



PS2 – Poster-14



Применение гипервекторного изображения параметров переходных процессов при анализе режимов работы ЭЭС

Я.Л. АРЦИШЕВСКИЙ¹, Т.Г. КЛИМОВА¹, Б.К. МАКСИМОВ¹,
А.И. РАСЩЕПЛЯЕВ¹, Д.М. ЖУРАВЛЕВ²
МЭИ (ТУ)¹, ОАО «ВНИИР»²
Россия
rzias@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Переходный процесс, электрическая величина, затухающие колебания, экспонента, двухмерный вектор, четырехмерный гипервектор.

1 ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач при организации процесса измерения электрических параметров режимов работы электроэнергетических систем (ЭЭС) является выбор формы представления результатов измерений, которая позволяет корректно отображать значения измеряемых величин для их наиболее эффективного использования. Развитие технологий цифровой обработки информации, синхронизации и связи дает возможность расширить область применения традиционных для электроэнергетики векторных форм представления измеряемых электрических величин, а также разработать и внедрить новые формы изображения переходных токов и напряжений для решения комплексных задач измерения, мониторинга и анализа переходных режимов работы ЭЭС.

Рассматривается способ графического изображения электрических величин токов и напряжений, измеряемых в условиях переходного режима работы ЭЭС, в виде четырехмерных гипервекторов для случаев, когда они могут быть аналитически представлены в форме комплексных амплитуд с комплексной частотой.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Как известно, использование векторных диаграмм и векторных измерений в электроэнергетике, теории и технике релейной защиты и автоматики энергосистем является общеизвестным и широко используется [1]. Кроме научно-технической и учебно-методической литературы, использование и измерение электрических величин в форме векторов используется в течение многих десятилетий при разработке, монтаже и наладке релейной защиты и автоматики (РЗА). С довоенных времен известны комбинированные вольтметры-амперметры-фазометры (ВДФ) различных поколений, включая современные микропроцессорные исполнения, программное обеспечение цифровых осциллографов, разработки систем контроля на базе векторных измерений [2]. В последние годы за рубежом и в ЭЭС России применяются системы синхронизированных (GPS, ГЛОНАСС) векторных измерений электрических величин (WAMS, СМРП) [3, 4]. Таким образом можно заключить, что использование векторных измерений и векторных диаграмм является важной составляющей частью теории и техники РЗА, мониторинга и управления.

При этом измеряются модули и углы сдвига фаз между электрическими токами и напряжениями. Результаты измерений электрических величин изображаются в виде

совокупности взаимосвязанных векторов в форме векторных диаграмм, при этом в графической форме сопоставляются векторные диаграммы при различных явлениях и событиях в анализируемых электрических цепях, например, при разных видах коротких замыканий [1].

Одним из недостатков традиционной двухмерной векторной формы является невозможность ее использования для адекватного графического представления электрических величин токов и напряжений в условиях переходных процессов, сопровождающихся возникновением нескольких свободных составляющих в измеряемых токах и напряжениях.

Возможным направлением совершенствования современных систем релейной защиты и автоматики энергосистем является скрупулезный учет значений параметров динамических характеристик электромагнитных и электромеханических переходных процессов в энергосистемах. Результаты измерений токов и напряжений в условиях переходных процессов определяются двумя группами факторов:

➤ Первая группа факторов определяется тесной взаимосвязью множества параметров режима работы ЭЭС, и в первую очередь взаимосвязью значений токов в ветвях и напряжений в узлах электрической схемы энергосистемы. Указанные значения параметров режима являются функциями времени $i(t)$, $u(t)$ и формируются в зависимости от ЭДС синхронных генераторов, оснащенных изошренными системами регулирования возбуждения и активной мощности.

➤ Вторая группа факторов определяется набором значений параметров элементов электрической схемы энергосистемы. Значения большинства из них при заданной топологии сети принимаются условно постоянным, однако параметры ряда элементов электрической схемы энергосистемы в течение переходных процессов изменяются (например, FACTS) и их значения следует учитывать как функции времени.

Исследования переходных процессов в энергосистемах являются хорошо разработанной наукоемкой дисциплиной. Известно, что в условиях переходного процесса теоретические расчеты формы кривой электрических токов и напряжений в линейных системах, содержащих резисторы, электрические емкости и индуктивности, могут быть представлены в форме суммы составляющих комплексных амплитуд с комплексной частотой [5].

$$i_{\Sigma}(t) = \text{Im} \left\{ \sum_{k=1}^n \underline{I}_{m,k} \exp \left[t \left(-\frac{1}{T_k} + j\omega_k \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\underline{I}_{m,k} = I_{m,k} \angle \varphi_k$ - комплексная амплитуда k -ой слагающей;

$-\frac{1}{T_k} + j\omega_k = \underline{S}_k = s_k \angle \alpha_{s,k}$ - комплексная частота k -ой слагающей.

Необходимо отметить, что такое аналитическое представление формы кривой электрической величины имеет широкое, но не всеобъемлющее значение. Имеется ряд задач электротехнических расчетов (например, учет нелинейностей, временных задержек и целого ряда других электротехнических явлений), решение которых требует применения иных аналитических выражений, при этом использование комплексных амплитуд с комплексной частотой нецелесообразно.

Таким образом, выявляется следующая актуальная задача: как усовершенствовать общеизвестный метод изображения токов и напряжений в форме комплексных чисел и двухмерных векторов на комплексной плоскости, отображающих амплитуду и начальную фазу, и обеспечить изображение четырехмерных гипервекторов, отображающих не только амплитуду и начальную фазу, но также частоту и постоянную времени затухания переходных токов и напряжений. Требованием к искомому методу изображения является реализация принципа соответствия, при выполнении которого двухмерный вектор должен быть частным случаем четырехмерного вектора при отсутствии затухания.

Для изображения значений электрических величин переходных токов и напряжений, представимых как функции времени в виде (1), была предложена [6] и развита [7-10] гипервекторная диаграмма, которая изображается на гиперплоскости с двумя системами

координат, и представляет собой развитие и обобщение традиционной двухмерной векторной диаграммы.

На рис. 1 представлен метод изображения четырехмерных гипервекторов $\vec{I}$. На рис. 1,а приведена осциллограмма измеренного переходного тока $i_{\Sigma}(t)$, содержащего три составляющие: $i_1(t)$ – синусоидальная составляющая промышленной частоты (314 рад/с), $i_2(t)$ – экспонента и $i_3(t)$ – затухающая синусоидальная составляющая двойной частоты (628 рад/с).

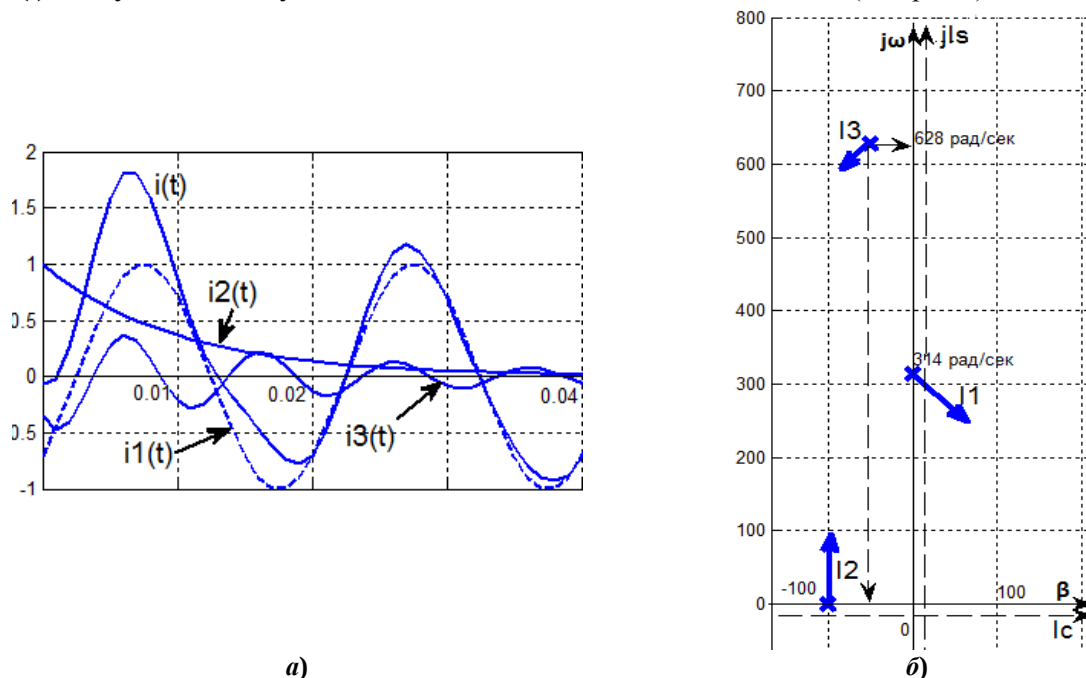


Рис. 1: а – осциллограмма измеренного переходного тока $i_{\Sigma}(t)$ и его составляющих;
б – гипервекторная диаграмма тока составляющих $i_{\Sigma}(t)$

На рис. 1,б приведена гипервекторная диаграмма составляющих $i_{\Sigma}(t)$ на комплексной плоскости с двойной системой координат. Первая система координат комплексной частоты образована:

- ось абсцисс – показатель затухания экспоненциального процесса $1/T$, s^{-1} (действительная часть комплексной частоты);
- ось ординат – круговая частота колебаний ω , рад/с (мнимая часть комплексной частоты).

Вторая система координат комплексной амплитуды совмещена на комплексной плоскости с первой системой координат и образована:

- ось абсцисс – действительная часть комплексной амплитуды;

- ось ординат – мнимая часть комплексной амплитуды, проекция вращающегося против часовой стрелки с частотой ω гипервектора на эту ось соответствует в принятом масштабе текущему мгновенному значению электрической величины $i(t)$. Длина вращающегося вектора экспоненциально убывает с постоянной времени T .

Таким образом, в рассматриваемой двойной системе координат каждый гипервектор является четырехмерным и отображает значения пары комплексных чисел – комплексной амплитуды и комплексной частоты.

Если отображаемый процесс не затухает ($T \rightarrow \infty$), то начало гипервектора располагается в точке ω_i на мнимой оси, при этом длина вращающегося гипервектора не убывает (на рис. 2,б – $\vec{I}_1$). Если отображается экспонента – то начало гипервектора смещается на действительную ось в точку $-1/T$, при этом $\omega=0$ (на рис. 2,б – $\vec{I}_2$), при этом гипервектор не вращается. Если отображаемый процесс является затухающей синусоидой ($1/T < 0$, $\omega > 0$, на рис. 2,б – $\vec{I}_3$), то начало гипервектора располагается во втором квадранте комплексной плоскости и отображает произвольные значения четырех параметров затухающего синусоидального процесса: начальную амплитуду, начальную фазу, частоту и постоянную времени затухания.

Заметим, что значения параметров постоянного тока (напряжения) также находят свое представление в форме гипервектора с началом в нулевой точке комплексной плоскости с координатами $1/T=0$, $\omega=0$. Гипервектор постоянной составляющей не затухает и не вращается.

Рассмотрим изображения переходного тока $i_2(t)$ на рис. 1 подробнее.

Синусоидальная составляющая $i_1(t)$ не затухает, имеет амплитуду $\tilde{I}_1$, начальную фазу $-\varphi_1$ и частоту 314 рад/сек. Осциллограмма составляющей $i_1(t)$ на рис. 1,а и гипервектор $\tilde{I}_1$ находятся во взаимно-однозначном соответствии. Значение $T_1 = \infty$, поэтому начало гипервектора $\tilde{I}_1$ расположено на оси ординат.

Составляющая $i_2(t)$ экспоненциально затухает, на рис. 1,а она имеет начальное значение $\tilde{I}_1 = 1$ кА и постоянную времени затухания $T = 10$ мс. Именно эти значения отображает гипервектор $\tilde{I}_2$ на рис. 1,б. Осциллограмма составляющей $i_2(t)$ на рис. 1,а и гипервектор $\tilde{I}_2$ также находятся во взаимно-однозначном соответствии. Значение $\omega_2=0$, поэтому начало гипервектора $\tilde{I}_2$ расположено на оси абсцисс.

Составляющая $i_3(t)$ является затухающей синусоидой с начальной амплитудой $\tilde{I}_3$ и начальной фазой $-\varphi_3$, частотой $\omega_3 = 628$ рад/сек и постоянной времени затухания $T_3 = 20$ мс. Именно эти значения и отображает гипервектор $\tilde{I}_3$ на рис. 1,б. Осциллограмма $i_3(t)$ на рис. 1,а и гипервектор $\tilde{I}_3$ находятся во взаимно-однозначном соответствии. Значения параметров гипервектора $\tilde{I}_3$ по всем четырем координатам имеют ненулевые значения, поэтому начало гипервектора $\tilde{I}_3$ расположено во втором квадранте комплексной плоскости – там, где располагаются затухающие синусоидальные составляющие.

Приведенная на рис. 1,б гипервекторная диаграмма характеризуется значениями координат трех гипервекторов $\tilde{I}_1$, $\tilde{I}_2$ и $\tilde{I}_3$, которые находятся в взаимно-однозначном соответствии с составляющими переходного тока $i_2(t)$ на интервале времени от 0,00 до 0,04 секунды в соответствии с данными на рис. 1,а. На интервале времени «до» и на интервале времени «после» значения переходного тока могут соответствовать иным гипервекторным диаграммам с другими значениями координат гипервекторов составляющих.

Поэтому, при реализации алгоритмов сжатия данных [10], вместо последовательности мгновенных значений электрических величин используется представление этих величин в форме значений координат гипервекторов и дополнительных служебных данных о времени начала и окончания каждого интервала представления.

Расчетные оценки эффективности сжатия данных цифровых осциллограмм токов и напряжений путем замены последовательности мгновенных значений на значения координат гипервекторов, полученные в [10], характеризуются коэффициентом сжатия от 30 до 100. При этом снижается нагрузка каналов связи и объем архивов при сохранении возможности обратного преобразования в форму цифровой осциллограммы с ограниченной погрешностью.

Анализируя количественные взаимосвязи координат гипервекторов на рис. 1,б можно заметить, что:

- по мере увеличения частоты кратных и некратных гармоник начала гипервекторов соответствующих составляющих будут удалять вверх от оси абсцисс в сторону все больших частот. А по мере уменьшения частоты, для субгармоник – начала гипервекторов соответствующих составляющих будут приближаться к оси абсцисс. В пределе начало гипервектора постоянной и экспоненциальных составляющих окажется на оси абсцисс при $\omega=0$;

- по мере увеличения скорости затухания экспоненциальных составляющих, то есть при $T \rightarrow 0$, начало гипервектора экспоненциально затухающей составляющей будет удаляться от оси ординат влево, в сторону отрицательных значений $-1/T$. А по мере уменьшения скорости затухания, то есть при $T \rightarrow \infty$ начало гипервектора экспоненциально затухающей составляющей будет приближаться к оси ординат и в пределе при отсутствии затухания ($T=\infty$) начало гипервектора окажется на оси ординат.

Для постоянной составляющей с одновременным выполнением двух предельных соотношений $\omega=0$ и $T=\infty$ начало гипервектора располагается в единственной точке начала координат комплексной плоскости, при этом изображение постоянной составляющей на гипервекторной диаграмме отображает знак и значение постоянной составляющей.

Таким образом, переходный ток $i_{\Sigma}(t)$ на рис. 1,а представлен на рис. 1,б тремя гипервекторами $\vec{I}_1$, $\vec{I}_2$ и $\vec{I}_3$, которые своими проекциями на мнимую ось отображают мгновенные значения трех составляющих $i_1(t) + i_2(t) + i_3(t)$. Масштаб электрических токов представлен на рис. 1,б.

Следует заметить, что проектирование векторов на мнимую ось – ось ординат – в соответствии с выражением (1) при изображении синусоидальных электрических величин в форме векторов (гипервекторов) не является единственным вариантом. Альтернативным вариантом, широко используемым в радиотехнической и зарубежной литературе, а также в СМПП, является проектирование векторов на действительную ось – ось абсцисс – при изображении косиноидальных электрических величин в форме векторов (гипервекторов) [8].

Графические преобразования гипервекторов соответствуют следующим линейным операциям:

- сложение (вычитание) комплексных амплитуд гипервекторов при совпадении комплексных частот по правилу параллелограмма, как у общеизвестных векторов;
- умножение (деление) комплексных амплитуд гипервекторов на действительное число, как у общеизвестных векторов;
- дифференцирование гипервекторов путем умножения комплексной амплитуды на комплексную частоту с поворотом начальной фазы на угол комплексной частоты вперед (против часовой стрелки). При этом для незатухающей синусоиды этот угол равен $\pi/2$, как у двумерных векторов. Для экспоненты этот угол равен π (обратное направление), а для затухающей синусоиды от π до $\pi/2$;
- интегрирование гипервекторов путем деления комплексной амплитуды на комплексную частоту с поворотом начальной фазы назад (по часовой стрелке). При этом для незатухающей синусоиды этот угол равен $-\pi/2$, как у двумерных векторов. Для экспоненты этот угол равен $-\pi$ (обратное направление), а для затухающей синусоиды от $-\pi$ до $-\pi/2$.

Перечисленные правила графических преобразований гипервекторов реализуют принцип соответствия, который заключается в совпадении рассмотренных свойств у четырехмерного гипервектора незатухающей синусоиды и общеизвестного вектора синусоидальной величины. Следовательно, общеизвестные векторы синусоидальных величин являются частным случаем четырехмерных гипервекторов.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение гипервекторных диаграмм расширяет возможности для наглядного, образного и информативного изображения токов и напряжений в условиях переходных режимов работы ЭЭС. Четырехмерные гипервекторы могут использоваться:

- для визуального отображения электрических параметров переходного режима [6-8];
- при анализе аварийных осциллограмм [7-9];
- при быстрой передаче цифровых осциллограмм переходных токов и напряжений за счет гипервекторного сжатия данных для их передачи и хранения с коэффициентом сжатия от 30 до 100 [9, 10];
- в учебном процессе при подготовке специалистов-электроэнергетиков [4-10].

Гипервекторные измерения перспективны также при развитии WAMS, WACS и WAPS.

Следует заметить, что в форме гипервекторов могут быть представлены не только переходные электрические токи и напряжения, но и электрические мощности, углы сдвига фаз, механические отклонения, смещения, давления и вообще любые другие непериодические несинусоидальные физические величины, описываемые соответствующим классом дифференциальных уравнений, решения которых представимы в форме комплексных амплитуд с комплексной частотой. При этом верификация моделей энергосистем возможна методом покоординатного сравнения гипервекторных диаграмм реальных и модельных переходных процессов

Статья подготовлена по результатам НИР в рамках Государственного контракта П466 Программы НК-2009-2013 Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с..
- [2] Казанский В.Е., Арцишевский Я.Л., Морозов Л.Н. Комплексное устройство для автоматического контроля электрических параметров высоковольтной установки. Электротехническая промышленность, Серия: Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, вып. 6(15), 1972, №8.
- [3] Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized phasor measurements and their applications, ISBN 978-0-387-76535-8, Springer Science + Business Media, LL.C, 2008.
- [4] Аюев Б.И., Куликов Ю.А. Перспективные направления использования системы мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС, Сборник докладов международной конференции «Релейная защита и автоматика современных энергосистем», 2007.
- [5] Атабеков Г.И., Мамиконянц Л.Г. Применение комплексных схем замещения для расчета переходных процессов, Электричество, 1949, №4, С.67-68
- [6] Арцишевский Я.Л. Гипервекторное представление непериодических несинусоидальных электрических величин, Известия вузов. Электромеханика, 1978, № 8, С. 817-821
- [7] Методика измерений электрических величин в гипервекторной форме/ Б.К. Максимов, Я.Л. Арцишевский, Т.Г. Климова, Д.М. Журавлев и др. // Известия вузов. Электромеханика. Спецвыпуск. Электроснабжение, 2009, С. 38-40.
- [8] Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Расщепляев А.И. Представление переходных процессов электроэнергетических систем на гиперплоскости с двумя системами координат. Электричество, 2011, №4. С. 37-42.
- [9] Максимов Б.К., Климова Т.Г., Журавлев Д.М. Оценка координат гипервекторов переходных процессов в ЭЭС с применением метода Прони. М., Изд-во МЭИ, Вестник МЭИ, № 2, 2010, с.42-46
- [10] Арцишевский Я.Л., Гэ Цюнь. Исследование и разработка алгоритма сжатия аварийной информации для повышения быстродействия информационного обеспечения процесса управления в электроэнергетических системах. Вестник МЭИ. 2009. №1. С. 119-126.