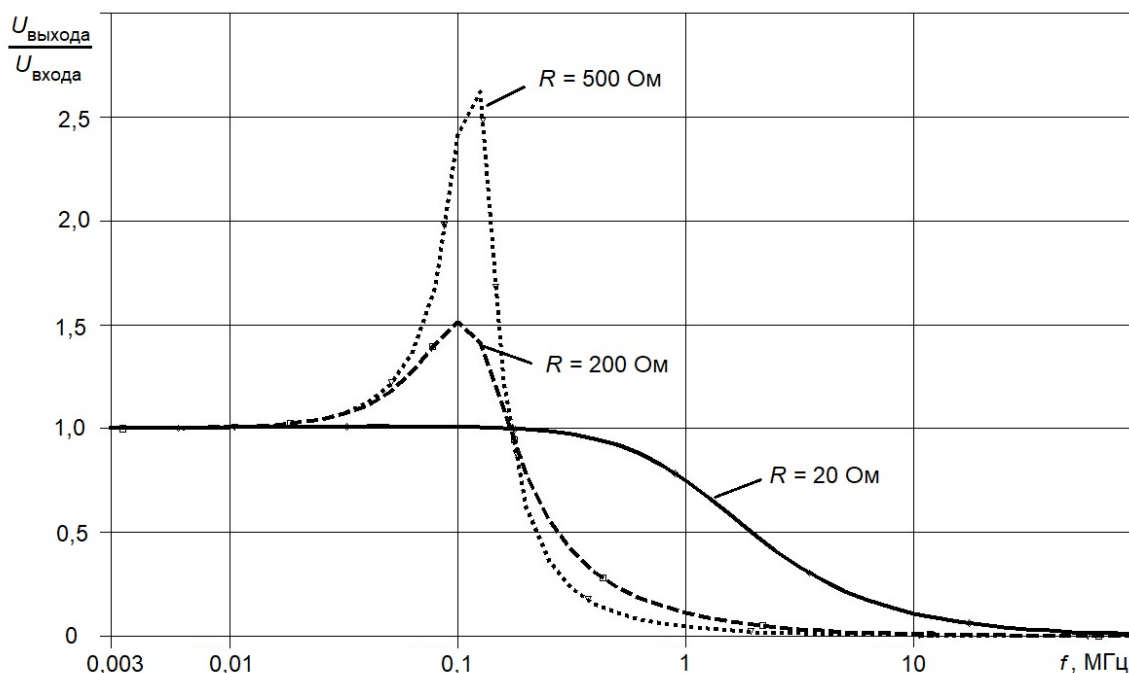


Рисунок 6 – ЛАЧХ фильтра  $du / dt$  с параметрами 250 мкГн и 7,1 нФ при разных значениях  $R$

Таблица 3 – Результаты моделирования фильтров  $du / dt$  при  $f_k = 2,5$  кГц

Номинальная мощность трехфазного АД	Тип АД	Значение $du / dt$ на входе фильтра	Значение $du / dt$ на выходе фильтра	Доля суммарной мощности, выделяемой на $R$ , от номинальной мощности АД
кВт	-	В/мкс	В/мкс	%
1,5	АЭВ 80 В2У2	889	222	< 0,0002
7,5	4А112М2У3	1289	206	
55	НВА-55 [14]	1293	282	< 0,01

Поскольку  $\Delta u_{L\%}$  для фильтров  $du / dt$  невелико, это позволяет использовать фильтры с унифицированными для отрезков шкалы мощностей параметрами, как видно из таблицы 1 и Рис. 2, 3 и 7.

Некоторые другие подходы к выбору параметров фильтров  $du / dt$  опубликованы в [8, 13].



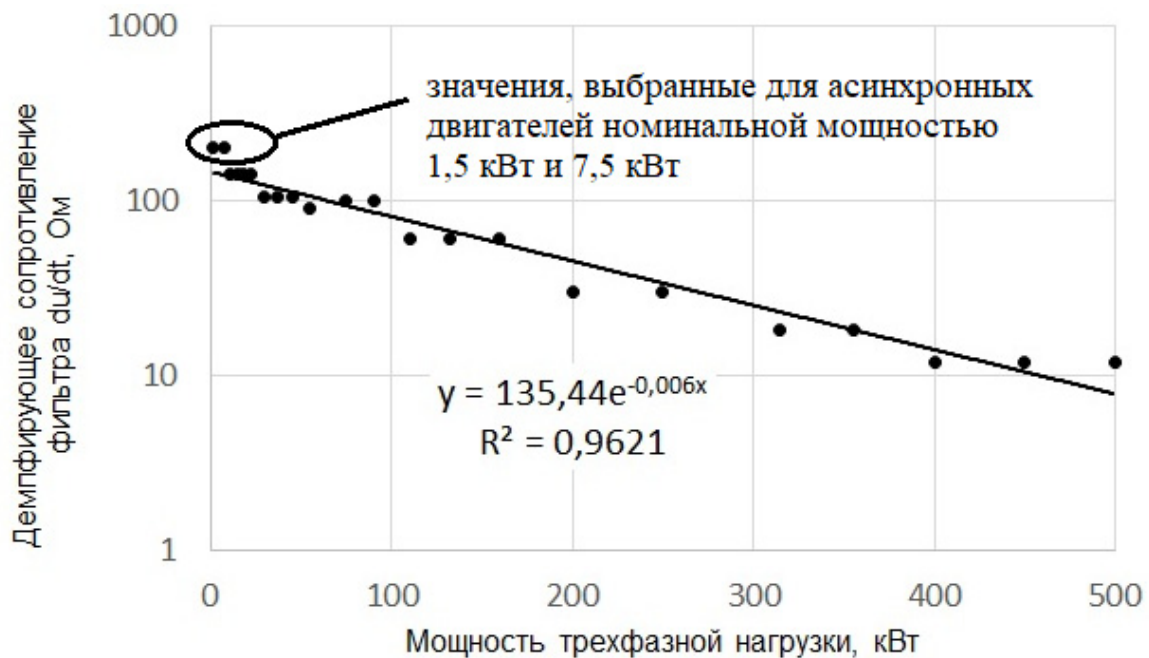


Рисунок 7 – Аппроксимация демпфирующего сопротивления фильтров  $du / dt$  аналитической функцией

**Выводы.** В результате анализа параметров фильтров  $du / dt$ , выпускаемых фирмой *Danfoss*, получены аналитические выражения для определения  $L$ ,  $C$  и  $R$  в зависимости от мощности нагрузки ПЧ, а также рассчитаны характеристики, необходимые для синтеза фильтров:  $f_p / f_k$ ,  $\Delta u_{L\%}$ ,  $\Delta p_{\%}$ ,  $f_x$  и  $m$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пустоветов М.Ю. Условие эффективной эксплуатации частотно-регулируемого электропривода / М.Ю. Пустоветов // Научное обозрение. – 2016. – №23. – С. 107-115.
2. Фильтры для частотных преобразователей // Промышленный Казахстан. – 2014. – № 9(105). – С. 23-27.
3. Синчук О.Н. Влияние регулируемых электроприводов подъемных установок шахт на показатели качества электроэнергии в питающих сетях / О.Н. Синчук, Ю.Б. Филипп, М.Н. Максимов, Р.В. Зайцев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – № 1 (37). – С. 49-55.
4. ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009 Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей. — М.: Стандартинформ, 2011. 15 с.
5. ГОСТ Р 51330.8-99 Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 7. Защита вида е. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 50 с.
6. Muetz, A. Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors. Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitaet Darmstadt zur Erlangung des akademischen



Grades einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation. – Darmstaedter Dissertation, 2004, p. 252 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/dissertationen/dissannette.pdf>.

7. Геворкян М. Фильтры подавления электромагнитных помех фирмы Ersos / М. Геворкян // Компоненты и технологии, 2001. №7. С 18 – 21.

8. Пустоветов М. Компьютерное моделирование фильтров du/dt частотно-регулируемого электропривода / М. Пустоветов // Theoretical and Applied Computer Science and Information Technology: Proceedings of the 1st International Conference TACSIT-2015. – Severodonetsk: East Ukrainian National University, 2015. – pp. 91-94.

9. Danfoss. Output Filters Design Guide VLT® AutomationDrive FC 300, VLT® AQUA Drive FC 200, VLT® HVAC Drive FC 100 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sngy.ru/upload/iblock/705/70597f8b2a20ae71e0d0e2342eecd124.pdf>

10. Холодков, И.В. Схемотехника: учебное пособие: в 2 ч. / И. В. Холодков; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2013. Ч. 1: Аналоговая схемотехника. – 2013. – 152 с.

11. Боярская Н.П. Широкополосные силовые фильтры гармоник. / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Е.С. Шевченко, Д.Э. Егоров // Ползуновский вестник. – № 4-2. – 2013. – С. 34-38.

12. Пустоветов М.Ю. Математическое моделирование тока, потребляемого преобразователем частоты при включении / М.Ю. Пустоветов // Сборник научных трудов международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2017». – Днепр: Национальный горный университет, 2017. – С. 313-324.

13. Пустоветов М.Ю. Расчет и моделирование фильтров du/dt для частотно-регулируемого электропривода на примере асинхронного вспомогательного привода электровоза / М.Ю. Пустоветов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – №2. – С. 27-31.

14. Пустоветов М.Ю. Тестирование схемы электропривода с последовательным соединением фаз двух асинхронных двигателей посредством имитационного моделирования / М.Ю. Пустоветов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 1 (2-3). – С. 19-22.