

УДК 621.314

В. Я. Ромашко, д-р техн. наук

НТУУ «Киевский политехнический институт», кафедра промышленной электроники,
г. Киев, Украина

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.

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

Постановка проблемы

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).

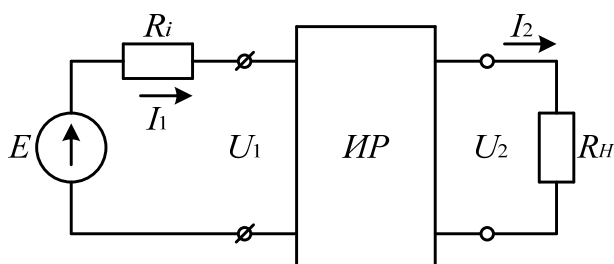
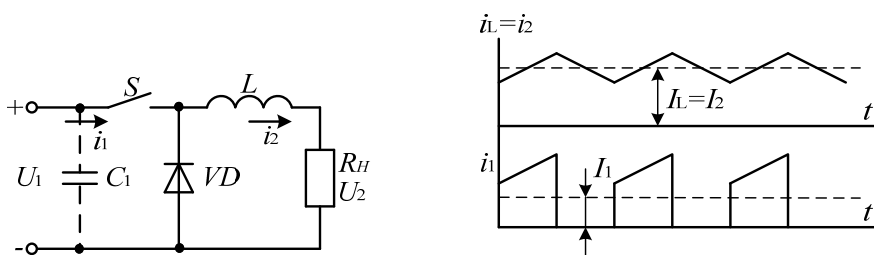


Рис. 1

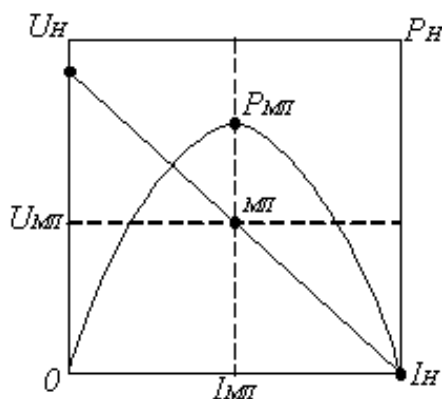
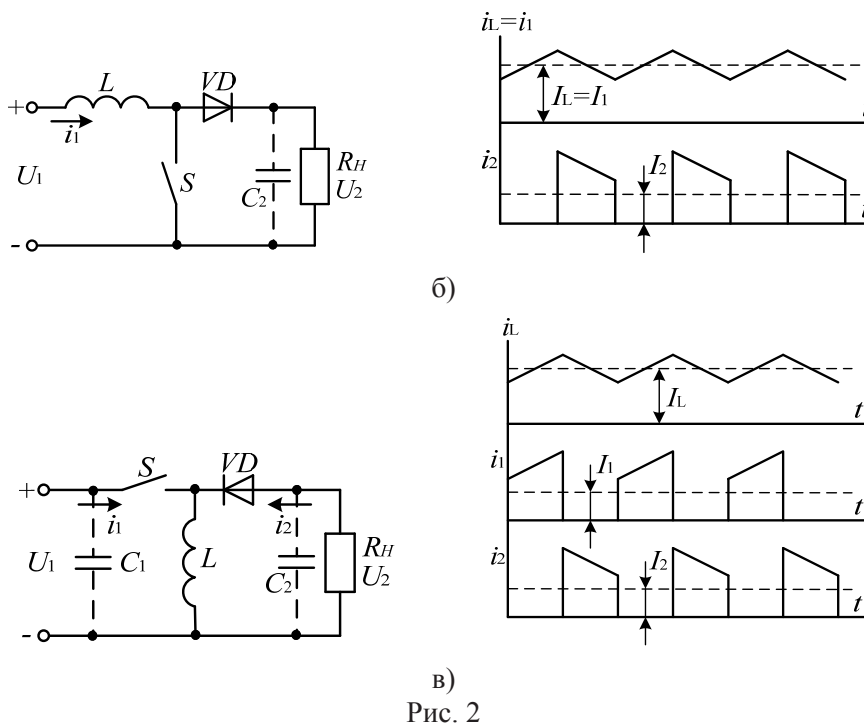
На рис. 2 представлены схемы трех основных типов ИР, а также временные диаграммы тока индуктивности i_L , входного i_1 и выходного i_2 токов для этих схем [2]. Пунктиром показаны средние значения указанных токов. Проанализируем особенности использования трех типов ИР 1) понижающего ИР-1 (рис. 2а); 2) повышающего ИР-2 (рис. 2б); 3) инвертирующего ИР-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 ИР, 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 ИР 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 ИР пульсирующий. Величина пульсации будет зависеть от схемы регулятора, параметров его элементов, сопротивления нагрузки R_H , коэффициента заполнения импульсов γ и других факторов.



а)



За счет пульсации тока i_1 будет происходить смещение рабочей точки относительно $P_{гг}$. 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 $W_M = P_{гг} \cdot t$ 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.

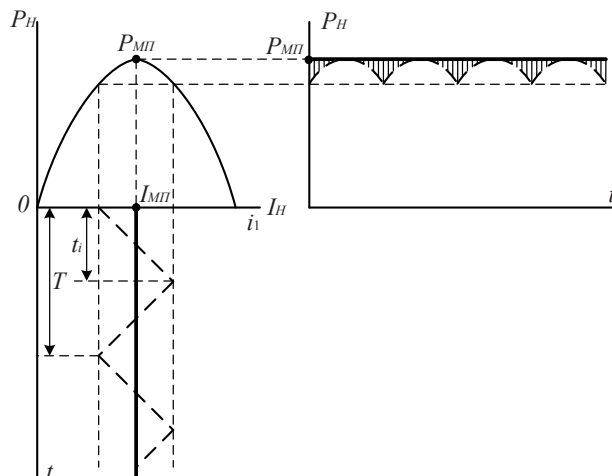


Рис. 4

В зависимости от коэффициента заполнения импульсов γ 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 $\gamma = t_c / T$ - коэффициент заполнения импульсов; t_c - 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

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

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

$$\gamma = \sqrt{R_H / R_i} \tag{4}$$

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

$$R_H \leq R_i \tag{5}$$

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

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

откуда

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\sqrt{R_H / R_i}} \tag{7}$$

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

$$R_H \geq R_i \tag{8}$$

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

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

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).

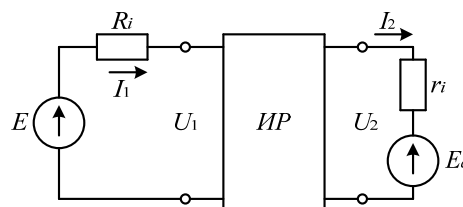


Рис. 5

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

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

$$\eta_3 = \frac{E_a I_2}{U_2 I_2} = \frac{E_a}{U_2} \quad (12)$$

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

$$\eta_3 = \frac{E_a}{E_a + I_2 r_i} = \frac{E_a}{E_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I_2 r_i}{E_a}} = \frac{1}{1 + \frac{I_2}{I_{\text{з.с.}}}} \quad (13)$$

где $I_{\text{з.с.}} = E_a / r_i$ – 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 $I_{\text{з.с.}} = nE_a / nr_i = E_a / r_i$ является параметром аккумулятора, который не зависит от количества элементов в батарее.

Если аккумулятор заряжают *импульсным* током, причем амплитуда импульсов $I_m \approx \text{const}$, 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} / γ	I_{iI} / γ
2	ИР-2	I_{iI}	$(1 - \gamma) I_{iI}$
3	ИР-3	I_{iI} / γ	$(1 - \gamma / \gamma) I_{iI}$

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 η_3 будет тем меньше, чем меньше ЭДС аккумулятора E_a (коэффициент γ). Максимальным η_3 будет при использовании ИР-2. При заряде аккумулятора импульсным током η_3 не зависит от γ (ЭДС аккумулятора E_a). При зарядке аккумулятора сглаженным током η_3 принимает наибольшее значение, причем тем больше, чем больше γ (ЭДС аккумулятора E_a). Регулятор ИР-3 при зарядании аккумулятора импульсным током имеет такой же η_3 , как и ИР-1. При заряде сглаженным током η_3 больше, чем в ИР-1, но меньше, чем в ИР-2.

Пример. Пусть источник электрической энергии работает в режиме передачи максимальной энергии при $U_{iI} = 10\text{A}$ и $I_{iI} = 1\text{A}$. Ток короткого замыкания аккумулятора $I_{\text{э.с.}} = 5\text{A}$. Все регуляторы работают с $\gamma = 0,5$. Результаты определения η_3 для разных типов ИР представлены в табл. 2.

Таблица 2

№	Тип ИР	импульсный ток		сглаженный ток	
		$I_a = I_m [\text{A}]$	η_3	$I_a = I_2 [\text{A}]$	η_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

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

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

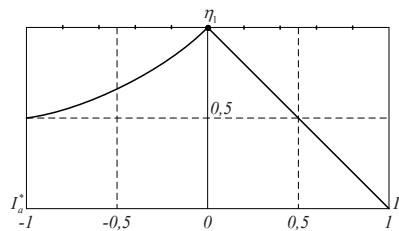


Рис. 6

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 η 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 $R_{\text{аио}}$ 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 $E_a > U_{i\gamma}$, 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 η_3 на выходе ИР целесообразно включить конденсатор \tilde{N}_2 для сглаживания тока, который заряжает аккумулятор.

Список 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.

MATCHING DEVICE LOAD FROM THE SOURCE OF ELECTRICAL ENERGY

V. Y. Romashko

НТУУ "Kyiv polytechnic institute", department of "Industrial electronics"

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.*

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 // Electronika i sviaz. – 2013. – № 4. – P. 28–34 (Ukr).