

УДК 621.313.04

УНИФИЦИРОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИГНАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ ОБМОТОК СТАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Полоневич П.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Суходолов Ю.В.

Одним из важнейших свойств, влияющих на качество электрической машины, является ее надежность. Повышение надежности дает больший народнохозяйственный эффект, чем улучшение других технико-экономических показателей, таких как КПД, коэффициент мощности и др. Среди дефектов асинхронных двигателей, существенно снижающих их надежность, особое место занимают межвитковые замыкания в обмотках статоров, на долю которых приходится до 90% от общего количества отказов. Применяемый в приборах визуальный способ сравнения формы сигнала не эффективен из-за невозможности обеспечения автоматизации и достоверности контроля. Аналого-цифровая обработка сигнала, заключающаяся в сравнении форм с помощью микропроцессора, не имеет преимуществ по чувствительности. Чувствительность этих средств не превышает 3-4 витка на обмотку. Вместе с тем наличие даже одного короткозамкнутого витка, не выявленного при проведении заводских испытаний, приводит к тому, что в процессе эксплуатации электродвигателя в таком витке протекает значительный ток, который вызывает существенный нагрев провода замкнутого витка, а также рядом с ним расположенных витков обмотки. Следствием постепенного высыхания изоляции провода является повреждение фазной обмотки и, следовательно, выход из строя электродвигателя.

Один из путей увеличения чувствительности к наиболее трудно определяемому дефекту (витковому замыканию) и обеспечения возможности автоматизации заключается в представлении снимаемого сигнала в виде унифицированного – импульсной последовательности стандартной формы. При этом в качестве информативных параметров, сохраняемых в унифицированном сигнале, наиболее приемлемы временные параметры снимаемого сигнала, так как добиться стабильности амплитуды испытательного сигнала практически невозможно или это сопряжено с усложнением диагностической аппаратуры. Применение резонансных схем контроля предопределяет получение снимаемого сигнала в виде затухающих колебаний, интервалы которых между точками перехода через ноль изменяются при возникновении дефекта.

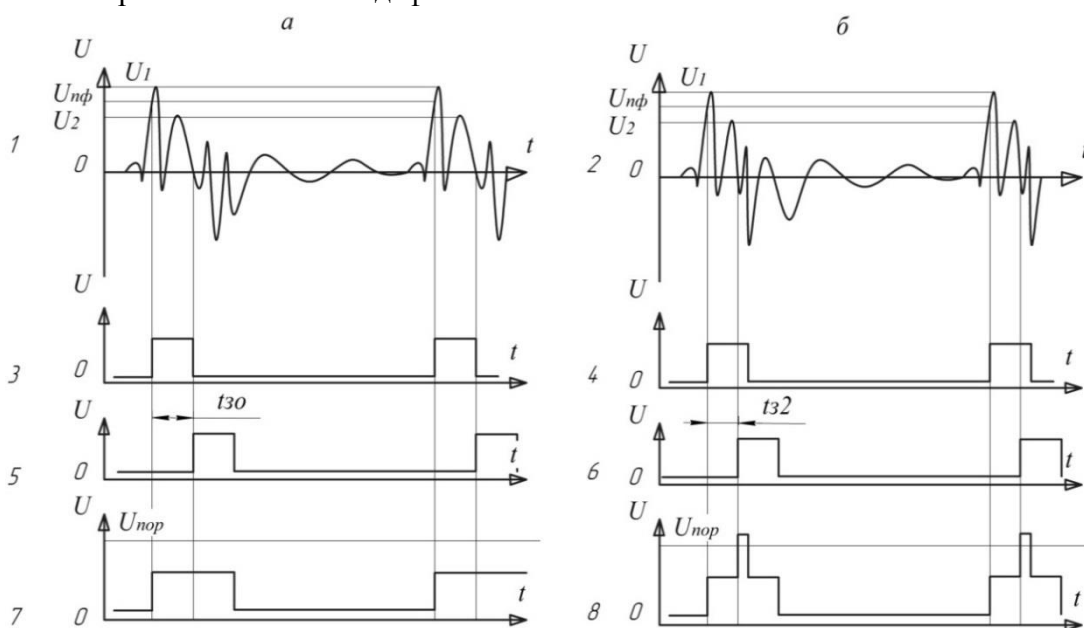


Рисунок 1 – временные диаграммы для исправной обмотки (а) и для обмотки с витковым замыканием (б)

Унификация выходного сигнала будет заключаться в формировании прямоугольных импульсов в моменты перехода через ноль затухающего колебательного процесса. Испытательный импульсный сигнал подается на вывод обмотки и корпус магнитопровода. Фронтом импульса возбуждаются высокочастотные затухающие колебания, протекающие с двумя частотами: сначала с частотой f_2 , а далее до затухания с f_1 . Эти частоты соответствуют частотам первого и второго максимума амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) обмотки. Наибольшей величиной обладает амплитуда U_1 положительной полуволны колебательного процесса с частотой f_2 , вторая положительная полуволна имеет меньшую амплитуду U_2 , амплитуды всех остальных полуволн убывают по экспоненциальному закону. Пороговое напряжение устанавливается в соответствии с условием $U_1 > U_{нф} > U_2$ (рис.1). Формирование унифицированного сигнала (импульсной последовательности) из снимаемого затухающего колебания происходит в момент его возбуждения и второго перехода через нулевое значение. При достижении первой полуволны колебательного процесса пороговой величины $U_{нф}$ генерируется единственный импульс за период (рис.1 диаграммы 3,4). Выделяется первая точка перехода через ноль колебательного процесса частоты f_1 и формируется второй импульс (рис.1 диаграммы 5,6). Эту импульсную последовательность можно представить, как суперпозицию (рис.1 диаграммы 7,8) двух импульсных последовательностей, вторая из которых задержана по времени на t_3 , тогда амплитуда n -й составляющей спектра суперпозиции определяется как

$$U_n = \frac{4E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega\tau}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|, \tag{1}$$

где E – амплитуда импульсов; n – номер гармонической составляющей; τ – длительность импульсов; ω – частота повторения импульсов; t_3 — время задержки между импульсами.

Выражение (1) показывает возможность определения изменения t_3 , вызванного появлением дефекта, по амплитуде одной из составляющих спектра унифицированной импульсной последовательности. Определение номера гармоники, обладающей минимальной чувствительностью к нестабильности неинформативных параметров E , ω и τ , производится путем анализа частных производных выражения (1).

Приращение амплитуды U_n происходит в результате некоррелированных изменений параметров E , ω , τ и t_3 определяется по величине полного дифференциала

$$\Delta U_{nE\omega\tau t_3} = \frac{dU_n}{dE} \Delta E + \frac{dU_n}{d\omega} \Delta\omega + \frac{dU_n}{d\tau} \Delta\tau + \frac{dU_n}{dt_3} \Delta t_3, \tag{2}$$

где ΔE , $\Delta\omega$, $\Delta\tau$ и Δt_3 - изменения параметров E , ω , τ и t_3 . При этом первые три члена выражения (2) являются абсолютной погрешностью при измерении Δt_3 .

Приравниваем к нулю частные производные и находим экстремумы функции U_n . Значения номера гармоники, соответствующей минимуму чувствительности к приращению E , ω , τ и t_3 , определяем в результате анализа знака вторых производных.

Номера гармоник, амплитуды которых обладают минимальной чувствительностью, следующие:

$$\begin{aligned} n_{E1} &= (2N + 1) \frac{T}{2t_3}; \quad n_{E2} = N \frac{T}{\tau}; \\ n_{\tau 1} &= (2N + 1) \frac{T}{2t_3}; \quad n_{\tau 2} = (2N + 1) \frac{T}{2\tau}; \end{aligned} \tag{3}$$

n_ω удовлетворяет равенству $\frac{\tau}{t_3} = tg \frac{n_\omega \omega \tau}{2} tg \frac{n_\omega \omega t_3}{2}$,

$$n_t = N \frac{T}{\tau}$$

где $T=2\pi/\omega$ – период следования импульсов; $N = 0, 1, 2, \dots$; n_{E1} и n_{E2} , $n_{\tau 1}$ и $n_{\tau 2}$ – первые и вторые номера гармоник с минимальной чувствительностью к E и τ ; n_ω и n_t – номера гармоник с минимальной чувствительностью к ω и t_3 .

Выражения (3) показывают, что несовпадение области минимальна чувствительности Un к Δt_3 с областями минимальной чувствительности ΔE , $\Delta \tau$ и $\Delta \omega$ позволяет добиться высокой чувствительности амплитуд к регистрируемой гармонике к Δt_3 при ее нечувствительности к изменению ΔE и $\Delta \tau$ и значительно снизить влияние $\Delta \omega$. Номер регистрируемой гармонике будет определяться как $n = T/2t_3$. Изменение амплитуды этой гармонике из-за вариаций E , ω , τ может быть зафиксировано как ложная информация о наличии дефекта или, наоборот, об исправности дефектной обмотки, поэтому должно соблюдаться условие превышения относительного увеличения амплитуды выделяемой гармонике при замыкании витка над относительным увеличением этой же гармонике для исправной обмотки при одновременном воздействии дестабилизирующих факторов на E , ω , τ .

$$\frac{\frac{\Delta U_{nД}}{U_{nИ}}}{\frac{\Delta U_{nE\omega\tau}}{U_{nИ}}} = \frac{|\Delta t_{3Д} - \Delta t_{3И}|}{\left| \sigma_E \frac{T}{\pi} ctg \frac{n\omega t_3}{2} + \tau \right| \left| ctg \frac{n\omega \tau}{2} \right| \left| ctg \frac{n\omega t_3}{2} \right| (\sigma_\tau + \sigma_\omega) - t_3 \sigma_\omega} > 1, \tag{4}$$

где $\Delta U_{nД}$ – увеличение амплитуды регистрируемой гармонике при замыкании одного витка; $U_{nИ}$ – амплитуда гармонике, регистрируемая для исправных обмоток, $\Delta t_{3Д}$ и $\Delta t_{3И}$ – изменение времени задержки от замыкания витка и от изменения параметров исправной обмотки, вызванного технологическими факторами, σ_E , σ_τ и σ_ω – относительная нестабильность амплитуды, длительности и частоты следования импульсов унифицированной импульсной последовательности.

Преимущество унифицированного представления выходного сигнала, как показывает выражение (4), очевидно. Так, если номер выделяемой гармонике $n = T/2t_3$, то

$$\frac{\frac{\Delta U_{nД}}{U_{nИ}}}{\frac{\Delta U_{nE\omega\tau}}{U_{nИ}}} = \frac{|\Delta t_{3Д} - \Delta t_{3И}|}{t_3 \sigma_\omega} > 1$$

т.е. на результаты контроля может повлиять только нестабильность частоты следования испытательных импульсов, а обеспечение ее необходимого малого значения не представляет трудности. Относительная нестабильность частоты следования $\sigma_\omega = 10^{-2}$ обеспечивает надежное обнаружение дефекта. Особый интерес представляет способ, где реализуется унифицированный сигнал, у которого $t_3 = \tau$, что позволяет снизить дополнительные погрешности, возникающие при работе прибора в процессе контроля.

Таким образом при наличии дефекта в суммарном сигнале будет присутствовать пик, который будет регистрироваться компаратором. А при регистрации гармонике с частотой $n = T/2t_3$ ее амплитуда будет отличной от нуля, т.к. ноль спектра суперпозиции последовательностей импульсов сместится.

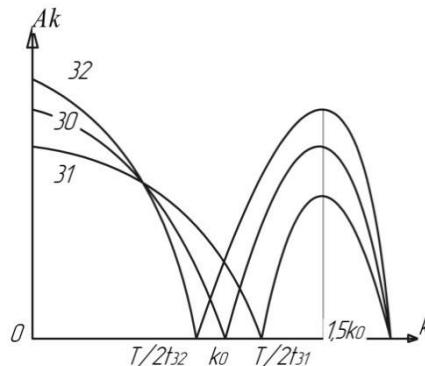


Рисунок 2 – Огибающая амплитудного спектра унифицированного сигнала

Литература

1. Смирнов Н. В. Контроль и испытание обмоток электрических машин и аппаратов. Госэнергоиздат, 1959
2. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Радиотехника, 2009.