



6. Bushmelev P, Pivkin A., Lysenko A., Study Algorithm Speed Signal Generating Feedback for Information- measuring System Control Active Vibration Protection // International 2015. – Vol. 10, № 23. – P. Journal of Applied Engineering Research.

7. Дьяконов В.П. MATLAB Simulink 5/6/7. Основы применения. - 2-е изд., перераб. и доп./ М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. - 800 с.

УДК 621.314.5

ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СИНУС-ФИЛЬТРА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ НАПРЯЖЕНИЯ

М.Ю. Пустоветов

кандидат технических наук, докторант кафедры «Электропоезда и локомотивы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта (МИИТ)", г. Москва, Россия, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Аннотация. В работе предложена и поэтапно рассмотрена процедура выбора параметров синус-фильтра для случая повышенной (400 ... 1000 Гц) частоты напряжения. Обсуждены вопросы ограничений и специфических требований, оказывающих влияние на выбор компонентов синус-фильтра.

Ключевые слова: преобразователь частоты, синус-фильтр, компьютерное моделирование.

THE PROCEDURE OF SINE-WAVE FILTER PARAMETERS SELECTION IN CASE OF INCREASED FREQUENCY OF VOLTAGE

Mikhail Pustovetov

Ph.D., doctoral student of the «Electric trains and locomotives» department of Federal State Institution of Higher Education «Russian University of Transport», Moscow, Russia, e-mail: mgsn2006@yandex.ru

Abstract. The paper proposes and gradually considers the procedure for selecting the parameters of the sine-wave filter for the case of increased (400 ... 1000 Hz) voltage frequency. Limitations and specific requirements affecting the choice of sine-wave filter components discussed.

Keywords: frequency converter, sine-wave filter, simulation.

Введение. Для современного электрического привода переменного тока, а также систем электроснабжения, имеющих в своем составе преобразователь частоты (ПЧ), проблема электромагнитной совместимости является одной из ключевых ввиду характерных особенностей современной технологии формирования напряжения импульсными полупроводниковыми



преобразователями. Напряжение формируется как набор трапецеидальных импульсов с очень крутыми фронтами и содержит широкий спектр высших временных гармоник, вызывающих потери энергии во всех элементах передающего тракта от выхода преобразователя частоты до питаемой нагрузки. Одним из технических решений, позволяющих максимально избавиться от высших временных гармоник в спектре напряжения, является установка синус-фильтров [1, 2] на выходе ПЧ. В [3, 4] рассмотрены примеры выбора параметров синус-фильтров при питании напряжением частотой до 50 Гц. В качестве нагрузки выступали устройства типа асинхронных двигателей и трансформаторов. На практике встречаются случаи, когда требуется использование синус-фильтра при повышенных частотах питающего напряжения 400...1000 Гц, а нагрузкой является диодный выпрямитель, в свою очередь нагруженный на емкость и автономный инвертор, включенные параллельно друг другу [5]. Нагрузка системы электроснабжения может изменяться от холостого хода до перегрузки. В этом случае нецелесообразно использовать методику расчета параметров синус-фильтра «от емкости» [4].

Цель работы. Требуется предложить процедуру выбора параметров синус-фильтра в случае повышенной частоты напряжения, учитывая возможность эксплуатации оборудования в диапазоне частот основной гармоники.

Исходные данные и ограничения. Пусть имеется трехфазная система электроснабжения, в которой нагрузка питается от ПЧ. В установившемся режиме работы частота основной гармоники напряжения на выходе ПЧ составляет $f_1 = 400...600$ Гц. Несущая частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения составляет $f_{\text{ШИМ}} = 14$ кГц. Мощность ПЧ ограничена. Это означает, что ограничено действующее значение тока на выходе ПЧ в длительном режиме. Такой же ток $I_{L\Sigma}$ будет протекать через индуктивность L фазы синус-фильтра. Величина L ограничивается допустимым падением напряжения ΔU_L на ней от протекания тока в длительном режиме (например, 10 % от действующего значения первой гармоники фазного напряжения). Здесь нужно иметь в виду, что действующим значением тока на выходе ПЧ $I_{L\Sigma}$ будет действующее значение спектра гармоник тока. Падение же напряжения на индуктивности для каждой гармоники тока прямо пропорционально частоте гармоники. Поэтому, удобно принимать в качестве ограничения для расчетов L , что допустимое падение напряжения должно происходить только от протекания лишь первой гармоники тока I_{L1} через индуктивность. Оценить величину действующего значения первой гармоники тока на выходе преобразователя можно исходя из номинальной мощности нагрузки, получающей питание от трехфазной системы электро-

снабжения, учитывая КПД устройств, последовательно включенных в передающий тракт (трансформаторы, кабель, выпрямитель). Активное сопротивление катушки индуктивности фазы синус-фильтра можно ориентировочно определить согласно [6].

Последовательность выбора параметров синус-фильтра.

1. Определяем L по допустимому падению напряжения от протекания I_{L1} . Рекомендуются $\Delta U_L = 10\%$.

2. Задаемся кратностью частот $\frac{f_{\text{ШИМ}}}{f_{\text{рез}}}$, где $f_{\text{рез}}$ - резонансная частота

фильтра. Рекомендуются $\frac{f_{\text{ШИМ}}}{f_{\text{рез}}} = 5 \dots 7$ для ранее указанных величин f_1 и

$f_{\text{ШИМ}}$. В общем случае кратность частот должна быть такова, чтобы обеспечивалось затухание высших гармонических составляющих напряжения ПЧ, связанных с $f_{\text{ШИМ}}$ (они имеют высокие амплитуды). Вычисляем

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_Y}}. \quad (1)$$

3. По $f_{\text{рез}}$ и L рассчитываем емкость на фазу синус-фильтра C_Y для случая соединения по схеме звезда. Для случая соединения фаз емкости по схеме треугольник будет верно $C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3}$.

4. Проверяем синус-фильтр с рассчитанными параметрами на отсутствие в рабочем диапазоне f_1 резонансных явлений, связанных со значительным увеличением амплитуды напряжения на выходе фильтра. Для этого рекомендуется собрать имитационную компьютерную модель системы электроснабжения. Далее провести вычислительный эксперимент, при котором частота и напряжение ПЧ сначала увеличиваются до максимальных значений (восходящий участок кривой 1 на рис 1 и 2), затем следует установившийся режим (горизонтальный участок кривой 1 на рис 1 и 2), затем при максимальном напряжении ПЧ его частота медленно снижается до нижней границы f_1 (нисходящий участок кривой 1 на рис 1 и 2). В первую очередь, вычислительный эксперимент следует провести в режиме холостого хода – в этом случае резонансные явления, если они есть, проявляются в наибольшей мере. Дополнительно можно провести аналогичное моделирование под нагрузкой. Если резонансные явления обнаружены, чтобы сдвинуть их из рабочего диапазона f_1 , целесообразно увеличивать индуктивность. Если это нежелательно, можно уменьшать емкость фильтра. Нужно помнить, что при одинаковой индуктивности снижение емкости приводит к ухудшению фильтрующих свойств, а увеличение емкости, хотя и

приближает форму выходного напряжения фильтра к синусоидальной, но ведет к увеличению тока через емкость, в том числе за счет увеличения первой гармоники тока через емкость, а значит и к увеличению тока через индуктивность фильтра, то есть тока, потребляемого от ПЧ, что может привести к перегрузке и отключению ПЧ. Увеличение как емкости, так и индуктивности ведет к увеличению знаменателя в выражении (1), то есть к снижению $f_{рез}$ и ее приближению к f_1 . Это может вызвать усиление основной гармоники напряжения, что при неизменной нагрузке приведет к повышению I_{L1} и $I_{L\Sigma}$.

5. Проверяем расчетом потери в элементах синус-фильтра и суммарные потери мощности. При отсутствии демпфирующих резисторов в ветвях с емкостями можно оценить последовательное с емкостью фазы активное сопротивление величиной порядка единиц или десятых долей мОм. Направленность на достижение энергоэффективности оборудования, например, в [7] формулируется следующим образом: «Для двухуровневых преобразователей в отсутствие различного рода фильтров эти (дополнительные из-за несинусоидальности напряжения питания) потери могут составить ... 1-2% от номинальной мощности двигателя. ... в фильтре возникают потери, но они будут ниже, чем сокращение дополнительных потерь из-за питания от преобразователя. Таким образом, полный к.п.д. электропривода увеличивается».

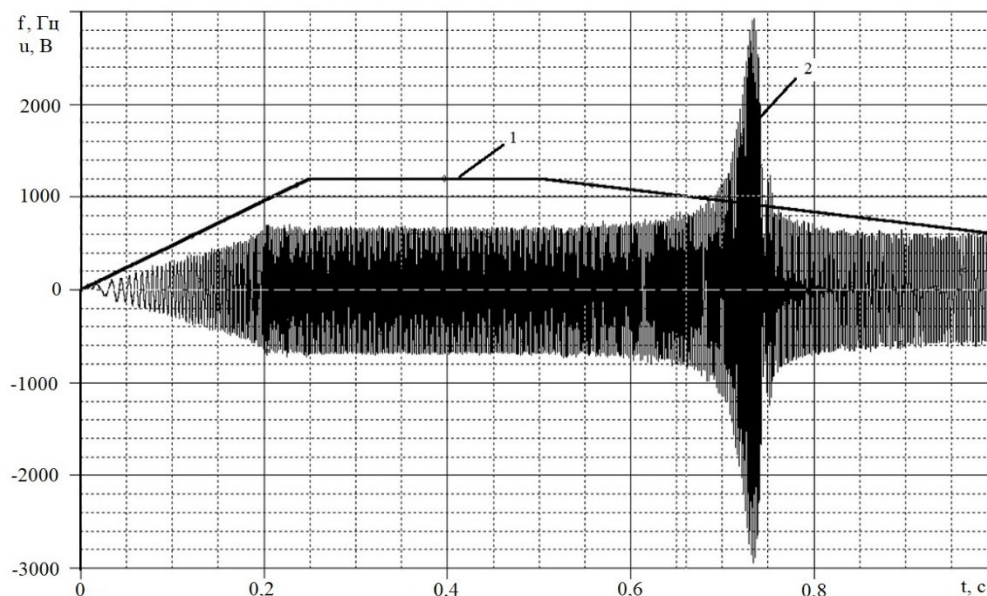


Рисунок 1 – Результаты моделирования выходного напряжения синус-фильтра в режиме холостого хода при разных f_1 . Виден резонанс напряжения, приходящийся на 440 ... 500 Гц, что лежит в рабочем диапазоне f_1

На рис 1 и 2 использованы следующие обозначения: 1 – график $2f_1$, Гц; 2 – график мгновенных значений линейного напряжения на выходе синус-фильтра.

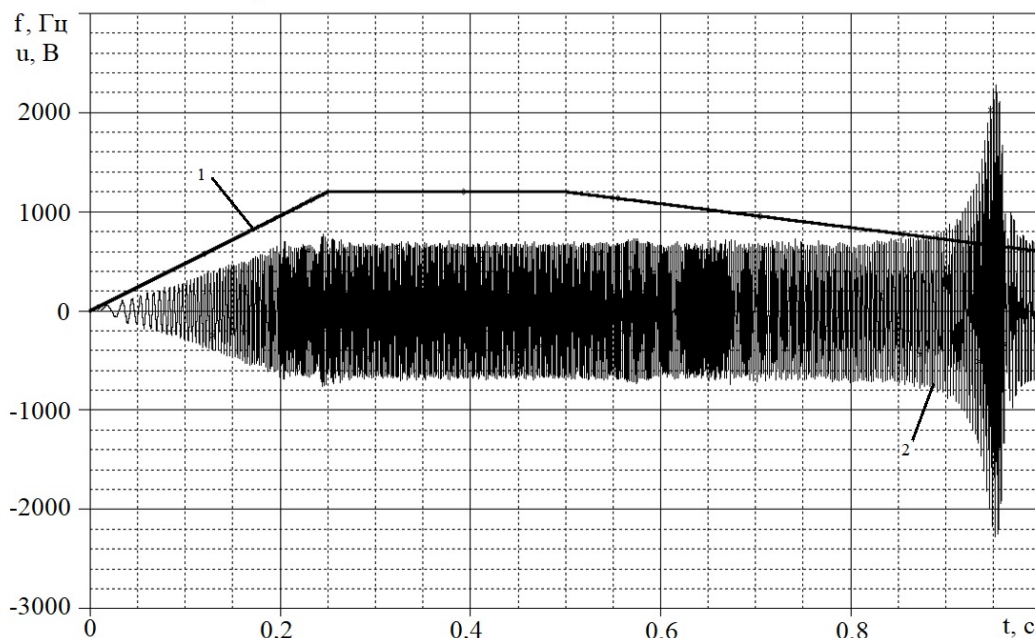


Рисунок 2 – Результаты моделирования выходного напряжения синус-фильтра в режиме холостого хода при разных f_1 . Резонанс напряжения за счет увеличения L выведен ниже рабочего диапазона f_1

Выбор компонентов синус-фильтра.

1. Выбор дросселя (индуктивности синус-фильтра) можно осуществлять из номенклатуры готовых изделий типа моторных дросселей. Они предназначены для включения на выходе ПЧ, поэтому их конструкция учитывает присутствие широкого спектра гармонических составляющих напряжения и дополнительный нагрев ввиду несинусоидальности токов, изоляция обладает стойкостью к быстрому циклическому изменению напряжения. В случае отсутствия моторных дросселей на повышенную частоту напряжения, возможно использование изделий, рассчитанных на номинальную $f_1 = 50...60$ Гц, но рекомендуется с целью улучшения охлаждения выбирать дроссель на номинал действующего значения тока на ступень больший, чем расчетный. Следует учитывать толщину скин-слоя материала обмотки дросселя при повышенных частотах f_1 для выбора рационального сечения элементарных проводников обмотки. Рекомендуется использовать для намотки проводники с коронистой изоляцией класса H по нагревостойкости [8].

2. Для формирования емкости подходят фильтровые конденсаторы переменного тока (*AC filtering capacitors*). Основными характеристиками для выбора конденсаторов служат амплитуда напряжения на конденсаторе и амплитуда тока через конденсатор (эти напряжение и ток растут с увеличением нагрузки). В случае несинусоидальных сигналов амплитудные значения могут отличаться от действующих не в $\sqrt{2}$, а в большее количество раз. Для корректного определения этих величин нужны данные компьютерного моделирования, поскольку ввиду различных фазовых углов временных гармоник сумма их мгновенных значений может давать различающиеся результаты в зависимости от номиналов компонентов фильтра и подключенной к системе электроснабжения нагрузки.

Вывод. Используя вышеописанную процедуру выбора параметров, можно сконструировать синус-фильтр с удовлетворительными характеристиками. Наибольшие трудности вызывает подавление 5-й и 7-й высших временных гармоник напряжения. В некоторых случаях одна из них или обе могут усиливаться в выходном напряжении синус-фильтра по сравнению со входным. Наиболее близкая к синусоиде форма выходного напряжения фильтра достигается в режиме холостого хода. При заданной емкости действующее значение 1-й гармоники тока через емкость синус-фильтра практически не зависит от нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черекбашев Р. Расчет теплового баланса при установке синусоидальных фильтров в шкафы управления с частотными преобразователями / Р. Черекбашев, В. Хаймин // Силовая электроника, 2015. – Т. 3., № 54. – С. 25 – 28.
2. Турпак А.М. Выбор индуктивности и емкости синус-фильтра для вентильных двигателей при питании от ШИМ-инвертора / А.М. Турпак, А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Д.А. Чирков // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике, 2016. – Т. 1. – С. 150 – 153.
3. Пустоветов, М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода / М.Ю. Пустоветов // Известия Томского политехнического университета, 2014. – Т.324, №4. – С. 87 – 95.
4. Пустоветов М.Ю. О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями / М.Ю. Пустоветов // Электричество, 2013. – №5. – С. 41 – 44.
5. Рулевский В.М. Синтез субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата / В.М. Рулевский, В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова // Электротехнические системы и комплексы, 2018. – № 3 (40). – С. 47 – 54.
6. Пустоветов М.Ю. Компьютерное моделирование фильтра du/dt , не содержащего демпфирующих резисторов / М.Ю. Пустоветов // Энергия – XXI век, 2018. – № 3 (103). – С. 46 – 49.

7. ГОСТ Р 55136-2012/IEC/TS 60034-25:2007 Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей. — М. : Стандартинформ, 2014. 62 с.

8. Коробцов А.А. применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / А.А. Коробцов, А.П. Леонов, Ю.П. Похолков, Е.Ю. Солдатенко, А.И. Кочетков // Кабели и провода, 2013. – № 3 (340). – С. 16 – 18.

УДК 681.5.017; 681.5.03.23.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Соколов

Инспектор РГСН, Пенза, Россия, e-mail: sokolov_av_avto@mail.ru

Аннотация. Чувствительные элементы (ЧЭ) и измерительные модули (ИМ) в датчиках физических величин является основными конструктивными и функциональными узлами, определяющими большинство метрологических характеристик датчиков: точность измерения, метрологическую надежность и информативность. В связи с этим, ЧЭ и ИМ подвергаются моделированию, расчету и испытаниям на всех этапах разработки измерительного канала. В статье рассмотрены вопросы моделирования ЧЭ квазидифференциального типа, используемых в емкостных датчиках давлений (ЕДД).

Ключевые слова: емкость, чувствительный элемент, модель, датчик, квазидифференциальный.

MODELING OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SENSITIVE ELEMENTS OF CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

A.V. Sokolov

Inspector RSCS, Penza, Russia, e-mail: sokolov_av_avto@mail.ru

Abstract. Sensitive elements (CE) and measuring modules (MI) in the sensors of physical quantities are the main structural and functional units that determine most of the metrological characteristics of the sensors: measurement accuracy, metrological reliability and information content. In this regard, CHE and IM are subjected to modeling, calculation and testing at all stages of the development of the measuring channel. In the article the questions of modeling Jae quasidifferentiable type used in a capacitive pressure sensor (EDD).

Keywords: capacity, sensor, model, sensor, quasidifferential.

Введение. Из большого разнообразия датчиков физических величин, ЕДД отличаются высокими техническими характеристиками: временной