

УДК 621.314

Ромашко Владимир Яковлевич , д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», кафедра промышленной электроники, г. Киев, Украина. Пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

### УСТРОЙСТВА СОГЛАСОВАНИЯ НАГРУЗКИ С ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Проанализированы особенности использования различных типов импульсных регуляторов постоянного напряжения для обеспечения режима передачи максимальной мощности от источника электрической энергии в нагрузку. Рассмотрены случаи непосредственной передачи энергии в нагрузку и использования буферного аккумулятора. Даны рекомендации по использованию конкретных типов регуляторов. Библ. 3, табл.2, рис. 6.*

**Ключевые слова:** отбор максимальной мощности, согласованный режим, буферный аккумулятор.

Ромашко Володимир Якович, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра промислової електроніки, м. Київ, Україна. Пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

### ПРИСТРОЇ УЗГОДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ З ДЖЕРЕЛОМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Проаналізовані особливості використання різних типів імпульсних регуляторів постійної напруги для забезпечення режиму передачі максимальної потужності від джерела електричної енергії в навантаження. Розглянуті випадки безпосередньої передачі енергії в навантаження і використання буферного акумулятора. Дани рекомендації по використанню конкретних типів регулювальників. Библ. 3, табл.2, мал. 6.*

**Ключові слова:** відбір максимальної потужності, погоджений режим, буферний акумулятор.

Romashko Vladimir Yakovlevich, Dr. Tech. Sci.

NTUU "Kyiv polytechnic institute", department of "Industrial electronics", Kyev, Ukraine. Ave. Pobedy, 37, Kyev, Ukraine, 03056

### MATCHING DEVICE LOAD FROM THE SOURCE OF ELECTRICAL ENERGY

*The features of different types of DC converters to ensure maximum power transfer mode from the source of electrical energy to the load are analyzed . The cases of direct transfer of energy to the load and the use of a buffer battery are considered. Recommendations on the use of specific types of regulators are given. References 3, tables 2, figures 6.*

**Key words:** selection of the maximum power, matched regime, the buffer battery.

#### Постановка проблеми

Как известно [1] максимальная мощность от источника электрической энергии в нагрузку передается в согласованном режиме при котором

$$R_H = R_i, \tag{1}$$

где  $R_H$  - сопротивление нагрузки;  $R_i$  - внутреннее сопротивление источника.

Если  $R_H \neq R_i$ , для обеспечения передачи в нагрузку максимально возможной мощности используют устройства согласования нагрузки с источником электрической энергии. В цепях переменного тока такие устройства чаще всего строят на основе трансформатора. При использовании источников постоянного напряжения для согласования нагрузки с источником часто используют импульсные регуляторы (ИР) постоянного напряжения (рис. 1).

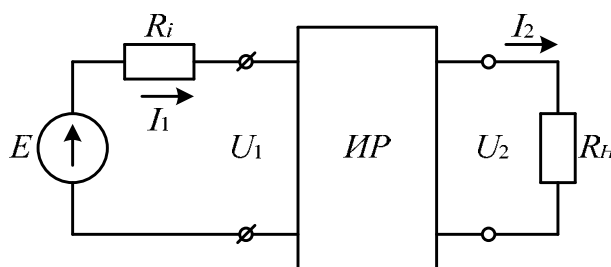


Рис. 1

На рис. 2 представлены схемы трех основных типов ИП, а также временные диаграммы тока индуктивности  $i_L$ , входного  $i_1$  и выходного  $i_2$  токов для этих схем [2]. Пунктиром показаны *средние* значения указанных токов. Проанализируем особенности использования трех типов ИП: 1) понижающего ИП-1 (рис. 2а); 2) повышающего ИП-2 (рис. 2б); 3) инвертирующего ИП-3 (рис. 2в), как устройств согласования источника энергии  $E$  с нагрузкой  $R_H$ .

Пусть имеется источник напряжения  $E$  с *линейным* внутренним сопротивлением  $R_i$  от которого в нагрузку  $R_H$  необходимо передать максимально возможную мощность. Выходная характеристика источника, а также график изменения мощности в нагрузке  $P_H = U_H I_H$  представлены на рис. 3.

Если между источником напряжения  $E$  и нагрузкой  $R_H$  включен ИП, его входной ток  $i_1$  и напряжение  $u_1$  будут током и напряжением нагрузки для *источника*  $u_i = u_1$ ,  $i_i = i_1$  (рис. 1). Если бы входной ток ИП был постоянным и равнялся  $I = I_{iI}$ , выходная мощность источника  $E$  была бы постоянной и равнялась максимально возможному значению  $P_{iI}$  (рис. 4 – сплошная линия). Однако входной ток ИП пульсирующий. Величина пульсации будет зависеть от схемы регулятора, параметров его элементов, сопротивления нагрузки  $R_H$ , коэффициента заполнения импульсов  $\gamma$  и других факторов.

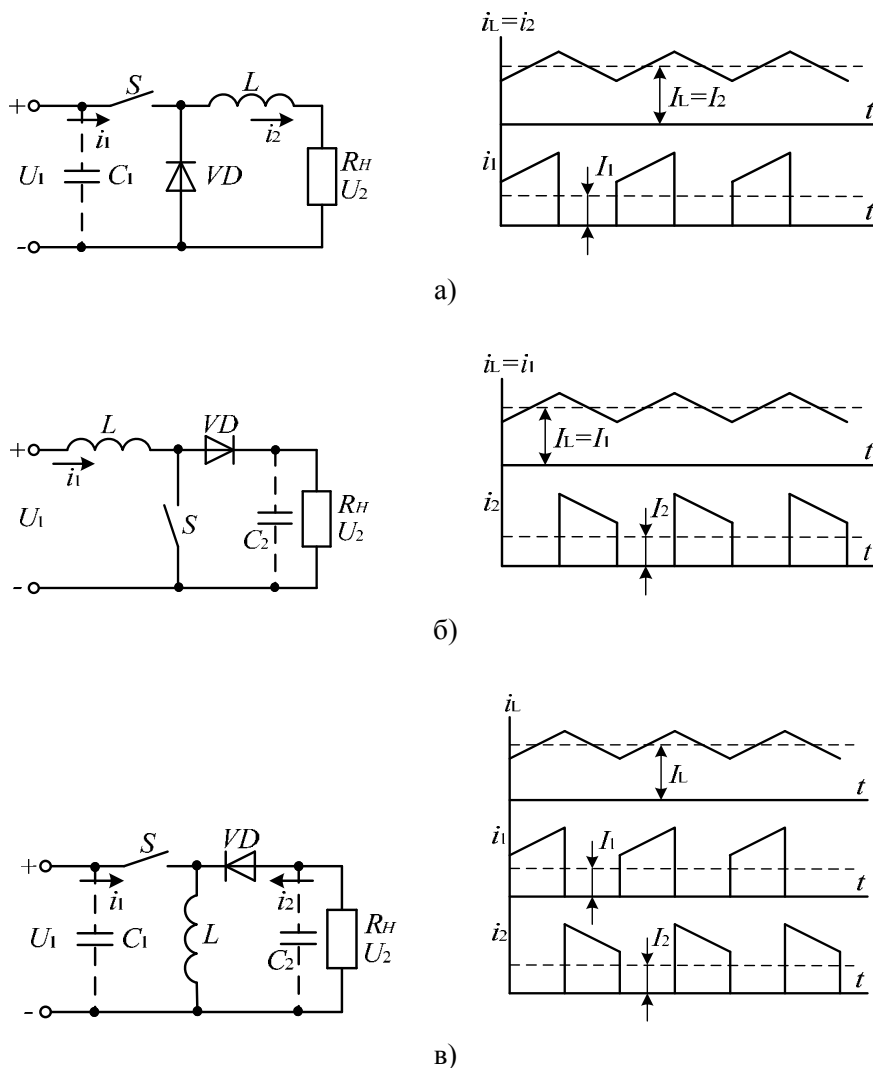


Рис. 2. Схемы трех основных типов ИП, а также временные диаграммы токов индуктивности для этих схем

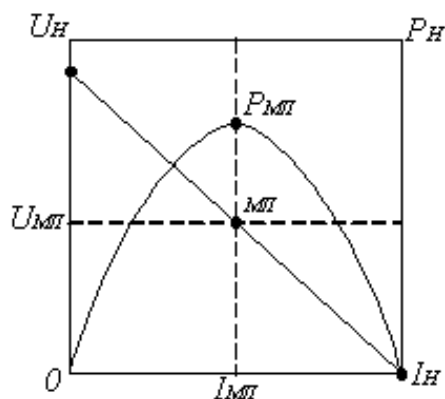


Рис. 3. Выходная характеристика источника и график изменения мощности в нагрузке

За счет пульсации тока  $i_1$  будет происходить смещение рабочей точки относительно  $P_{i1}$ . При этом *мгновенная* мощность будет изменяться, вследствие чего энергия, передаваемая в нагрузку будет меньше, чем *максимально возможная*. На рис. 4, входной ток ИР  $i_1$ , а также график изменения мощности, которая отбирается от источника, показаны пунктирной линией.

Очевидно, что энергия, отбираемая от источника, будет меньше максимально возможной  $W_M = P_{i1} \cdot t$  на величину площади заштрихованных участков. Графики, представленные на рис. 4, соответствуют повышающему ИР-2 входной ток которого  $i_1$  является непрерывным. Для ИР-1 и ИР-3 входной ток  $i_1$ , которых является импульсным (рис. 2), количество недополученной энергии существенно возрастает.

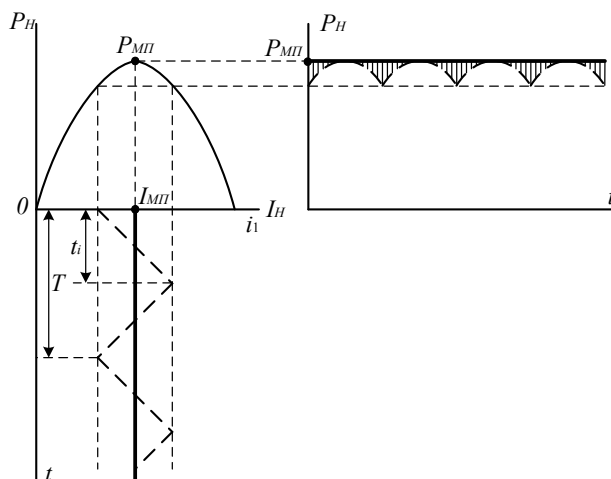


Рис. 4. Входной ток ИР и график изменения мощности отбираемой от источника

В зависимости от коэффициента заполнения импульсов  $\gamma$  количество недополученной энергии может составлять 50 % и более. Таким образом, с точки зрения отбора максимальной энергии от источника  $E$  наиболее эффективным является ИР-2, работающий в режиме непрерывного тока индуктивности  $i_L$  с небольшой пульсацией. Для повышения эффективности использования схем ИР-1 и ИР-3 на их входе необходимо включать емкость  $C_1$  (рис. 2), которая выполняет функцию промежуточного накопителя энергии, потребляемой от источника  $E$ , и обеспечивает непрерывный ток с небольшой пульсацией. Проанализируем особенности трех типов ИР как устройств *согласования* источника электрической энергии с нагрузкой.

В случае отсутствия потерь энергии в ИР должно выполняться условие

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \tag{2}$$

где  $U_1 I_1$  - среднее значение входного напряжения и тока;  $U_2 I_2$  - среднее значение выходного напряжения и тока.

Для понижающего регулятора ИР-1  $U_2 = \gamma U_1$ ;  $I_2 = I_1 / \gamma$ , где  $\gamma = t_e / T$  - коэффициент заполнения импульсов;  $t_e$  - длительность замкнутого состояния ключа;  $T$  - период работы ключа. Для обеспечения отбора максимальной мощности от источника необходимо, чтобы входное сопротивление ИР  $R_{\text{вв}}$  равнялось внутреннему сопротивлению источника  $R_i$

$$R_i = R_{\text{вв}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} \cdot \frac{1}{\gamma^2} = \frac{R_H}{\gamma^2}. \quad (3)$$

Таким образом, согласованный режим может быть обеспечен путем изменения коэффициента заполнения импульсов регулятора  $\gamma$  в соответствии с

$$\gamma = \sqrt{R_H / R_i}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $\gamma = (0 \dots 1)$  делаем вывод, что ИР-1 может обеспечить согласованный режим источника если

$$R_H \leq R_i. \quad (5)$$

Для повышающего ИР-2  $U_2 = \frac{1}{1-\gamma} U_1$ ;  $I_2 = (1-\gamma) I_1$ . Для согласованного режима должно выполняться условие

$$R_i = R_{\text{вв}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} (1-\gamma)^2 = (1-\gamma)^2 R_j, \quad (6)$$

откуда

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\sqrt{R_H / R_i}}. \quad (7)$$

Следовательно, ИР-2 может обеспечить согласованный режим работы источника, если

$$R_H \geq R_i. \quad (8)$$

Для инвертирующего ИР-3  $U_2 = \frac{\gamma}{1-\gamma} U_1$ ;  $I_2 = \frac{1-\gamma}{\gamma} I_1$ . Условие согласованного режима

$$R_i = R_{\text{вв}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^2} = R_j \frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^2}, \quad (9)$$

откуда

$$\gamma = \frac{\sqrt{R_j / R_i}}{1 + \sqrt{R_j / R_i}}. \quad (10)$$

Таким образом, теоретически ИР-3 может обеспечить согласованный режим работы источника при

$$R_i \leq R_H \leq R_j. \quad (11)$$

Однако, в отличие от ИР-1, для регуляторов ИР-2 и ИР-3 условие (2) может быть выполнено при  $\gamma = (0 \dots 0,6)$  [2]. При  $\gamma > 0,6$  амплитудное, а следовательно и действующее значение тока индуктивности  $i_L$  сильно возрастает, что приводит к существенному возрастанию потерь в элементах регулятора (дросселе и ключах). Поэтому при  $\gamma > 0,6$  формулы (7) и (10) будут иметь погрешность.

Режим отбора максимальной энергии от источника связан с уменьшением коэффициента использования его электрической энергии  $\eta = P_j / P_E$ , где  $P_j$  - мощность, передаваемая в нагрузку;  $P_E$  - мощность, которую при этом развивает источник энергии. Так, при линейном внутреннем сопротивлении источника  $\eta = 0,5$ , а при нелинейном может быть как больше, так и меньше 0,5 [3]. Поэтому, такой режим чаще всего используется для возобновляемых источников (ветрогенераторов, солнечных батарей, термоэлектрических генераторов, работающих от побочного тепла), получение электрической энергии в которых не связано с расходом топлива. Особенностью подобных источников является существенная зависимость их выходной мощности от условий окружающей среды, которые изменяются во времени. В связи с этим, для более равномерного поступления электрической энергии в нагрузку, на ее входе ставят промежуточный накопитель электрической энергии, роль которого чаще всего выполняет аккумулятор. При этом обеспечение режима передачи максимальной энергии в нагрузку имеет ряд особенностей. В частности, в отличие от прямой

передачи электрической энергии в нагрузку  $R_H$ , в данном случае присутствуют процессы накопления энергии в аккумуляторе и передачи накопленной энергии в нагрузку, при которых происходят *дополнительные* потери энергии на внутреннем сопротивлении аккумулятора  $r_i$ . При работе источника в режиме отбора максимальной энергии желательно, чтобы эти дополнительные потери были минимальными. Проанализируем, от чего зависят эти потери.

Очевидно, что максимальными эти потери будут при работе аккумулятора в режиме *заряд - разряд*, при котором энергия на внутреннем сопротивлении аккумулятора теряется как при заряде, так и разряде. При работе аккумулятора в *буферном* режиме дополнительные потери энергии будут меньше, поскольку часть полученной энергии *напрямую* передается в нагрузку  $R_H$ . Оценим дополнительные потери энергии для наихудшего случая, когда внешняя нагрузка  $R_H$  отключена, а энергия источника  $E$  используется только для зарядки аккумулятора  $E_a$  (рис. 5).

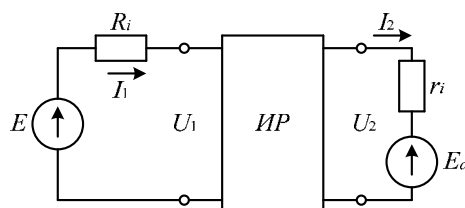


Рис. 5.

При этом будем считать, что источник  $E$  работает в режиме отдачи максимальной энергии, т.е.  $U_1 = U_{iI}$ ;  $I_1 = I_{iI}$ .

Если бы аккумулятор был идеальным ( $r_i = 0$ ), дополнительные потери в нем бы отсутствовали. Для обеспечения режима передачи максимальной энергии в аккумулятор его ЭДС  $E_a$  должна равняться  $U_{iI}$ . Если же ЭДС используемого аккумулятора  $E_a \neq U_{iI}$ , его подключение к источнику  $E$  осуществляется через соответствующий тип ИР. Так, если  $E_a < U_{iI}$ , используют понижающий ИР-1. Если  $E_a > U_{iI}$ , используют повышающий ИР-2. Инвертирующий ИР-3 может быть использован в обоих предыдущих случаях.

Реальные аккумуляторы имеют внутреннее сопротивление  $r_i \neq 0$ , на котором при заряде теряется часть энергии. Процесс зарядки аккумулятора характеризуется соответствующим коэффициентом использования электрической энергии

$$\eta_3 = \frac{E_a I_2}{U_2 I_2} = \frac{E_a}{U_2} \tag{12}$$

Для идеального аккумулятора  $E_a = U_2$ , поэтому  $\eta_3 = 1$ . В реальном аккумуляторе  $U_2 = E_a + I_2 r_i$ . Поэтому

$$\eta_3 = \frac{E_a}{E_a + I_2 r_i} = \frac{E_a}{E_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I_2 r_i}{E_a}} = \frac{1}{1 + \frac{I_2}{I_{\dot{e}.\dot{c}.}}} \tag{13}$$

где  $I_{\dot{e}. \dot{c}.} = E_a / r_i$  – ток короткого замыкания аккумулятора. Напряжение аккумулятора  $E_a$  можно изменить путем последовательного соединения  $n$  элементов. Но, при этом, последовательно соединяются и их внутренние сопротивления. При этом ток короткого замыкания  $I_{\dot{e}. \dot{c}.} = n E_a / n r_i = E_a / r_i$  является параметром аккумулятора, который не зависит от количества элементов в батарее.

Если аккумулятор заряжают *импульсным* током, причем амплитуда импульсов  $I_m \approx const$ , передача энергии в аккумулятор, а следовательно и потери энергии на  $r_i$  происходят только во время действия импульсов тока. Поэтому коэффициент использования электрической энергии при зарядке также будет определяться формулой (13), в которой  $I_2 = I_m$ . Если же при импульсном выходном токе ИР на его выходе поставить сглаживающий конденсатор  $C_2$  (рис. 2), зарядка аккумулятора будет осуществляться постоянным током, который численно равен среднему значению выходного тока

регулятора  $I_2$ . В табл. 1 приведены формулы для определения токов  $I_m$  и  $I_2$  для трех основных типов ИР в режиме отбора максимальной энергии от источника ( $I_1 = I_{iI}$ ).

Таблица 1

№	Тип ИР	Ток заряда аккумулятора $i_a$	
		импульсный $I_a = I_m$	сглаженный $I_a = I_2$
1	ИР-1	$I_{iI} / \gamma$	$I_{iI} / \gamma$
2	ИР-2	$I_{iI}$	$(1 - \gamma) I_{iI}$
3	ИР-3	$I_{iI} / \gamma$	$(1 - \gamma / \gamma) I_{iI}$

Анализ табл. 1 показывает, что не смотря на то, что в ИР-1 зарядка аккумулятора осуществляется непрерывным сглаженным током, величина этого тока, по сравнению с другими типами регуляторов будет наибольшей. Поэтому  $\eta_3$  будет тем меньше, чем меньше ЭДС аккумулятора  $E_a$  (коэффициент  $\gamma$ ). Максимальным  $\eta_3$  будет при использовании ИР-2. При заряде аккумулятора импульсным током  $\eta_3$  не зависит от  $\gamma$  (ЭДС аккумулятора  $E_a$ ). При зарядке аккумулятора сглаженным током  $\eta_3$  принимает наибольшее значение, причем тем больше, чем больше  $\gamma$  (ЭДС аккумулятора  $E_a$ ). Регулятор ИР-3 при зарядании аккумулятора импульсным током имеет такой же  $\eta_3$ , как и ИР-1. При заряде сглаженным током  $\eta_3$  больше, чем в ИР-1, но меньше, чем в ИР-2.

**Пример.** Пусть источник электрической энергии работает в режиме передачи максимальной энергии при  $U_{iI} = 10A$  и  $I_{iI} = 1A$ . Ток короткого замыкания аккумулятора  $I_{\epsilon.с.} = 5A$ . Все регуляторы работают с  $\gamma = 0,5$ . Результаты определения  $\eta_3$  для разных типов ИР представлены в табл. 2.

Таблица 2

№	Тип ИР	импульсный ток		сглаженный ток	
		$I_a = I_m [A]$	$\eta_3$	$I_a = I_2 [A]$	$\eta_3$
1	ИР-1	2	0,715	2	0,715
2	ИР-2	1	0,835	0,5	0,91
3	ИР-3	2	0,715	1	0,835

При работе аккумулятора в режиме заряд-разряд потери энергии присутствуют как при зарядке, так разрядке аккумулятора. Коэффициент использования электрической энергии при разряде

$$\eta_\delta = \frac{U_H}{E_a} = \frac{E_a - I_a r_i}{E_a} = 1 - \frac{I_a}{I_{\epsilon.с.}} \quad (14)$$

Назовем параметр  $I_a / I_{\epsilon.с.} = I_a^*$  *относительным* током аккумулятора. На рис. 6 представлен график изменения коэффициента использования электрической энергии  $\eta$  при зарядке ( $I^* < 0$ ) и разрядке ( $I^* > 0$ ) аккумулятора.

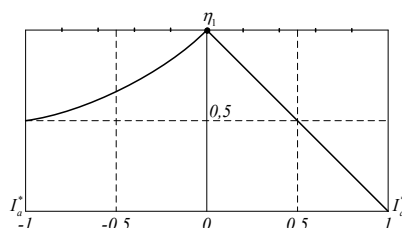


Рис. 6

График построен с использованием формул (13) и (14). Очевидно, что для уменьшения потерь энергии при зарядке и разрядке аккумулятора необходимо уменьшить его относительный ток  $|I_a^*|$ . Это достигается либо уменьшением тока аккумулятора  $I_a$ , либо увеличением его тока короткого замыкания (уменьшением  $r_i$ ). Для рационального использования электрической энергии целесообразно как в режиме заряда, так и разряда работать с  $\eta \geq 0,9$ . В этом случае при работе аккумулятора в режиме заряд-разряд общий коэффициент использования электрической энергии  $\eta = \eta_3 \cdot \eta_p \geq 0,81$ . При работе в буферном режиме, как отмечалось, потери энергии будут меньшими и общий  $\eta$  будет увеличиваться.

#### Выводы

1. Для отбора максимально возможной энергии от источника напряжения  $E$  его выходной ток должен быть постоянным и равным  $I_{iI}$ .

2. Если для согласования источника с нагрузкой используется ИР, входной ток которого имеет форму импульсов, на его входе необходимо включить сглаживающий конденсатор  $C_1$  для обеспечения минимальных пульсаций тока источника энергии.

3. При прямой передаче энергии от источника  $E$  в нагрузку  $R_H$  тип ИР определяется соотношением между выходным сопротивлением источника  $R_{\text{вв}}$  в точке МП и сопротивлением нагрузки  $R_H$ .

4. Если на выходе ИР стоит промежуточный накопитель энергии - аккумулятор, тип ИР определяется величиной ЭДС аккумулятора.

5. Для обеспечения минимальных потерь энергии в аккумуляторе при его заряде и разряде, целесообразно выбирать аккумулятор с ЭДС  $E_a > U_{iI}$ , а в качестве устройства согласования использовать повышающий ИР-2.

6. При использовании в качестве устройства согласования регуляторов ИР-2 и ИР-3, выходной ток которых имеет форму импульсов, для повышения  $\eta_3$  на выходе ИР целесообразно включить конденсатор  $\tilde{N}_2$  для сглаживания тока, который заряжает аккумулятор.

#### Список использованной литературы:

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

2. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Ю. П. Гончаров, О. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко. – Х.: Фоліо, 2000. – 360 с.

3. Ромашко В. Я. До питання про відбір максимальної потужності від джерел електричної енергії // Електроніка і зв'язь. – 2013. – № 4. – С. 28 – 34.

#### Referenses:

1. Bessonov L.A Theory of Electrical Engineering. Electrical circuits: text book: - Moskva: Gardariki, 2007. – 701 p.(Rus.)

2. Power conversion equipment. Text book. Part 2 / Y. P. Goncharov, O. V Budonny, V. G. Morozov, M. V Panasenko, V. Y. Romashko, V. S. Rudenko. – Kharkiv: Folio, 2000. – 360 p. (Ukr).

3. Romashko V.Y. On the selection of the maximum power from the source of electrical energy // Elektronika i sviaz. – 2013. – № 4. – P. 28–34 (Ukr).

Поступила в редакцию 15.01 2016 г.