

УДК 621.314

Колосов Валерій Іванович, канд. техн. наук, технічний директорНауково-виробниче підприємство «Імпульс», м. Запоріжжя, Україна. вул. Радіо 17, м. Запоріжжя, Україна, 69083. тел./факс: (061) 769-77-00, E-mail: kvi@pulse.zp.ua.**Васечко Євген Вікторович**, ведучий інженерНауково-виробниче підприємство «Імпульс», м. Запоріжжя, Україна. вул. Радіо 17, м. Запоріжжя, Україна, 69083. тел./факс: (061) 769-77-00, E-mail: john@pulse.zp.ua.**ВИПРОБУВАННЯ АС-DC / DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В РЕЖИМІ ЦІРКУЛЯЦІЇ ЕНЕРГІЇ**

Досліджено енергозберігаючі можливості трьох структурних схем випробувань двоступеневої АС-DC/DC-AC перетворювальної системи в режимі рециркуляції енергії. Наведено графічні залежності, що дозволяють оцінити потужність споживання від мережі живлення в кожній структурі при відомому значенні ККД перетворювальної системи. На основі найбільш ефективної структури запропонований спосіб визначення ККД, що дозволяє підвищити точність результату, спростити процес вимірювань і використовувати менш точні засоби вимірювання.

Ключові слова: АС-DC/DC-AC перетворювальна система, випробування, циркуляція енергії, ККД, енергозбереження.

Колосов Валерий Иванович, канд. техн. наук, технический директор. Научно-производственное предприятие «Импульс», г. Запорожье, Украина. ул. Радио 17, г. Запорожье, Украина, 69083. тел./факс: (061) 769-77-00, E-mail: kvi@pulse.zp.ua.

Васечко Евгений Викторович, ведущий инженер. Научно-производственное предприятие «Импульс», г. Запорожье, Украина. ул. Радио 17, г. Запорожье, Украина, 69083. тел./факс: (061) 769-77-00, E-mail: john@pulse.zp.ua.

ИСПЫТАНИЯ АС-DC / DC-AC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ЭНЕРГИИ

Исследованы энергосберегающие возможности трёх структурных схем испытаний двухступенчатой АС-DC/DC-AC преобразовательной системы в режиме циркуляции энергии. Приведены графические зависимости, позволяющие оценить мощность потребления от питающей сети в каждой структуре при известном значении КПД преобразовательной системы. На основе наиболее эффективной структуры предложен способ определения КПД, позволяющий повысить точность результата, упростить процесс измерений и использовать менее точные средства измерения.

Ключевые слова: АС-DC/DC-AC преобразовательная система, испытания, циркуляция энергии, КПД, энергосбережение.

Kolosov Valeriy Ivanovich, Cand. Sc. (Eng.), technical director. Research and Manufacturing Corporation «Impulse», Zaporizhyya, Ukraine. Str. Radio, 17, Zaporizhyya, Ukraine, 69083. tel./fax: (061) 769-77-00, E-mail: kvi@pulse.zp.ua.

Vasechko Evgen Viktorovich, chief engineer. Research and Manufacturing Corporation «Impulse», Zaporizhyya, Ukraine. Str. Radio, 17, Zaporizhyya, Ukraine, 69083. tel./fax: (061) 769-77-00, E-mail: john@pulse.zp.ua.

TESTS AC-DC / DC-AC CONVERSION SYSTEM IN RECIRCULATION MODE ENERGY

Energy-saving possibilities of three block diagrams of tests of two-stage AC-DC/DC-AC converting system are investigational in the mode of circulation of energy. Graphic dependences, allowing to estimate power of consumption from a feed-in network in every structure at the known value efficiency inverter system, are resulted. On the basis of the most effective structure the method of determination efficiency is offers, allowing to raise accuracy of result, simplify process of measurements and to use less precise means of measurement.

Key words: AC-DC/DC-AC converting system, tests, circulation of energy, efficiency, energy-saving.

Введение

Двухступенчатые преобразовательные системы, содержащие в своём составе АС-DC и DC-AC преобразователи, составляют основу мощных источников вторичного электропитания таких, как агрегаты бесперебойного электропитания и частотные преобразователи для электропривода.

Традиционно испытания преобразовательных систем с целью определения

энергетических параметров [1] проводятся с использованием питающей сети переменного тока и пассивных нагрузок (рис. 1).

При мощности преобразовательной системы в десятки и сотни киловатт процесс испытаний осложняется тем, что питающая сеть переменного тока и нагрузки, должны быть рассчитаны на полную мощность системы. Учитывая длительность проведения испытаний в различных режимах (24–72 часа) и связанный с этим расход электроэнергии, актуальными становятся энергосберегающие свойства процесса испытаний. Традиционные испытания таким свойством не обладают, поскольку полная мощность преобразовательной системы выделяется в пассивной нагрузке в виде бесполезной тепловой энергии, отвод которой представляет определенные трудности.

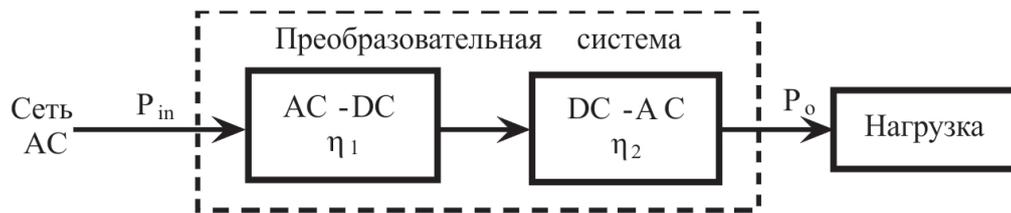


Рис.1. Традиционная схема испытания преобразовательных систем

Одним из основных параметров, который характеризует эффективность процесса преобразования и определяется при испытаниях системы, является КПД. Возможности традиционной структуры испытаний (рис. 1) в отношении повышения точности определения этого параметра ограничены характеристиками применяемых средств измерений. Вместе с тем, современные требования в отношении повышения эффективности процесса преобразования вызывают необходимость соответствующего повышения точности определения КПД.

Стандартная процедура определения КПД преобразовательной системы состоит в измерении значений активной мощности на входе P_{in} и выходе P_o с последующим вычислением значения по формуле [1]:

$$\eta = P_o / P_{in} \quad (1)$$

Такому способу свойственна низкая точность определения КПД, поскольку, согласно формуле (1), относительная погрешность определения КПД, вызванная относительными погрешностями измерений мощности на входе δ_{P_o} и выходе $\delta_{P_{in}}$, представляет их алгебраическую сумму:

$$\delta_{\eta} = \delta_{P_o} - \delta_{P_{in}} \quad (2)$$

Отсюда максимальная погрешность определения КПД превысит в два раза погрешности измерения мощностей в случае, когда последние в формуле (2) имеют разные знаки при равных значениях $|\delta_{P_o}| = |\delta_{P_{in}}|$. Поэтому применение общепринятого способа определения КПД требует использования высокоточных и дорогостоящих средств измерения мощности переменного тока с погрешностями, не превышающими 0,1 %.

Основной целью данной работы является выбор энергосберегающей структуры для процесса испытаний и её применение для создания структурного способа повышения точности определения КПД преобразовательной системы.

Выбор структуры для испытаний

Одним из подходов, обеспечивающих при испытаниях снижение потребляемой мощности от питающей сети и способствующих энергосбережению, является создание структуры, которая реализует режим циркуляции энергии в преобразовательной системе [2– 5].

Такой режим имеет место при испытаниях преобразовательной системы с использованием, так называемой, электронной нагрузки (АС-АС преобразователь), которая

возвращает энергию в питающую сеть (рис. 2). Здесь замкнутый контур циркуляции энергии образован преобразовательной системой и электронной нагрузкой, выполняющей функцию регулятора мощности. Питающая сеть переменного тока восполняет мощность потерь, возникающих в контуре. Данная структура пригодна для испытаний как однофазных, так и трёхфазных преобразовательных систем.

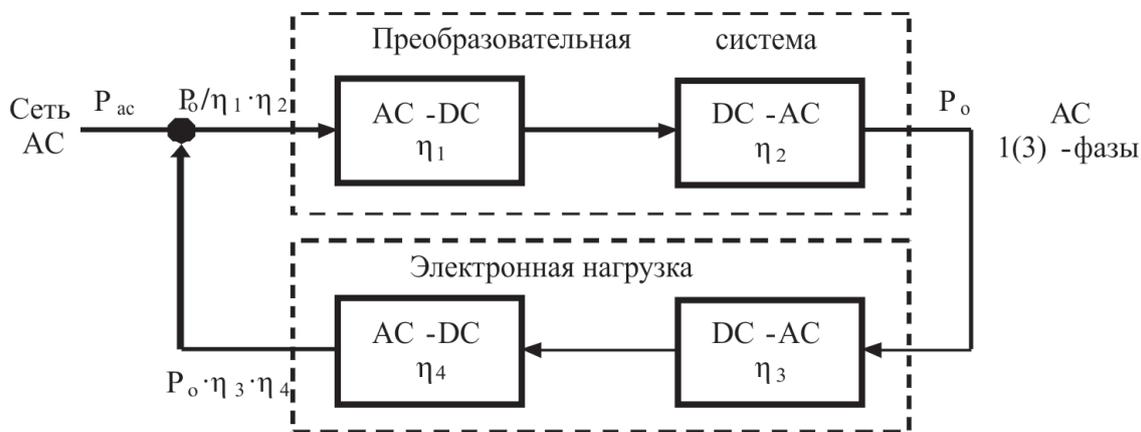


Рис. 2. Схема испытания с использованием электронной нагрузки

Мощность потерь переменного тока ΔP_{ac} в контуре (рис. 2) равна разнице между мощностью на входе испытуемой AC-DC/DC-AC преобразовательной системы и мощностью на выходе электронной нагрузки:

$$\Delta P_{ac} = \frac{P_o}{\eta} - P_o \cdot \eta_{ad} = P_o \frac{1 - \eta \cdot \eta_{el}}{\eta} \quad (3)$$

где $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$ – КПД испытуемой преобразовательной системы;
 $\eta_{el} = \eta_3 \cdot \eta_4$ – КПД электронной нагрузки.

В этой структуре мощность потребления от питающей сети равна мощности потерь в контуре: $P_{ac} = \Delta P_{ac}$.

Учитывая, что электронная нагрузка состоит из аналогичных AC-DC и DC-AC преобразователей, можно условно принять $\eta_{el} = \eta$. Тогда из выражения (3) относительная мощность потребления дополнительной энергии от питающей сети, как показатель энергозатрат данной структуры, определяется:

$$\delta P_{el} = \frac{P_{ac}}{P_o} = \frac{1 - \eta^2}{\eta} \quad (4)$$

Структура (рис. 2) не отличается высокой степенью энергосбережения, поскольку полная мощность преобразовательной системы проходит через электронную нагрузку, вызывая в ней существенные потери мощности.

Лучшие показатели по энергосбережению можно достичь, если замкнутый контур циркуляции энергии составить только из элементов преобразователей системы, то есть из AC-DC и DC-AC, соединенных последовательно. Замкнутость контура обеспечивает взаимную нагрузку этих преобразователей, чем исключается применение тепловыделяющей пассивной нагрузки. В одну из точек соединения преобразователей через регулятор мощности подводится от питающей сети дополнительная электроэнергия, компенсирующая мощность потерь в преобразователях и этим поддерживающая режим циркуляции.

В зависимости от места подведения дополнительной электроэнергии в замкнутый контур возможно формирование двух структур:

- с подведением в цепь протекания переменного тока (рис.3);
- с подведением в цепь протекания постоянного тока (рис.4).

Структура с подведением электроэнергии в цепь протекания переменного тока (рис. 3) отличается от структуры (рис. 2) тем, что через регулятор мощности проходит не вся выходная мощность преобразовательной системы, а только её часть, которая необходима для восполнения потерь. Благодаря этому структура имеет меньшие потери мощности и обладает более высокой степенью энергосбережения.

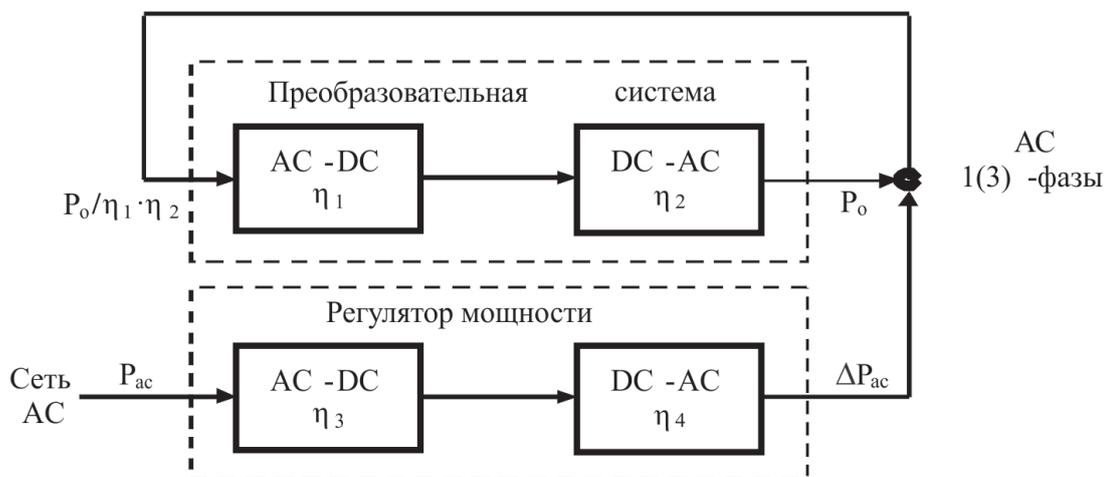


Рис.3. Схема испытания с использованием регулятора мощности на переменном токе

Здесь мощность потерь переменного тока ΔP_{ac} в контуре (рис.3) равна разнице между мощностью на входе и выходе испытуемой АС-DC/DC-АС преобразовательной системы:

$$\Delta P_{ac} = \frac{P_o}{\eta_1 \cdot \eta_2} - P_o = P_o \frac{1 - \eta_1 \cdot \eta_2}{\eta_1 \cdot \eta_2}. \quad (5)$$

Мощность, потребляемая от сети переменного тока для компенсации потерь и поступающая на вход регулятора мощности равна:

$$P_{ac} = \Delta P_{ac} / \eta_3 \cdot \eta_4. \quad (6)$$

Учитывая, что регулятор мощности состоит из аналогичных АС-DC и DC-АС преобразователей, можно условно принять $\eta_3 = \eta_1$; $\eta_4 = \eta_2$. Тогда $\eta_1 \cdot \eta_2 = \eta_3 \cdot \eta_4 = \eta$ и после подстановки выражения (5) в (6) следует зависимость относительной мощности потребления дополнительной энергии от значения КПД преобразовательной системы:

$$\delta P_{ac} = \frac{P_{ac}}{P_o} = \frac{1 - \eta}{\eta^2}. \quad (7)$$

Наиболее высокой степенью энергосбережения обладает структура с подведением электроэнергии в цепь протекания постоянного тока (рис.4). В ней через регулятор мощности также проходит только энергия, необходимая для восполнения потерь в замкнутой преобразовательной системе. Однако регулятор мощности содержит всего одну ступень АС-DC преобразования, что и обуславливает снижение в нем потерь мощности.

Здесь мощность потерь постоянного тока ΔP_{dc} в контуре (рис.4) равна разнице между мощностью на входе DC-АС преобразователя и мощностью на выходе АС-DC преобразователя:

$$\Delta P_{dc} = \frac{P_o}{\eta_2} - P_o \cdot \eta_1 = P_o \frac{1 - \eta_1 \cdot \eta_2}{\eta_2}. \quad (8)$$

Мощность, потребляемая от сети переменного тока и поступающая на вход AC-DC регулятора, равна:

$$P_{ac} = \Delta P_{dc} / \eta_3 . \tag{9}$$

Условно считая, что $\eta_3 = \eta_1$, после подстановки выражения (8) в (9) получим зависимость относительной мощности потребления дополнительной энергии от общего КПД преобразовательной системы:

$$\delta P_{dc} = \frac{P_{ac}}{P_o} = \frac{1 - \eta}{\eta} . \tag{10}$$

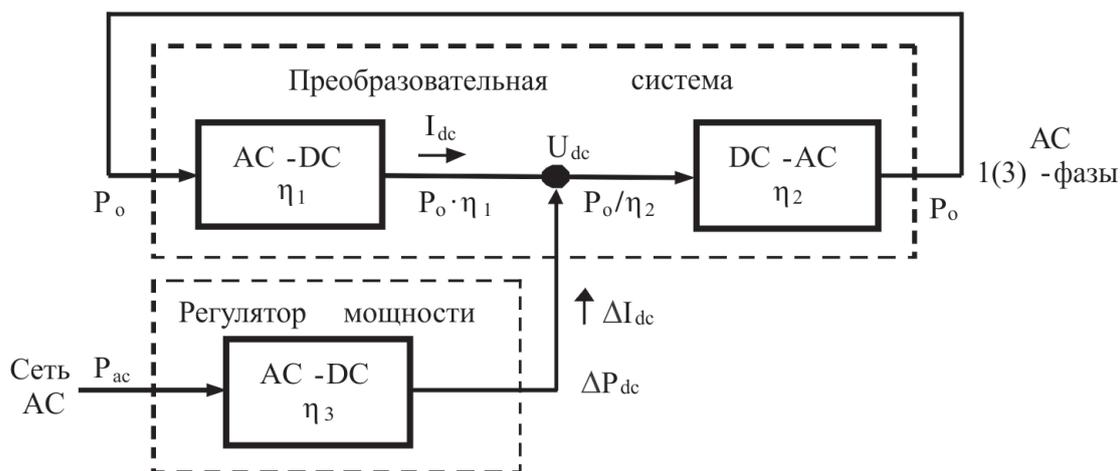


Рис.4. Схема испытания с использованием регулятора мощности на постоянном токе

На рис. 5 приведены графические зависимости по формулам (4),(7),(10), которые позволяют сделать оценку относительной мощности потребления от питающей сети (%) как показателя энергозатрат в структурах на рис. 2–4 при испытаниях преобразовательной системы с известным значением КПД. Как следует из графиков, наименьшими значениями показателя характеризуется структура на рис. 4, для которой при значениях КПД системы в пределах 0,8...0,9 мощность потребления от питающей сети δP_{dc} составляет (11...25) % от выходной мощности преобразовательной системы.

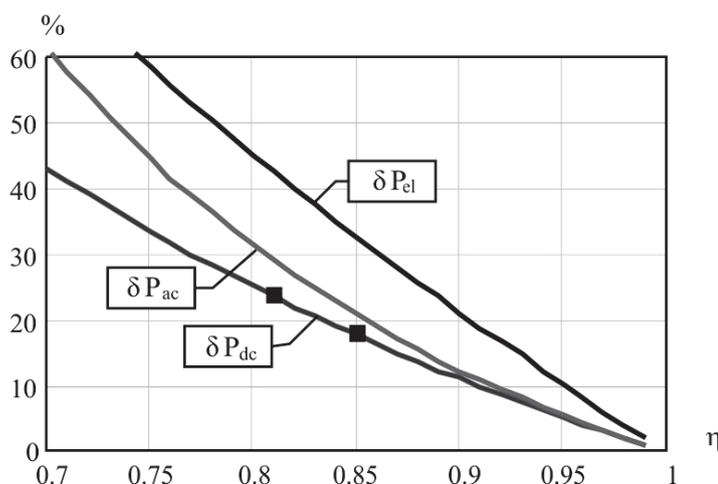


Рис. 5. Зависимость относительной мощности потребления от КПД преобразовательной системы для разных структур:

δP_{el} – с электронной нагрузкой; δP_{ac} – с регулятором мощности на переменном токе; δP_{dc} – с регулятором мощности на постоянном токе

Способ определения КПД

Наиболее эффективная структура для испытания преобразовательной системы (рис. 4) положена в основу нового способа определения её КПД [6].

Представим выражение КПД преобразовательной системы относительно цепи передачи постоянного тока, для чего в формулу (8) подставим значение мощности циркуляции постоянного тока $P_{dc} = P_o \cdot \eta_1$. После подстановки с учетом того, что $\eta_1 \cdot \eta_2 = \eta$, получим:

$$\Delta P_{dc} = P_{dc} \cdot \frac{1 - \eta_1 \cdot \eta_2}{\eta_1 \cdot \eta_2} = P_{dc} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (11)$$

Из последнего выражения (11) находим формулу для определения КПД, выраженную через мощности постоянного тока:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{dc}}{P_{dc}}} \quad (12)$$

Благодаря тому, что постоянный ток ΔI_{dc} от регулятора мощности и постоянный ток I_{dc} циркуляции в контуре соединяются в одной точке с одним и тем же напряжением U_{dc} , отношение мощностей в формуле (12) будет равно отношению токов, т.е. $\Delta P_{dc} / P_{dc} = \Delta I_{dc} / I_{dc}$. Отсюда формула определения КПД преобразовательной системы принимает вид:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta I_{dc}}{I_{dc}}} \quad (13)$$

Таким образом, сущность способа состоит в измерении постоянных токов ΔI_{dc} , I_{dc} (или их отношения) и определении КПД системы путем вычисления по формуле (13). Следует, однако, учитывать, что при определении КПД предложенным способом (рис.4) выходная мощность АС-DC ступени оказывается в $1/\eta_1 \cdot \eta_2$ раз меньше, чем в традиционной структуре (рис.1).

Покажем, что применение предложенного способа определения КПД позволяет повысить точность результата. Зависимость относительного значения погрешности определения КПД $\delta_\eta = \Delta\eta/\eta$ от влияния относительных погрешностей измерения токов $\delta_{\Delta I_{dc}}$, $\delta_{I_{dc}}$, вытекающую из формулы (13), выразим через частные производные [7] в виде выражения:

$$\delta_\eta = \frac{\partial \eta}{\partial (\Delta I_{dc})} \cdot \frac{\Delta I_{dc}}{\eta} \cdot \delta_{\Delta I_{dc}} + \frac{\partial \eta}{\partial I_{dc}} \cdot \frac{I_{dc}}{\eta} \cdot \delta_{I_{dc}} \quad (14)$$

Частные производные выражения (14) по переменным ΔI_{dc} , I_{dc} имеют вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial (\Delta I_{dc})} = - \frac{1}{I_{dc} \cdot \left(1 + \frac{\Delta I_{dc}}{I_{dc}}\right)^2}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial I_{dc}} = \frac{\Delta I_{dc}}{I_{dc}^2 \cdot \left(1 + \frac{\Delta I_{dc}}{I_{dc}}\right)^2}.$$

После подстановки частных производных в выражение (14) получим функцию влияния:

$$\delta_\eta = (1 - \eta) \cdot \left(-\delta_{\Delta I_{dc}} + \delta_{I_{dc}} \right) \quad (15)$$

Как видно из выражения (15), при значениях КПД близких к единице разность $(1 - \eta) \ll 1$, и поэтому влияние относительных погрешностей измерения токов $\delta_{\Delta I_{dc}}$, $\delta_{I_{dc}}$ по сравнению с формулой (2) уменьшается во много раз. Например, для современных преобразовательных систем, в которых КПД достигает значения $\eta = 0,9$, использование предложенного способа

по сравнению с традиционным измерением мощности переменного тока на входе и выходе позволяет снизить погрешность определения КПД в $1 / (1-0,9) = 10$ раз.

Таким образом, предложенный способ определения КПД обеспечивает повышение точности при заданных погрешностях измерения постоянного тока или позволяет использовать менее точные средства измерения тока при заданной погрешности определения КПД.

Кроме того, благодаря отсутствию измерений в цепи переменного тока способ определения КПД имеет расширенную область применения. Он может быть распространён на 3-х фазные и многомодульные преобразовательные системы, выходы которых соединяются по цепям переменного тока. Тем самым упрощается процесс определения КПД и уменьшается количество средств измерений.

Перенос процесса измерения в предложенном способе из цепи переменного тока в цепь протекания постоянного тока позволяет способу быть инвариантным к форме кривой в цепи переменного тока: она может быть в зависимости от типа DC-AC преобразователя синусоидальной, квазисинусоидальной или ступенчатой.

Наконец, средства измерений постоянного тока имеют большую точность по сравнению со средствами измерения мощности переменного тока, а использование одного средства измерения отношения двух постоянных токов $\Delta I_{dc}/I_{dc}$ упрощает процесс измерения и повышает точность определения КПД.

Результаты эксперимента

Для экспериментальной проверки эффективности испытаний по структуре на рис. 4 была использована замкнутая преобразовательная система, состоящая из двух ступеней:

– AC-DC ступень в составе корректора коэффициента мощности и изолированного DC/DC преобразователя с параметрами вход/ выход: 220В-50Гц/120В-40А;

– DC-AC ступень двойного преобразования с входным напряжением 120В и выходным переменным напряжением 220В-50Гц мощностью 5кВт.

В качестве регулятора мощности, восполняющего потери в замкнутом контуре системы, использовался AC/DC преобразователь, аналогичный преобразователю контура.

Результаты экспериментальных испытаний преобразовательной системы приведены в таблице.

Количественные значения показателя энергозатрат, приведенные в таблице, нанесены в виде точек на соответствующем графике рис. 5 и, как видно, близость точек к кривой δP_{dc} подтверждает теоретические результаты.

Таблица

Количественные значения показателя энергозатрат

Выходная мощность системы, Вт	Преобразовательная система			Регулятор мощности	Мощность потребления от сети, Вт	Показатель энергозатрат, %
	AC-DC η_1	DC-AC η_2	AC-DC +DC-AC η	AC-DC η_3		
2500	0,928	0,916	0,85	0,906	452	18,1
4500	0,907	0,893	0,81	0,925	1075	23,9

Выводы

1. Исследованы энергосберегающие возможности трёх структурных схем испытаний AC-DC/DC-AC преобразовательной системы в режиме циркуляции энергии. Наиболее эффективной определена структура с подведением дополнительной энергии в цепь циркуляции постоянного тока, для которой потребление от питающей сети составляет (11...25) % от выходной мощности преобразовательной системы при значениях КПД в пределах 0,8...0,9.

2. На основе наиболее эффективной структуры предложен способ определения КПД, позволяющий повысить точность результата, упростить процесс измерений и использовать менее точные средства измерения.

Список использованной литературы:

1. Климов В., Климова С. Энергетические показатели источников бесперебойного питания переменного тока // Электронные компоненты – Украина.– 2005. – № 3/4. – С. 92–96.
2. Пат. RU 87845 МПК H02M7/04. Устройство для испытания преобразователей электроэнергии / Привалов В.Д. и др. – Оpubл. 20.10 2009.
3. US20080186741, H02M7/00; G01R31/02. Method and system adapted to regenerate load energy in AC-to-DC and DC-to-AC power converter systems./ Rabo M.// Publ. 08/07/2008.
4. Ching-Lung Chu, Hsiao-Yen Chan. Self-load bank burn-in test with voltage-controlled regulator for three-phase induction motor drives //Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 30, No. 7, pp. 1267-1276 (2007).
5. Shyh-Jier Huang, Fu-Sheng Pai. Design and operation of burn-in test system for three-phase uninterruptible power supplies // IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002.
6. Пат. UA 77433, МПК H02M 7/00, G01R 31/40, G01R 35/00. Спосіб визначення ККД перетворювальної системи / В.І. Колосов // Оpubл. 11.02 2013, Бюл. № 3.
7. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.– Вища школа, 1976. – 432 с.

References:

1. Klimov V., Klimova S. Energy performance sources of uninterrupted AC power [Energeticheskie pokazateli istochnikov bespereboynogo pitaniya peremennogo toka] // the Electronic components of Ukraine. – 2005. – № 3/4. – P. 92–96.
2. Pat.RU 87845, H02M7/04. Device for the test of converters of electric power [Ustroystvo dlya ispytaniya preobrazovateley elektroenergii] / Privalov V.D. and other. – Publ. 20.10 2009.
- 3.US20080186741, H02M7/00; G01R31/02. Method and system adapted to regenerate load energy in AC-to-DC and DC-to-AC power converter systems./ Rabo M.// Publ. 08/07/2008.
4. Ching-Lung Chu, Hsiao-Yen Chan. Self-load bank burn-in test with voltage-controlled regulator for three-phase induction motor drives //Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 30, No. 7, P. 1267–1276 (2007).
5. Shyh-Jier Huang, Fu-Sheng Pai. Design and operation of burn-in test system for three-phase uninterruptible power supplies // IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002.
6. Pat. UA 77433, H02M 7/00, G01R 31/40, G01R 35/00. The method of determination efficiency converting system [Sposib vyznachennya KKD peretvoryuvalnoyi systemy] / V. I. Kolosov // Publ. 11.02 2013.
7. Ornatskiy P. P. Theoretical bases of informative-measuring technique [Teoreticheskie osnovy informatsionno-izmeritelnoy tekhniki]. – K. – High school, 1976. – 432 p.

Поступила в редакцию 20.02 2016 г.