

УДК 621.38

*А. И. Нефедьев, Д. И. Нефедьев***ТОЧНЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ
КОМПАРАТОР НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА И МОЩНОСТИ***A. I. Nefed'ev, D. I. Nefed'ev***ACCURATE THREE-PHASE ELECTRODYNAMIC
COMPARATOR VOLTAGE, CURRENT AND POWER**

А н н о т а ц и я. Электродинамический трехфазный компаратор напряжения, тока и мощности предназначен для эталонных измерений мощности в трехфазных цепях переменного тока в широком диапазоне частот. Электродинамический трехфазный компаратор содержит подвижную систему в виде трех горизонтальных балок, по краям каждой из которых укреплены подвижные электроды электродинамических преобразователей с возможностью регулирования их параметров. Положение балок зарегистрировано с помощью двух фотоэлектрических преобразователей. Равенство напряжений, тока и мощности на переменном и постоянном токах определено с помощью нулевого индикатора.

A b s t r a c t. Electrodynamic three-phase comparator voltage, current and power is intended for reference measurements of power in three-phase circuits of alternating current in a wide frequency range. Electrodynamic three-phase comparator contains a dynamic system in the form of three horizontal beams on the edges of each fortified movable electrodes of electrodynamic to control their settings. The position of the beams is logged using two photovoltaic converters. Equality of voltage, current and power in AC and DC current is determined by using a null indicator.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электродинамический компаратор, напряжение, ток, мощность, преобразователь, независимая поверка, подвижная система, растяжка.

K e y w o r d s: electrodynamics comparator voltage, current, power, frequency Converter, independent verification, mobile system, stretching.

Для проверки и калибровки образцовых счетчиков электроэнергии и мощности в настоящее время выпускаются трехфазные компараторы мощности, применяемые в универсальных и испытательных лабораториях. Примером такого устройства является трехфазный компаратор K2006 фирмы MTE Meter Test Equipment AG (Швейцария), имеющий погрешность 0,01 по току и напряжению [1]. Обработка измерительной информации в этом компараторе основывается на принципе аналого-цифрового преобразования, осуществляемого цифровыми процессорами сигналов. Достоинствами данного компаратора мощности являются возможность управления с помощью компьютера, автоматическое переключение диапазонов измерения, наличие встроенного вычислителя погрешности и графическое отображение векторной диаграммы, недостатком – высокая стоимость.

Для измерения мощности в трехфазных цепях используется измерительный ЭДП мощности Ф5076, входящий в состав установки У1134М. Компаратор преобразователя является двухэлементным измерителем мощности ЭД типа, охваченным обратной отрицательной связью по электромеханическому моменту. Вращающий момент, создаваемый двумя ЭДП, уравновешивается противодействующим моментом, создаваемым преобразователем магнитоэлектрической системы. Все преобразователи находятся на общей оси. Положение преобразовате-

лей в этом компараторе регистрируется с помощью ФЭП [2]. В режиме измерения активной мощности подвижные и неподвижные элементы компарирующих преобразователей включены по схеме двух ваттметров, в режиме преобразователя реактивной мощности – по схеме с искусственной нейтральной точкой.

Недостаток измерительного преобразователя мощности Ф5076 заключается в недостаточной точности и узком частотном диапазоне, что обусловлено большой реактивностью неподвижных и подвижных катушек ЭДКМ.

Среди электромеханических компараторов можно выделить электродинамические компараторы (ЭДК) напряжения, тока и мощности одновременного сравнения ЭД/ЭД, предназначенные для эталонных измерений в однофазных цепях [3–7]. ЭДК содержит подвижную часть в виде горизонтальной балки, по краям которой находятся два электродинамических преобразователя (ЭДП). Каждый ЭДП состоит из одной подвижной катушки, закрепленной на конце горизонтальной балки, и двух неподвижных катушек. Положение подвижной системы регистрируется с помощью двух фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Подвижная часть ЭДК закреплена с помощью системы из четырех растяжек с каждой стороны горизонтальной балки, которые позволяют получить низкий суммарный противодействующий момент, а также снижают воздействие механических помех на подвижную систему.

Погрешность, обусловленная порогом чувствительности однофазного ЭДК, была определена экспериментально, путем сличения его показаний с показаниями электростатического компаратора напряжений [6, 7]. При исследовании погрешности компарирования ЭДК применялись калибратор постоянного напряжения П320, калибратор переменного напряжения 745А и усилитель 746А. При измерении напряжения последовательно с ЭДП подключался шунт coaxиальной конструкции. Измерения проводились при двух полярностях постоянного напряжения.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, показывает, что левый и правый электродинамические преобразователи сохраняют идентичность при переходе с переменного напряжения на постоянное с погрешностью не более 0,01 %.

Таблица 1

Напряжение, В	Погрешность компарирования (%) при частоте (Гц)				
	50 Гц	100 Гц	1000 Гц	10 000 Гц	20 000 Гц
200	0,001	0,001	0,001	– 0,002	– 0,008
300	0,001	0,001	0,001	– 0,002	– 0,008
400	0,001	0,001	0,001	– 0,002	– 0,008
500	0,001	0,001	0,001	– 0,002	– 0,01
600	0,001	0,001	0,001	– 0,002	– 0,01

Погрешность компарирования на частотах 50–1000 Гц не обнаружена. В таблице показана погрешность, обусловленная зоной нечувствительности электродинамического компаратора напряжения.

На основе однофазного ЭДК для повышения точности измерения напряжения, тока и мощности в трехфазных цепях в широком диапазоне измеряемых величин и частот была разработана конструкция трехфазного ЭДК [8], предназначенная для использования при эталонных измерениях в трехфазных цепях в широком диапазоне измеряемых величин и частот.

На рис. 1 изображен в двух проекциях трехфазный ЭДК, который содержит подвижную систему в виде трех балок 1, 2, 3, закрепленных на общей оси 4 параллельно друг другу. На концах балок укреплены подвижные катушки 5, 7, 9 и 6, 8, 10 шести идентичных ЭДП. Неподвижные катушки 11 и 13, 15 и 12, 14 и 16 ЭДП закреплены на основании компаратора.

В трехфазном ЭДК применено устройство для крепления подвижной части электроизмерительных приборов [9], которое содержит растяжки 17–20, попарно расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях и под острым углом одна к другой. С внешней стороны растяжки прикреплены к амортизационным пружинам 21, 22 и 23, 24. Внутренние концы растяжек 17, 18 прикреплены к оси 4, а растяжек 19, 20 – к кольцам 25. Применение данного устройства позволило получить низкий суммарный противодействующий момент растяжек и снизило влияние механических помех на работу трехфазного ЭДК.

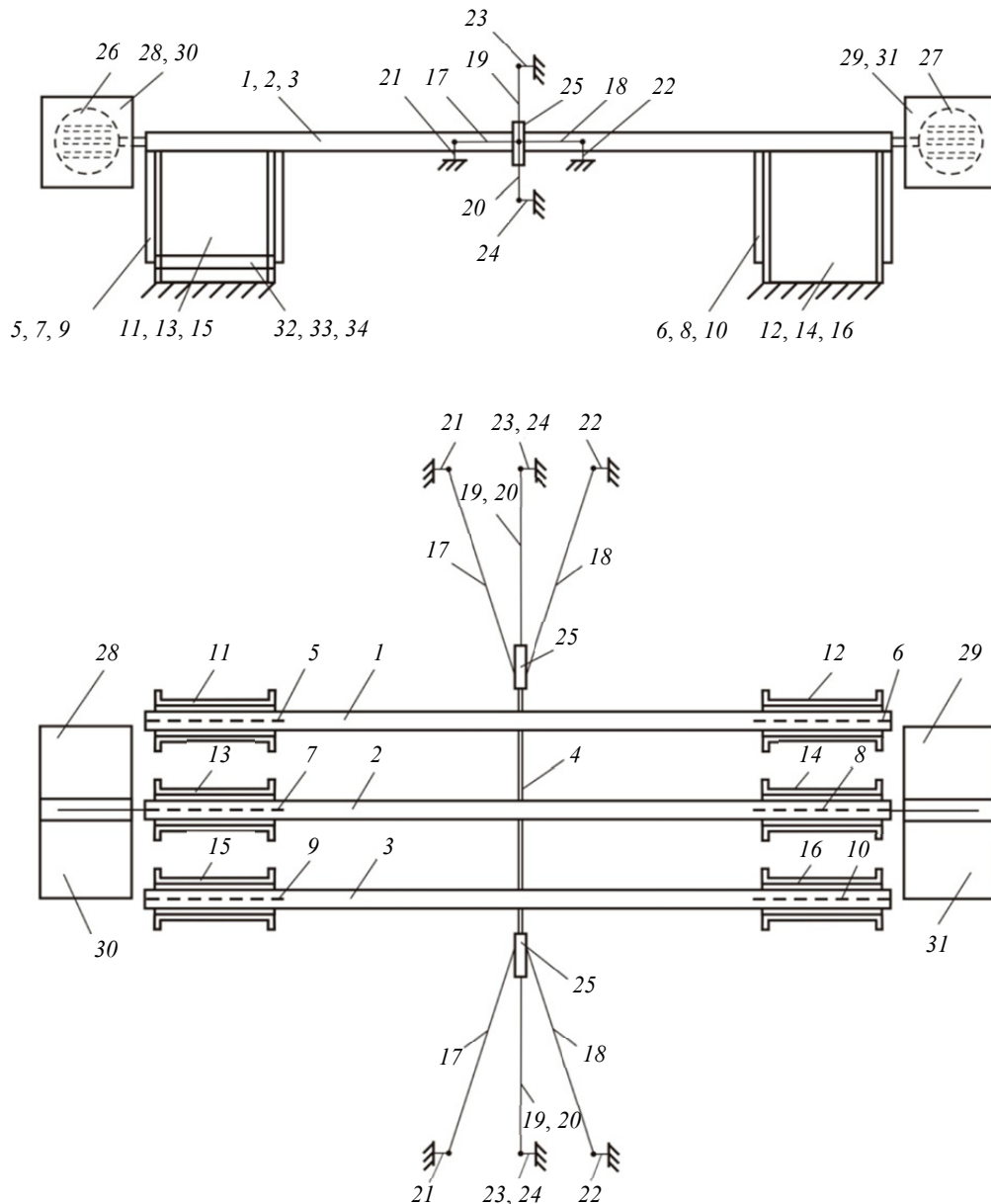


Рис. 1. Трехфазный электродинамический компаратор

Положение подвижной части трехфазного ЭДК регистрируется с помощью двух ФЭП, флажки 26, 27 которых укреплены на концах горизонтальной балки 2. ФЭП также содержат светодиод с конденсатором 28, 29 и измерительные мосты 30, 31. Сигнал с измерительных мостов суммируется, усиливается с помощью усилителя постоянного тока и подается на нулевой индикатор (на рис. 1 не показаны).

Каждый из шести идентичных ЭДП содержит подвижную катушку и неподвижную катушку, симметрично расположенную с двух сторон подвижной катушки. Катушки выполнены плоскими ленточными проводниками. Идентичность характеристик ЭДП регулируется с помощью измерения расстояния между подвижной катушкой и одним витком неподвижной катушки.

Вращающий момент D_0 на постоянном токе с учетом влияния подвижного электрода равен

$$D_0 = I_{1A}I_{2A} \left(\frac{dM_{12A}}{dz} + \frac{dM_{III A}}{dz} \right) l + I_{1B}I_{2B} \left(\frac{dM_{12B}}{dz} + \frac{dM_{III B}}{dz} \right) l + I_{1C}I_{2C} \left(\frac{dM_{12C}}{dz} + \frac{dM_{III C}}{dz} \right),$$

где l – длина коромысла; z – координата движения ЭДП с учетом влияния подвижного проводника; $M_{III A}$, $M_{III B}$, $M_{III C}$ – взаимная индукция между подвижным проводником и подвижной катушкой в фазах A , B и C соответственно, где I_{1A} , I_{1B} , I_{1C} и I_{2A} , I_{2B} , I_{2C} – действующие значения тока в подвижной и неподвижной катушках в фазах A , B и C соответственно.

Среднее значение вращающего момента на переменном токе (D_{cp}) равно

$$D_{cp} = I_{1A}I_{2A} \cos(I_{1A}I_{2A}) \left(\frac{dM_{12A}}{dz} + \frac{dM_{IIIA}}{dz} \right) l + I_{1B}I_{2B} \cos(I_{1B}I_{2B}) \left(\frac{dM_{12B}}{dz} + \frac{dM_{IIIB}}{dz} \right) l + \\ + I_{1C}I_{2C} \cos(I_{1C}I_{2C}) \left(\frac{dM_{12C}}{dz} + \frac{dM_{IIIC}}{dz} \right) l.$$

Поскольку характеристики ЭДП идентичны, выражение вращающего (D_{cp}) и противодействующего (D_0) моментов имеют одинаковый вид:

$$D_{cp} = k_f p_f^2 x^2;$$

$$D_0 = k_0 p_0^2 x_0^2,$$

где k_f и k_0 – коэффициенты преобразования электродинамического преобразователя на переменном и постоянном токах соответственно; p_f и p_0 – коэффициенты преобразования приемного преобразователя на переменном и постоянном токах соответственно, зависящие от значений добавочного резистора или шунта, если таковые имеются; x и x_0 – измеряемая величина на переменном и постоянном токах соответственно.

Если коэффициенты преобразования не зависят от частоты, т.е. $k_f p_f = k_0 p_0$, то при равенстве моментов $D_{cp} = D_0$ получается результат в виде

$$x_0 = x.$$

Поскольку при проведении измерений все характеристики ЭДП одинаковы, а сопротивления коаксиальных шунтов и добавочных резисторов (рис. 2) не зависят от частоты в широких пределах, показания ЭДК на постоянном и переменном токах будут идентичными.



Рис. 2. Добавочные резисторы и шунты коаксиальной конструкции

Для экспериментального определения погрешности компарирования ЭДК методом противопоставления была собрана схема в соответствии с рис. 3. Перед началом работы с помощью механического и электрического корректоров устанавливают горизонтальное положение подвижной системы трехфазного ЭДК, при этом на ЭДП сигналы не подаются. Далее поочередно добиваются идентичности пар ЭДП, находящихся на каждой балке, путем последовательной подачи на них одного и того же значения напряжения, тока или мощности на постоянном или переменном токе и плавного изменения расстояния между витком подвижной катушки и подвижным витком неподвижной катушки одного из преобразователей соответственно. Идентичность ЭДП определяется по нулевому показанию нулевого индикатора при подаче на левые и правые ЭДП одной и той же величины напряжения, тока или мощности. Затем на левые ЭДП подается величина напряжения, тока или мощность на переменном токе, а на правые ЭДП – мощность на постоянном токе, которая регулируется таким образом, чтобы нулевой индикатор показывал нуль. Далее величина напряжения, тока или мощность на постоянном токе измеряется компенсационным методом с применением компенсатора постоянного тока, делителя напряжения и эталонной катушки сопротивления.

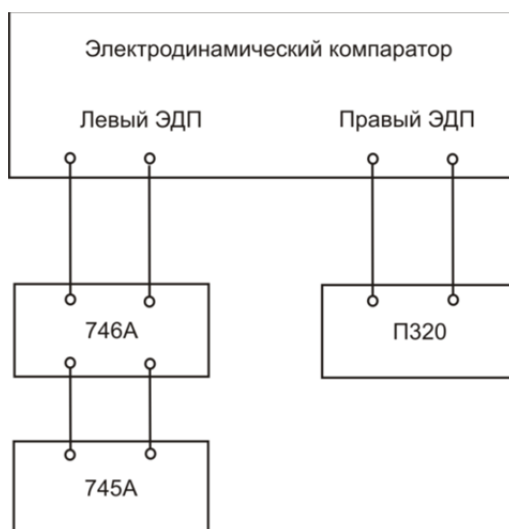


Рис. 3. Схема экспериментального определения погрешности компарирования электродинамического компаратора

Поскольку подвижная система трехфазного ЭДК имеет большую длину и растяжки крепления подвижной системы имеют малый противодействующий момент, это позволяет использовать малое количество витков в каждом из шести ЭДП и, следовательно, получить малую индуктивность подвижных и неподвижных катушек. Таким образом, конструкция предложенного трехфазного ЭДК позволит расширить частотный диапазон и повысить точность измерения напряжения, тока и мощности в трехфазных цепях переменного тока.

Список литературы

1. МТЕ. – URL: http://www.mte.ch/data/files/K_2006_english.pdf
2. Векслер, М. С. Проблемы метрологического обеспечения средств измерений мощности и энергии переменного тока в широком диапазоне частот / М. С. Векслер, М. В. Попов. – М. : Машиностроение, 1983. – С. 33–34.
3. Пат. 2302010 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/00. Электродинамический компаратор напряжения, тока и мощности / Нефедьев А. И. – № 2006104421/28 ; заявл. 15.02.2006 ; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
4. Пат. 2351938 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/00. Электродинамический компаратор напряжения, тока и мощности / Нефедьев А. И. – № 2007143778/28 ; заявл. 26.11.2007 ; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10.
5. Пат. 2414716 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/08. Электродинамический компаратор напряжения, тока и мощности / А. И. Нефедьев. – № 2009143177/28 ; заявл. 23.11.2009 ; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 8.
6. Нефедьев, А. И. Новый метод построения электродинамических компараторов напряжения, тока и мощности / А. И. Нефедьев // Измерительная техника. – 2007. – № 3. – С. 58–60.
7. Nefed'ev, A. I. A new method of constructing electrodynamic voltage, current, and power comparators / A. I. Nefed'ev // Measurement Techniques. – 2007. – Vol. 50, № 3. – С. 325–328.
8. Пат. 2361224 Российская Федерация, МПК G 01 R 17/08. Электродинамический трехфазный компаратор мощности / Нефедьев А. И. – № 2007143813/28 ; заявл. 26.11.2007 ; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19.
9. А. с. 1668997 SU, МПК G 12 B 13/00. Устройство для крепления подвижной части электроизмерительных приборов / И. А. Нефедьев, А. И. Нефедьев. – № 4481079/21 ; заявл. 06.06.88 ; опубл. 07.08.91, Бюл. № 29.

Нефедьев Алексей Иванович

доктор технических наук, доцент,
кафедра электротехники,
Волгоградский государственный
технический университет
E-mail: nefediev@rambler.ru

Nefed'ev Aleksey Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of electrical engineering,
Volgograd State Technical University

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники,
Пензенский государственный университет
E-mail: iit@pnzgu.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical science,
head of sub-department
of information and measuring equipment,
Penza State University

УДК 621.38

Нефедьев, А. И.

Точный трехфазный электродинамический компаратор напряжения, тока и мощности /
А. И. Нефедьев, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. –
№ 3 (9). – С. 10–15.