

Поступила в редакцию 07.12.2021

DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_61

УДК 681.3

**Г.П. Муссонов, Д.С. Федосов,
И.Н. Просекин, П.А. Никонова**

ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ И НАСЫЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

Рассматривается способ борьбы с дребезгом контактов коммутационной аппаратуры с электромагнитным приводом, работающей на переменном токе. Исследован состав высших гармонических составляющих и подтверждена возможность уменьшения дребезга контактов путем насыщения электротехнической стали магнитопровода. Приведены составляющие экономической эффективности.

Ключевые слова: гармонические составляющие, дребезг контактов, качество электроэнергии, режим насыщения электротехнической стали.

I. Введение

В [1] приведены результаты испытания токового реле РТ-40 с уменьшенным сечением магнитопровода, которое сделано с целью ускорения насыщения электротехнической стали и последующего исключения вибрации его подвижной системы. Уменьшение сечения магнитопровода выполнялось путем высверливания отверстий диаметром 10 мм на нескольких образцах реле. Результаты испытаний позволили сделать следующие выводы:

- 1) при погрешностях трансформаторов тока, от которых запитывались образцы, до 60 % и кратности вторичного тока по отношению к току уставки реле, достигающей 15,5 раз, все испытываемые образцы четко замыкали контакты и держали их замкнутыми;
- 2) по сравнению с реле серийного исполнения размах колебаний подвижной системы у образцов снижался в 2-3 раза.

В результате реле типа РТ-40 работают в режиме насыщения электротехнической стали в магнитопроводе реле. Для этого в магнитопроводе реле имеется глубокий вырез, который не виден снаружи, будучи закрыт катушкой реле. Данный вырез уменьшает сечение магнитопровода, что приводит к появлению высших гармонических составляющих и позволяет уменьшить вибрацию якоря реле, т.е., уменьшить дребезг контактов.

II. Состояние вопроса

В релейной защите магнитопроводы трансформаторов, встроенных в реле, например, в реле серии РП и РВМ, часто спроектированы и работают в режиме насыщения электротехнической стали. В нормальном режиме, т.е., когда токи нагрузки не превышают номинальное значение, трансформаторы реле работают на линейном участке вольтамперной характеристики. При аварийных токах (превышающих номинальное значение в 10-15 раз и более) трансформаторы переходят в режим насыщения магнитопровода. Этот эффект применяется для ограничения напряжения (тока) во вторичной обмотке трансформатора, от которой запитаны внутренние цепи реле: выпрямительные мосты, обмотки реле, конденсаторы и резисторы, используемые в качестве фильтра гармонических составляющих.

Особенностью всех типов электромеханических реле является необходимость постоянного ухода в эксплуатации за подвижными частями (очистка от пыли и грязи, смазка, проверка параметров срабатывания и возврата и др.). Это является их недостатком, но одновременно обеспечивает надежность работы релейной защиты, что вместе с низкой стоимостью и простотой исправления неисправностей, позволяет достичь хорошей ремонтпригодности. Электромеханические реле находятся в эксплуатации уже третий век: релейная защита уже была на линии переменного тока, построенной Н.О. Доливо-Добровольским в 1887-1888 гг. В настоящее время реле такого типа производятся на новой элементной базе [2].

Алгоритм релейной защиты, построенной на базе микропроцессоров, представляет собой программу, написанную в некоторой среде программирования. Эта программа реализует логику релейной защиты, т.е., если текущие значения контролируемого параметра превышает значение уставки, то выдает сигнал на срабатывание цепочки электромеханических реле, которые отключают защищаемый электроэнергетический объект. Таким образом, исполнительными элементами микропроцессорной релейной защиты также являются электромеханические реле.

У микропроцессорной релейной защиты есть существенные недостатки. Во-первых, по стоимости, приобретения, установки, наладки и ремонтпригодности пока это самая дорогая элементная база релейной защиты. Во-вторых, ее производители не раскрывают программный код и логику электронных схем (своего рода «ноу-хау»), хотя алгоритмы всех релейных защит опубликованы еще в прошлом веке и изменилась только элементная база их реализации. Поэтому есть ненулевая вероятность того, что после окончания гарантийного срока включается таймер, который через установленный или случайный промежуток времени отключит защиту и выдаст сигнал о ее неисправности. Производителей можно понять: их

продукции нужен постоянный рынок сбыта, а за время гарантийного срока появится более новый вариант этой защиты. Критике микропроцессорной релейной защиты посвящен ряд публикаций [2-8].

III. Решение задачи

В [1] не приведен гармонический анализ цепи, в которой расположены обмотки реле серии РТ-40. Результаты гармонического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Гармонический состав электрического сигнала в реле РТ-40

Номер гармонической составляющей	1	3	5	7	9	11	13
Амплитуда сигнала, мВ	250	16	6	13	7	8	9

Из табл. 1 видно, что в цепи есть гармонические составляющие только с нечетными номерами. Причем уровень максимального из них не превышает 6,4 % от основной гармонической составляющей.

График суммы всех высших гармонических составляющих приведен на рис. 1. По оси абсцисс на всех рисунках отложены радианы, по оси ординат – милливольты. Из графика видно, что при пересечении оси абсцисс кривая имеет линейный характер. Этот участок, при сложении с основной гармонической составляющей, изменит основную гармоническую составляющую так, что она получит выпуклость в этом месте. Это видно на рис. 2, где изображена сумма всех гармонических составляющих, включая первую.

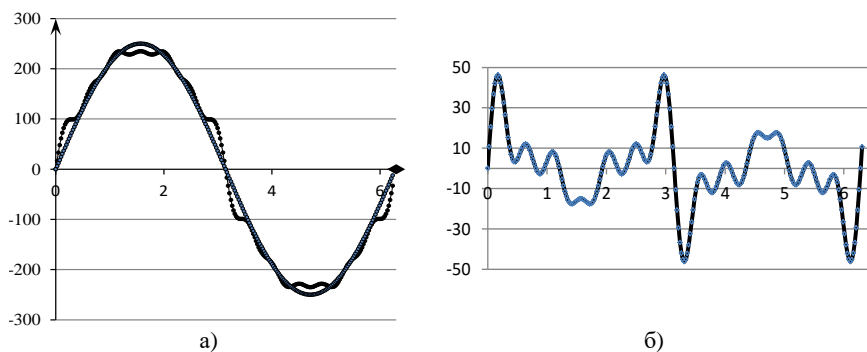


Рис. 1. Сумма всех гармонических составляющих напряжения: сумма высших гармонических составляющих с основной гармоникой (а); сумма высших гармонических составляющих без основной гармоники (б)

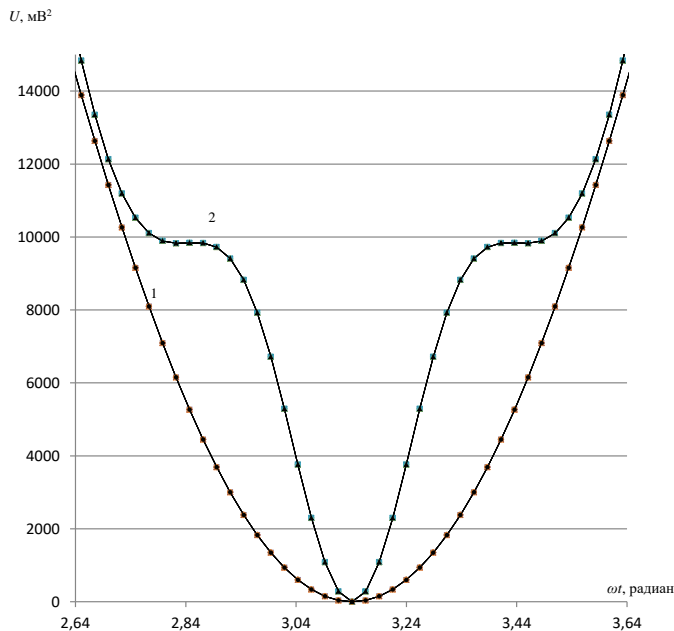


Рис. 2. Участок сигнала для электромагнитных моментов

Якорь реле движется к магнитопроводу под действием электромагнитного момента, который пропорционален квадрату сигнала в цепи, преодолевая механический момент, создаваемой пружиной, которая закручивается или ослабляется при изменении уставок. Данные о составе гармонических составляющих прибор выдает в милливольтгах. Учитывая, что в процессе измерения внутреннее сопротивление реле не меняется и равно 0,22 Ом, не имеет смысла результаты измерения переводить в токи.

Участок кривой изображен на рис. 2 для моментов, где цифрой 1 обозначен момент для реле, у которого магнитопровод не насыщен, а цифрой 2 обозначен момент, создаваемый суммой гармонических составляющих. Значения механического момента во всем диапазоне уставок находятся в области, где получилась выпуклость на рис. 2.

Исследовался диапазон изменения механического момента для следующих восьми значений: 8820, 7918, 6717, 5287, 3758, 2296, 1083, 280. В этом диапазоне видно, что кривая 2 для суммы гармонических составляющих значительно уже, чем кривая 1 для основной гармоники. Это означает, что время, в течение которого механический момент превышает электромагнитный момент, значительно меньше, и, следовательно, дребезг контактов тоже меньше.

Квадрат суммы нечетных гармонических составляющих с 1-й по 13-ю, представленный на рис. 2 кривой 2, описывается выражением:

$$\left(\sum_{i=1}^{n=13} u_i\right)^2 = \sum_{i=1}^{n=13} u_i^2 + 2 \cdot \left(\sum_{i=3}^{n=13} u_1 \cdot u_i + \sum_{i=5}^{n=13} u_3 \cdot u_i + \sum_{i=7}^{n=13} u_5 \cdot u_i + \sum_{i=9}^{n=13} u_7 \cdot u_i + \sum_{i=11}^{n=13} u_9 \cdot u_i + u_{11} \cdot u_{13}\right),$$

где n – порядковый номер нечетных гармонических составляющих; u_i – величина сигнала n -ой гармонической составляющей, мВ.

Для упрощения вычисления этого выражения кривую 2 справа и слева окрестности числа π аппроксимировали методом наименьших квадратов [9-11] отрезками прямых линий. Слева от числа π выражение для значений по оси ординат Y от текущего значения радиан X имеет вид $Y = 164402 - 52746 \cdot X$, а справа – $Y = 164402 + 52746 \cdot X$.

IV. Результаты исследования

Результаты вычислений сведены в табл. 2, из которой видно, что точность аппроксимации невелика. Время превышения механического момента пропорционально длинам отрезков в радианной мере между ветвями соответствующей кривой.

Таблица 2.

Сравнение диапазонов превышения механических моментов

Значение по оси ординат, мВ ²	Диапазон в радианах			Отношение диапазонов
	кривая 2, аппроксимация	кривая 2, точное значение	кривая 1	
8821	0,1095	0,1095	0,3927	3,59
7919	0,0895	0,0895	0,3436	3,84
6717	0,0792	0,0792	0,2945	3,72
5287	0,0760	0,0760	0,2454	3,23
3758	0,0760	0,0760	0,1963	2,58
2297	0,0738	0,0738	0,1473	2,00
1084	0,0635	0,0635	0,0982	1,55
281	0,0401	0,0401	0,0491	1,22

Из последней колонки табл. 2 видно, что размах колебаний подвижной системы у образцов с насыщением электротехнической стали магнитопровода, снижался в 2-3 раза, следовательно, результаты, приведенные в [1], соответствуют действительности.

V. Заключение

Уменьшение дребезга контактов, рассмотренное выше, имеет место и для другой коммутирующей аппаратуры, где в качестве привода исполь-

зуется электромагнитная система. Например, основная доля потребляемой магнитным пускателем мощности приходится на электромагнитную систему. Часть этой мощности расходуется на потери в короткозамкнутых витках, устанавливаемых на сердечниках системы для устранения вибрации якоря после срабатывания контакторов, пускателей и реле.

Согласно [12], в эксплуатации уже находится несколько миллионов пускателей и контакторов, число их постоянно растет. Утверждается, что суммарная мощность, потребляемая электромагнитными системами контакторов, пускателей и реле, в год составляет несколько миллионов киловатт-часов. Таким образом, уменьшение потребления мощности магнитными системами контакторов, пускателей и реле имеет серьезную экономическую составляющую. Кроме того, экономический эффект появляется за счет экономии меди для короткозамкнутых витков, электротехнической стали из-за уменьшения сечения магнитопровода, а также за счет упрощения технологии изготовления, так как не нужно фрезеровать пазы для короткозамкнутых витков и изготавливать эти витки.

Срабатывания реле происходят при аварийных режимах, когда о качестве электроэнергии и так говорить не приходится. В нормальном режиме работы обмотки реле запитаны через понижающий трансформатор, который в силу своей индуктивности обладает высоким индуктивным сопротивлением и поглощает милливольты высших гармонических составляющих. Аналогичная ситуация с магнитными пускателями, которые в основном включают двигатели, а двигатели являются индуктивным сопротивлением цепи и также поглощают милливольты высших гармонических составляющих.

© Муссонов Г.П., 2020

© Федосов Д.С., 2020

© Просекин И.Н., 2020

© Никонова П.А., 2020

Библиографический список

- [1] Жданов Л.С., Овчинников В.В. Электромагнитные реле тока и напряжения РТ и РН // Библиотека электромонтера. Вып. 526. М.: Энергоиздат, 1981. – 72 с.
- [2] Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новые проблемы // Новости Электротехники. 2005. №6 (36).
- [3] Гуревич В.И. Еще раз о надежности микропроцессорных устройств релейной защиты // Электротехнический рынок. 2009. № 3 (28). С. 40-45.
- [4] Гуревич В.И. Актуальные проблемы релейной защиты: альтернативный взгляд // Вести в электроэнергетике. 2010. № 3. С. 30-43.
- [5] Гуревич В.И. Как не нужно оценивать надежность микропроцессорных устройств релейной защиты // Вести в электроэнергетике. 2010. № 5. С. 27-30.
- [6] Гуревич В.И. «Интеллектуализация» релейной защиты: благие намерения или дорога в ад? // Электрические сети и системы. 2010. № 5. С. 63-67.
- [7] Гуревич В.И. Как не нужно оценивать надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: продолжение дискуссии // Вести в электроэнергетике. 2011. № 1. С. 48-49.
- [8] Гуревич В.И. Для оценки надежности микропроцессорных устройств релейной защиты нужен новый критерий // Электротехнический рынок. 2011. № 5-6 (42). С. 66-70.
- [9] Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
- [10] Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений. М.: Недра, 1983. – 223 с.
- [11] Дринфельд Г.И. Интерполирование и способ наименьших квадратов. К.: Вища школа, 1984. – 103 с.
- [12] Ермолаев И.Н. Магнитные пускатели переменного тока // Библиотека электромонтера. Вып. 43. М.–Л., Госэнергоиздат. 1961. – 64 с.

G.P. Mussonov, D.S. Fedosov, I.N. Prosekin, P.A. Nikonova

HARMONIC COMPONENTS AND SATURATION OF ELECTRICAL STEEL

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. The paper considers a method of dealing with contact bounce of switching equipment with an electromagnetic drive, which operates in alternating current. The composition of higher harmonic components has been investigated and the possibility of reducing contact bounce by saturating the electrical steel of the magnetic circuit has been confirmed. The economic efficiency is given.

Keywords: contact bounce, harmonic components, power quality, saturation of electrical steel.

References

- [1] L.S. Zhdanov and V.V. Ovchinnikov, “Elektromagnitnye rele toka i napryazheniya RT i RN [Electromagnetic current and voltage relays RT and RN]”, *Biblioteka elektromontera [Electrician's library]*, Vol. 526. Moscow: Energoizdat, 1981 (in Russian).
- [2] V.I. Gurevich, “Mikroprotsessornyye rele zashchity. Novyye perspektivy ili novyye problemy [Microprocessor relay protection. New perspectives or new problems]”, *The News of Electrical Engineering*, №6 (36), 2005 (in Russian).
- [3] V.I. Gurevich, “Yeshcho raz o nadozhnosti mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity. [Once again on the reliability of microprocessor relay protection devices]”, *Elektrotekhnicheskij ryok [Electrotechnical market]*, № 3 (28), pp. 40-45, May-June 2009 (in Russian).
- [4] V.I. Gurevich, “Aktual'nyye problemy releynoy zashchity: al'ternativnyy vzglyad. [Actual problems of relay protection: an alternative view]”, *Electric Power News*, № 3, pp. 30-43, 2010 (in Russian).
- [5] V.I. Gurevich, “Kak ne nuzhno otsenivat' nadozhnost' mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity. [How it is not necessary to assess the reliability of microprocessor-based relay protection devices]”, *Electric Power News*, № 5, pp. 27-30, 2010 (in Russian).
- [6] V.I. Gurevich, “«Intel'tekualizatsiya» releynoy zashchity: blagiye namereniya ili doroga v ad? [“Intellectualization” of relay protection: good intentions or the road to hell?]”, *Elektricheskie seti i sistemy [Electrical networks and systems]*, № 5, pp. 63-67, 2010 (in Russian).
- [7] V.I. Gurevich, “Kak ne nuzhno otsenivat' nadozhnost' mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity: prodolzheniye diskussii. [How it is not necessary to assess the reliability of microprocessor relay protection devices: continuation of the discussion.]”, *Electric Power News*, № 1, pp. 48-49, 2011 (in Russian).
- [8] V.I. Gurevich, “Dlya otsenki nadozhnosti mikroprotsessornykh ustroystv releynoy zashchity nuzhen novyy kriteriy. [To assess the reliability of microprocessor-based relay protection devices, a new criterion is needed.]”, *Elektrotekhnicheskij ryok [Electrotechnical market]*, № 5-6 (42), pp. 66-70, Nov.-Dec. 2011 (in Russian).
- [9] Y.V. Linnik, *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [The method of least squares and the foundations of the mathematical-statistical theory of observation processing]*. Moscow: Fizmatgiz, 1958 (in Russian).
- [10] V.D. Bolshakov, *Teoriya oshibok nablyudeniy [Theory of observation errors]*, Moscow: Nedra, 1983 (in Russian).
- [11] G.I. Drinfeld, *Interpolirovanie i sposob naimen'shikh kvadratov [Interpolation and the method of least squares]*. Kiev: Vischa shk, 1984.
- [12] I.N. Ermolaev, “Magnitnyye puskateli peremennogo toka [Magnetic starters of alternating currents]”, *Biblioteka elektromontera [Electrician's library]*, vol. 43. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1961 (in Russian).