

В.П.Разинкин¹, Л.Г.Зотов¹, А.Д.Мехтиев²,
Н.Т.Исембергенов³, В.В.Югай³, Г.Б.Валеева¹

¹Новосибирский государственный технический университет, Россия;

²Карагандинский государственный технический университет;

³Казахский национальный технический университет им. Сатпаева, Алматы

(E-mail: slawa_v@mail.ru)

Многоуровневые ШИМ-регуляторы на основе конвертеров постоянного тока

В статье проанализированы принципы построения и работы многоуровневых двунаправленных широтно-импульсных регуляторов постоянного тока на основе конденсаторных DC-DC конвертеров резонансного типа. Регуляторы отличаются низким коэффициентом гармоник входного и выходного тока, улучшенными массогабаритными параметрами и повышенным КПД. Эффект достигнут применением многотактного и многоуровневого принципа работы, а также мягкой коммутацией всех транзисторных ключей, входящих в состав силовой цепи регулятора. Приведены уравнения для расчета параметров элементов силовой цепи РПТ. Продемонстрирована возможность уменьшения коэффициента гармоник тока, потребляемого первичным источником.

Ключевые слова: многоуровневые двунаправленные широтно-импульсные регуляторы постоянного тока; многотактный резонансный конвертер на основе структур с переключаемыми конденсаторами; мягкий режим коммутации.

1. Многоуровневые РПТ с секционированным входным источником

Многосонные широтно-импульсные регуляторы постоянного тока (РПТ) с секционированным входным источником отличаются линейностью регулировочной характеристики и повышенным КПД. Структурная схема двухуровневого двунаправленного РПТ с секционированным входным источником [1] приведена на рисунке 1.

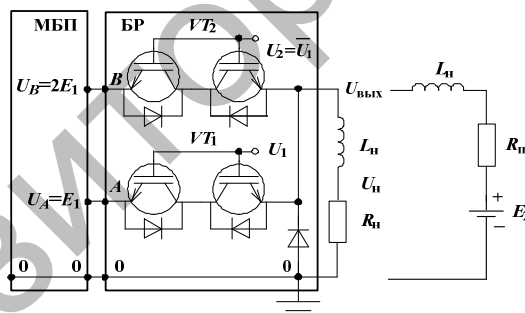


Рисунок 1. Структурная схема двунаправленного двухуровневого РПТ с секционированным входным источником в прямом и обратном направлениях

Она состоит из блока регулирования (БР), многоуровневого блока питания (МБП) и (R_n, L_n) нагрузки. Назначение МБП — создание дискретных уровней входного напряжения, равноотстоящих друг от друга на величину E . Величина E равна напряжению входного источника E_1 для повышающего РПТ и $\frac{E_1}{K}$ — для понижающего РПТ, а K — количество уровней регулирования. БР включает в себя два ШИМ-регулирующих элемента на основе двунаправленных транзисторных ключей VT_1 и VT_2 .

Главный недостаток такого РПТ — завышенное количество регулирующих транзисторных ключей, равное числу уровней регулирования K .

Употребление повышающих МРПТ на основе структур с переключаемыми конденсаторами решает сократить количество регулирующих транзисторных ключей до двух при любом числе уровней регулирования. Эффект достигается управлением дискретными уровнями напряжений U_A и U_B (рис. 2) путем изменения структуры МБП [2].

II. Двухуровневые двунаправленные РПТ с секционированным входным источником на основе конверторов постоянного тока резонансного типа

Самыми элементарными являются двухуровневые РПТ. Структурные схемы двухуровневых двунаправленных повышающих и понижающих РПТ одинаковы, при работе в прямом и обратном направлениях. Они показаны на рисунке 1.

Отличие состоит в структуре их МБП. Принципиальные схемы МБП повышающих и понижающих двухуровневых двунаправленных РПТ приведены на рисунке 2.

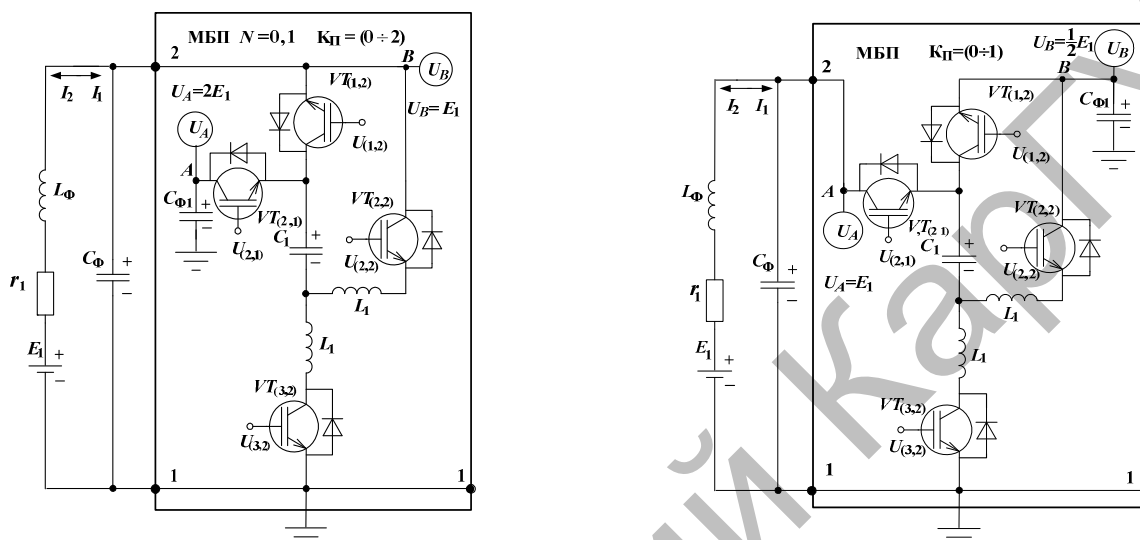


Рисунок 2. Принципиальные схемы МБП повышающего и понижающего двухуровневых двунаправленных РПТ

Они представляют собой соответственно повышающий и понижающий двунаправленные преобразовательные модули (ДПМ), содержащие один ($N=1$) конденсатор. Коэффициенты преобразования равны $K_{\pi} = (1 + N) = 2$ — для повышающего и $K_{\pi} = \frac{1}{1 + N} = \frac{1}{2}$ — для понижающего РПТ. Алгоритм управления транзисторными ключами силовой цепи МБП удобно описать матрицами управления. Матрица управления представляет собой совокупность управляющих сигналов $U_{(i,j)}$ для соответствующих транзисторных ключей МБП. $U_{(i,j)} = 0$ — управляющий сигнал, обеспечивающий закрытое состояние транзисторного ключа; $U_{(i,j)} = 1$ — управляющий сигнал, обеспечивающий открытое состояние транзисторного ключа; $U_{(i,j)} = X$ — последовательность управляющих импульсов длительностью $0,5 \cdot T_{\pi}$, следующих с частотой $f_{\pi} = \frac{1}{T_{\pi}}$; $U_{(i,j)} = \bar{X}$ — управляющий сигнал, инверсный X .

Матрицы управления транзисторных ключей в МБП для повышающего (а) и понижающего (б) двухуровневых РПТ (рис. 2.) при работе в прямом направлении имеют вид

$$U_{\text{H}} = [0, E_1] \quad U_{\text{H}} = [E_1, 2E_1] \quad U_{\text{H}} = [0, \frac{1}{2}E_1] \quad U_{\text{H}} = [\frac{1}{2}E_1, E_1]$$

a) $N=0$ $N=0, 1$ б) $N=1$ $N=0, 1$

$$\begin{vmatrix} U_{(1,1)} & U_{(1,2)} \\ U_{(2,1)} & U_{(2,2)} \\ U_{(3,1)} & U_{(3,2)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} - & 0 \\ 0 & 0 \\ - & X \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} - & X \\ 0 & \bar{X} \\ - & X \end{vmatrix}; \quad \begin{vmatrix} U_{(1,1)} & U_{(1,2)} \\ U_{(2,1)} & U_{(2,2)} \\ U_{(3,1)} & U_{(3,2)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} - & X \\ \bar{X} & \bar{X} \\ - & X \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} - & X \\ \bar{X} & 0 \\ - & 0 \end{vmatrix}$$

Типовые регулировочные характеристики для повышающего (а) и понижающего (б) вариантов двухуровневых РПТ в прямом направлении представлены на рисунке 3.

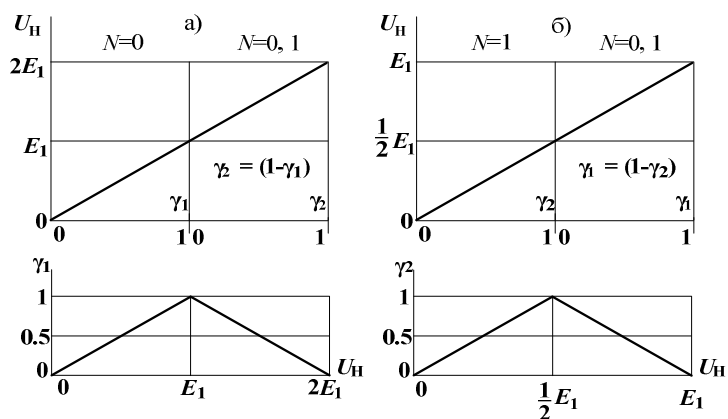


Рисунок 3. Регулировочные характеристики повышающего (а) и понижающего (б) двухуровневых РПТ в прямом направлении

Принцип работы двухуровневого повышающего РПТ заключается в следующем. В исходном состоянии транзисторный ключ VT_2 в БР закрыт. Регулировка U_H в диапазоне $[0, E_1]$ выполняется при $N=0$ изменением коэффициента заполнения γ_1 управляющих импульсов U_1 транзисторного ключа VT_1 в диапазоне $[0, 1]$. Затем на управляющий вход транзисторного ключа VT_2 подаются управляющие импульсы $U_2 = \bar{U}_1$ и происходит регулировка U_H в диапазоне $[E_1, 2 \cdot E_1]$. Она реализуется при $N=0, 1$ одновременным изменением коэффициентов заполнения γ_1 и $\gamma_2 = 1 - \gamma_1$ соответственно в диапазонах $[1, 0]$ и $[0, 1]$. Напряжение входного источника $E_1 = U_A$ подается на вход A транзисторного ключа VT_1 , а напряжение $2 \cdot E_1 = U_B$ — на вход B транзисторного ключа VT_2 .

Работа понижающего двухуровневого РПТ происходит следующим образом. В исходном состоянии транзисторный ключ VT_1 в БР закрыт. Напряжение $U_B = \frac{1}{2} \cdot E_1$ с выхода понижающего ДПМ, входящего в состав МБП, подается на вход B транзисторного ключа VT_2 . При этом напряжение входного источника $E_1 = U_A$ подается на вход A транзисторного ключа VT_1 . Регулировка U_H в диапазоне $\left[0, \frac{1}{2} \cdot E_1\right]$ осуществляется при $N=1$ изменением коэффициента заполнения γ_2 управляющих импульсов U_2 транзисторного ключа VT_2 в диапазоне $[0, 1]$. Затем на управляющий вход транзисторного ключа VT_1 подаются управляющие импульсы $U_1 = \bar{U}_2$ и происходит регулировка U_H в диапазоне $\left[\frac{1}{2} \cdot E_1, E_1\right]$. Она осуществляется при $N=0, 1$ путем одновременного изменения коэффициентов заполнения γ_2 и $\gamma_1 = 1 - \gamma_2$ соответственно в диапазонах $[1, 0]$ и $[0, 1]$.

Работа повышающих и понижающих двухуровневых РПТ в обратном направлении (режим рекуперации) осуществляется под воздействием источника E_2 , представляющего собой ЭДС нагрузки, например, электродвигателя.

Матрицы управления транзисторных ключей в МБП повышающего (а) и понижающего (б) двухуровневых РПТ при работе в обратном направлении имеют вид:

$$\begin{array}{cc}
 E_2 = [E_1, 2E_1] & E_2 = \left[\frac{1}{2}E_1, E_1\right] \\
 \text{a) } & \text{б) } \\
 N=1 & N=1 \\
 \left| \begin{array}{cc} U(1,1) & U(1,2) \\ U(2,1) & U(2,2) \\ U(3,1) & U(3,2) \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} - & X \\ \bar{X} & 0 \\ - & 0 \end{array} \right| ; & \left| \begin{array}{cc} U(1,1) & U(1,2) \\ U(2,1) & U(2,2) \\ U(3,1) & U(3,2) \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} - & 0 \\ 0 & \bar{X} \\ - & X \end{array} \right| ;
 \end{array}$$

Регулировочные характеристики при работе двухуровневых повышающего (а) и понижающего (б) РПТ в обратном направлении представлены на рисунке 4.

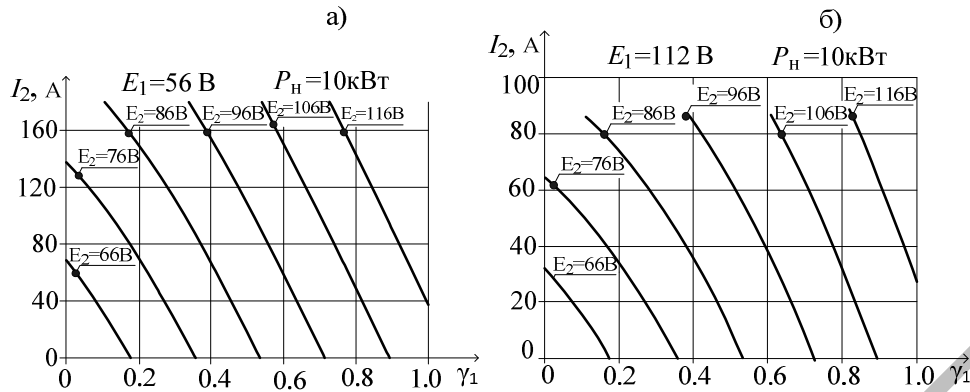


Рисунок 4. Регулировочные характеристики повышающего (а) и понижающего (б) двухуровневых РПТ в обратном направлении

Они получены для РПТ, нагрузкой которого является электродвигатель постоянного тока. Номинальные мощность и напряжение электродвигателя $P_n = 10 \text{ кВт}$, $U_n = 110 \text{ В}$. При этом индуктивность обмотки якоря составляет $L_a = 5 \text{ мГн}$, а величина напряжения первичного источника для повышающего РПТ — $E_1 = 56 \text{ В}$, для понижающего — $E_1 = 112 \text{ В}$.

Главное свойство рассмотренных двухуровневых регуляторов состоит в том, что уровни напряжений прикладываемых ко всем элементам их силовой цепи, одинаковы и равны E_1 — для повышающих и $0.5 \cdot E_1$ — для понижающих РПТ. Кроме того, токи через все элементы силовой цепи их МБП также одинаковы по форме, и их средние значения равны $\frac{I_n}{2}$ — для повышающего и I_n — для понижающего РПТ.

Параметры элементов повышающих и понижающих двухуровневых РПТ определяются следующими выражениями:

$$C_1 = \frac{I_{n(\max)}}{f_k \cdot E_1 \cdot \Delta U_{c1}^*}, L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_k^2 \cdot C_1} \quad \text{— для повышающего двухуровневого РПТ,}$$

$$C_1 = \frac{I_{n(\max)}}{2 \cdot f_k \cdot E_1 \cdot \Delta U_{c1}^*}, L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_k^2 \cdot C_1} \quad \text{— для понижающего двухуровневого РПТ,}$$

где $\Delta U_{c1}^* = \frac{\Delta U_{c1}}{E_1}$ — максимально допустимая относительная пульсация напряжения на конденсаторе

C_1 ; $I_{n(\max)}$ — максимальный ток в нагрузке двухуровневых РПТ; f_k — частота коммутации силовых транзисторов в МБП.

III. Повышающие трехуровневые двунаправленные РПТ с секционированным входным источником на основе резонансных конверторов постоянного тока

Особенность повышающих РПТ в том, что блок БР состоит из двух транзисторных ключей (рис. 1) при любом числе уровней регулирования. Принципиальная схема силовой цепи МБП повышающего трехуровневого двунаправленного РПТ представлена на рисунке 5. Она состоит из ДПМ 1 и ДПМ 2, имеющих коэффициенты преобразования $K_{п1} = (N_1 + 1) = 3$ и $K_{п2} = (N_2 + 1) = 2$.

Фильтр нижних частот (L_ϕ, C_ϕ) предназначен для сглаживания пульсаций тока, потребляемого РПТ от входного источника E_1 . Он может быть исключен из силовой цепи МБП, если требования к величине пульсаций входного тока отсутствуют.

Работа трехуровневого РПТ в прямом направлении происходит следующим образом. В исходном состоянии в ДПМ 1 и ДПМ 2 работают только зарядные транзисторные ключи $VT_{(3,2)}, VT_{(3,3)}$ и $VT_{(3,5)}$. Остальные ключи МБП заперты. Такой режим работы поддерживает напряжение на конденсаторах их СЦ на уровне E_1 . В БР закрыт транзисторный ключ VT_2 . Регулировка выходного напряжения

РПТ U_H в диапазоне $[0, E_1]$ осуществляется при $N_1 = N_2 = 0$ изменением коэффициента заполнения γ_1 управляющих импульсов U_1 транзисторного ключа VT_1 . Входное напряжение $E_1 = U_A$ через обратные диоды транзисторных ключей $VT_{(1,2)}$ и $VT_{(2,1)}$ с выхода ДПМ 1 подается на вход A транзисторного ключа VT_1 в БР. Для обеспечения регулировки U_H в диапазоне $[E_1, 2 \cdot E_1]$ на вход разрядного транзисторного ключа $VT_{(2,5)}$ в ДПМ 2 подается управляющий сигнал $U_{(2,5)} = \overline{U_{(3,5)}}$. В результате выходное напряжение ДПМ 2 $U_B = (N_2 + 1) = 2 \cdot E_1$ подается на вход транзисторного ключа VT_2 в БР.

Регулировка выполняется при $N_1 = 0, N_2 = 1$ одновременным изменением коэффициентов заполнения $\gamma_2 = (1 - \gamma_1)$ и γ_1 управляющих импульсов $U_2 = \overline{U_1}$ транзисторных ключей VT_2, VT_1 соответственно в диапазонах $[0, 1]$ и $[1, 0]$.

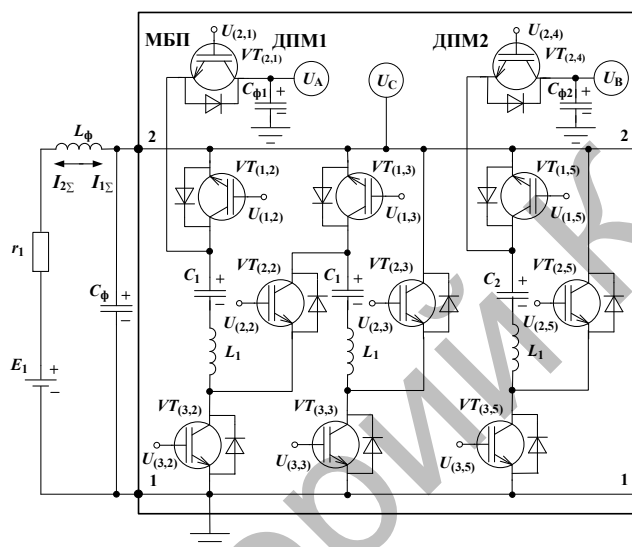


Рисунок 5. Принципиальная схема силовой цепи МБП повышающего трёхуровневого двунаправленного РПТ

На заключительном этапе происходит регулировка U_H в диапазоне $[2 \cdot E_1, 3 \cdot E_1]$. Для этого на управляющие входы разрядных транзисторных ключей ДПМ1 $VT_{(2,2)}$ и $VT_{(2,3)}$ подаются управляющие импульсы $U_{(2,2)} = U_{(2,3)} = \overline{U_{(3,2)}} = \overline{U_{(3,3)}}$. В результате все конденсаторы ДПМ1 и ДПМ2 участвуют в преобразовании, т.е. $N_1 = 2, N_2 = 1$, и их выходные напряжения $U_A = (N_1 + 1) \cdot E_1 = 3 \cdot E_1$, $U_B = (N_2 + 1) = 2 \cdot E_1$ подаются на входы транзисторных ключей VT_1 и VT_2 в БР. При этом регулировка осуществляется одновременным изменением коэффициентов заполнения γ_1 и γ_2 управляющих импульсов $U_1 = \overline{U_2}$ транзисторных ключей VT_1 и VT_2 соответственно в диапазонах $[0, 1]$ и $[1, 0]$.

Регулировочная характеристика повышающего трехуровневого РПТ (рис. 5) при его работе в прямом направлении показана на рисунке 6а.

Матрицы управления транзисторных ключей МБП при работе РПТ в прямом направлении для заданных диапазонов регулирования U_H имеют вид

$$\begin{array}{ccc}
 U_H = [0, E_1] & U_H = [E_1, 2E_1] & U_H = [2E_1, 3E_1] \\
 N_1=0, N_2=0 & N_1=0, N_2=1 & N_1=2, N_2=1 \\
 \left| \begin{array}{cccc} - & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & X1 & X1 & - & X2 \end{array} \right|, & \left| \begin{array}{cccc} - & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \overline{X2} \\ - & X1 & X1 & - & X2 \end{array} \right|, & \left| \begin{array}{cccc} - & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & \overline{X1} & \overline{X1} & 0 & \overline{X2} \\ - & X1 & X1 & - & X2 \end{array} \right|
 \end{array}$$

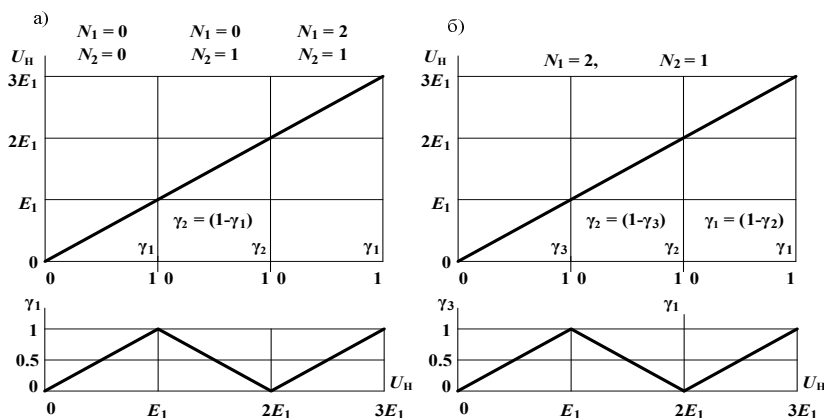


Рисунок 6. Регулировочные характеристики повышающих трёхуровневых РПТ при их работе в прямом направлении

Матрицы управления ключами силовой цепи МБП при работе регулятора в обратном направлении для диапазонов изменения $E_2 = [E_1, 2E_1]$ и $E_2 = [2E_1, 3E_1]$ имеют вид

$$\begin{aligned}
 E_2 &= [E_1, 2E_1] & E_2 &= [2E_1, 3E_1] \\
 N_1 &= 0, N_2 = 1 & N_1 &= 2, N_2 = 1 \\
 \begin{vmatrix} - & 1 & 0 & - & X2 \\ \overline{X1} & 0 & 0 & \overline{X2} & 0 \\ - & 0 & 0 & - & 0 \end{vmatrix}, & \begin{vmatrix} - & X1 & X1 & - & X2 \\ \overline{X1} & 0 & 0 & \overline{X2} & 0 \\ - & 0 & 0 & - & 0 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

Регулировочные характеристики повышающего трёхуровневого РПТ при его работе в обратном направлении приведены на рисунке 7.

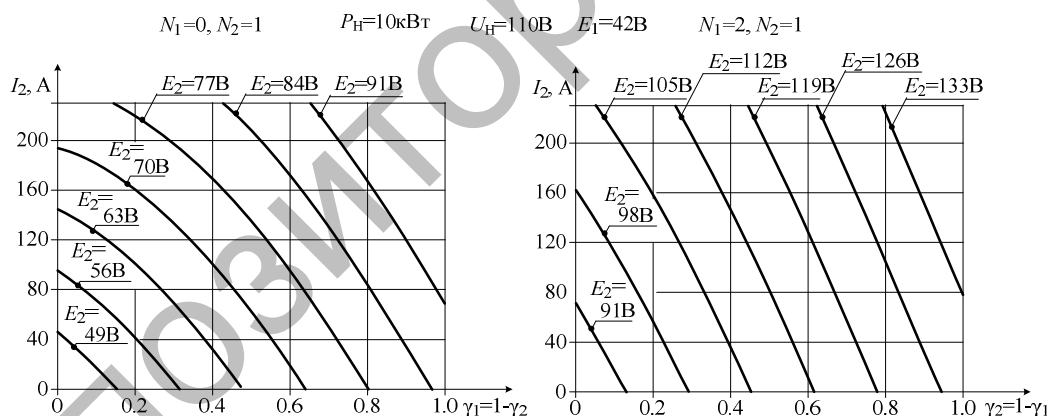


Рисунок 7. Регулировочная характеристика повышающего трёхуровневого РПТ при его работе в обратном направлении

Основным достоинством исследуемого РПТ является простота его БР, который состоит всего лишь из двух регулирующих транзисторных ключей VT_1 и VT_2 . Эффект достигнут благодаря изменению структур ДПМ1 и ДПМ2 в его МБП. А недостаток заключается в том, что изменение количества конденсаторов в ДПМ1 и ДПМ2 сопровождается переходными процессами напряжений на их выходных конденсаторах $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$.. Это ведет к задержке установления напряжений U_A и U_B на время $\tau_n \cong 5 \cdot T_k$. Указанный недостаток устраняется, если в процессе регулирования не изменять структуры ДПМ1 и ДПМ2. Однако в данном случае в БР (рис. 8) необходимо ввести третий регулирующий транзисторный ключ VT_3 .

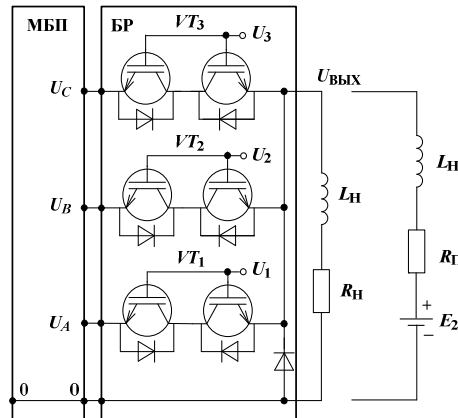


Рисунок 8. Блок регулирования трехуровневого двунаправленного РПТ с неизменяющейся структурой

При этом силовая цепь МБП (рис. 5) не меняется, а режимы управления её транзисторными ключами упрощаются. Матрицы управления транзисторными ключами МБП при работе РПТ в прямом (а) и обратном (б) направлениях в данном случае неизменны во всех диапазонах регулирования и имеют вид

$$\begin{array}{l}
 \text{а) } U_H = [0, 3E_1] \\
 N_1=2, N_2=1 \\
 \left| \begin{array}{cccc} - & 0 & 0 & - & 0 \\ 0 & X1 & X1 & 0 & X2 \\ - & X1 & X1 & - & X2 \end{array} \right|, \\
 \text{б) } E_2 = [E_1, 3E_1] \\
 N_1=2, N_2=1 \\
 \left| \begin{array}{cccc} - & X1 & X1 & - & X2 \\ X1 & 0 & 0 & X2 & 0 \\ - & 0 & 0 & - & 0 \end{array} \right|
 \end{array}$$

Регулировочная характеристика в прямом направлении представлена на рисунке бб. Вид регулировочных характеристик в обратном направлении не изменяется. Отличие заключается в том, что в левом графике (рис. 7) по оси абсцисс следует отложить $\gamma_3 = 1 - \gamma_2$.

Массообъемные показатели РПТ существенно улучшаются заменой ДПМ 1 и ДПМ 2 двунаправленными многотактными резонансными преобразователями ДМРП 1 и ДМРП 2. ДМРП представляет собой k параллельно соединённых, идентичных ДПМ, работающих на общую нагрузку, с временным сдвигом относительно друг друга на величину $\Delta t(k) = \frac{T_n}{k}$, и содержащих по N конденсаторов каждый. Суммарная ёмкость силовой цепи ДМРП

$$C_{\Sigma}(k) = k \cdot N \cdot C_1 = \frac{I_{n \max} \cdot N}{f_n(k) \cdot \Delta U_{c1}} = \frac{I_{n \max} \cdot N}{k \cdot f_n(k=1) \cdot \Delta U_{c1}}$$

снижается обратно пропорционально количеству тактов преобразования k . По сравнению с эквивалентным по мощности однотоктным ДПМ это происходит благодаря пропорциональному увеличению частоты преобразования $f_n(k) = k \cdot f_n(k=1)$ входящих в его состав отдельных ДПМ. $f_n(k=1)$ — частота преобразования эквивалентного по мощности однотоктного ДПМ. Увеличение k ведет также к значительному уменьшению ёмкости $C_{\phi 1}$ [3]. Она уменьшается в $2 \cdot k^2$ раз для нечетных и в k^2 раз — для четных значений k . С целью минимизации коэффициента гармоник входного тока $I_{1\Sigma}(t)$, потребляемого регулятором от первичного источника E_1 в прямом направлении и отдаваемого в источник E_1 при рекуперации, сигналы управления соответствующими транзисторными ключами в ДМРП1 и ДМРП2 — $X1$ и $X2$ сдвигаются относительно друг друга. Временной сдвиг τ_k выбирается из условия минимума квадрата действующего значения суммарного входного тока $I_{1\Sigma}(t)$ — в прямом и выходного тока $I_{2\Sigma}(t)$ — в обратном направлении:

$$I_{1\Sigma Д}^2 = \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_{T_{\Pi}} I_{1\Sigma}^2(t) \cdot dt = \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_{T_{\Pi}} \left[I_{1МРП1}(t) + I_{1МРП2}(t - \tau_k) \right]^2 \cdot dt - \min, .$$

Поскольку постоянные составляющие токов $I_{1МРП1}(t), I_{1МРП2}(t)$ в обоих направлениях не зависят от временного сдвига τ_k , то ясно, что сформулированные критерии означают также минимизацию квадрата действующего значения $I_{1\Sigma д(-)}^2$ переменной составляющей входного тока

$$I_{1\Sigma}(t) = I_{1МРП1}(t) + I_{1МРП2}(t).$$

Решение поставленной задачи для значений $k_1 = k_2 = k \geq 1$ дает следующие выражения для оптимальных временных сдвигов $\tau_k = \frac{T_{п}}{2 \cdot k}$ и $\tau_k = \frac{T_{п}}{4 \cdot k}$. Соответственно для четных и нечетных значений k . Параметры элементов повышающих и понижающих двухуровневых РПТ определяются следующими выражениями:

$$C_1 = \frac{I_{нmax}}{k \cdot f_k \cdot E_1 \cdot \Delta U_{c1}^*}, L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_k^2 \cdot C_1} \text{ — для повышающего трехуровневого РПТ,}$$

$$C_1 = \frac{I_{нmax}}{2 \cdot k \cdot f_k \cdot E_1 \cdot \Delta U_{c1}^*}, L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_k^2 \cdot C_1} \text{ — для понижающего трехуровневого РПТ.}$$

IV. Повышающие трехуровневые двунаправленные РПТ со средней точкой и секционированным входным источником на основе конденсаторных DC-DC конвертеров резонансного типа

Многоуровневые РПТ со средней точкой имеют самый простой МБП (рис. 9). Упрощение достигается применением промежуточных точек в схеме МБП для получения напряжений дискретных уровней $E_1, 2 \cdot E_1, 3 \cdot E_1$, нужных для работы повышающего МРПТ.

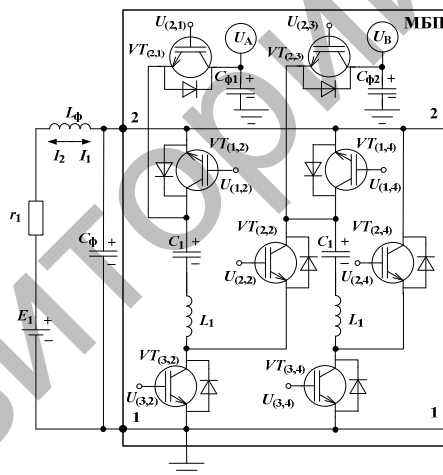


Рисунок 9. Принципиальная схема МБП повышающего трехуровневого РПТ со средней точкой

В повышающем трехуровневом РПТ со средней точкой для получения напряжения $2 \cdot E_1$ используется точка соединения коллектора промежуточного разрядного транзисторного ключа $VT_{(2,2)}$ с положительной обкладкой конденсатора C_1 в ДПМ 1. При этом из силовой цепи МБП исключается ДПМ 2. В итоге силовая цепь повышающего трехуровневого МБП упрощается на три IGBT транзисторных ключа и один конденсатор [4].

Основной недостаток такого РПТ связан с несимметричностью работы его силовой цепи. Она обусловлена различием разрядных токов конденсаторов C_1 различных цепочек. Это затрудняет обеспечение режима мягкой коммутации транзисторных ключей, входящих в состав МБП. При увеличении емкостей конденсаторов C_1 и $C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$ недостаток исчезает. Однако такой способ его устранения ухудшает массообъемные показатели МРПТ в целом. Массообъемные показатели РПТ со средней точкой существенно улучшаются заменой его ДПМ на двунаправленный многотактный резонансный преобразователь (ДМРП) со средней точкой (рис. 10).

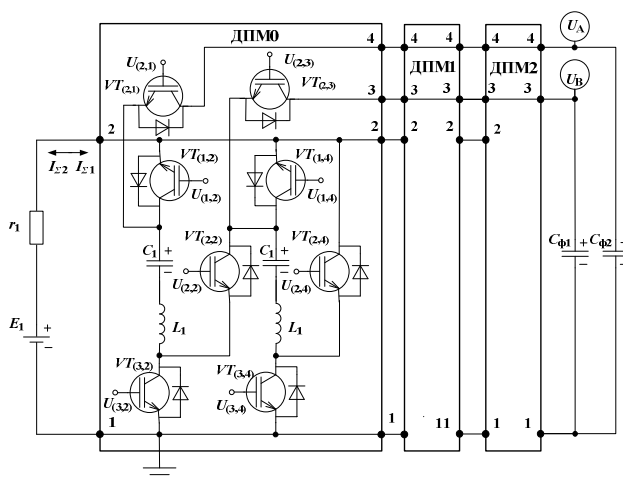


Рисунок 10. Принципиальная схема ДМРП со средней точкой

Вид регулировочных характеристик РПТ со средней точкой в прямом и обратном направлении полностью совпадает с характеристиками, приведенными на рисунках 6 и 7, для трехуровневого РПТ на рисунке 5.

V. Выводы и заключение

Рассмотрены принципы работы и построения двунаправленных многоуровневых РПТ с секционированным входным источником на основе конденсаторных DC-DC конверторов резонансного типа.

Дано понятие матриц управления, дающих представление об алгоритме управления транзисторными ключами силовой цепи РПТ и разрешающих упростить разработку цепи его управления.

Получены регулировочные характеристики РПТ при его работе в прямом и обратном направлении.

Получены формулы для расчета параметров элементов силовой цепи РПТ.

Показано, что использование многотактных РПТ дает возможность не только уменьшить коэффициент гармоник тока потребляемого первичного источника, но и значительно уменьшить величину суммарной емкости его силовой цепи.

Список литературы

- 1 Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Музыченко Н.М. Модуляционные источники питания РЭА. — Томск: Радио и связь, 1990. — С. 336.
- 2 Зотов Л.Г. Конденсаторные повышающие преобразователи с изменяющейся структурой для автономных энергосистем // Электротехника. — 2011. — № 4. — С. 46–50.
- 3 Зотов Л.Г. Резонансные DC-DC конверторы на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных систем энергоснабжения // Радиопромышленность. — 2012. — Вып. 1. — С. 103–113.
- 4 Зотов Л.Г. Двухуровневая система обмена электрической энергией постоянного тока на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных энергосистем // Электротехника. — 2011. — № 7. — С. 52–57.

В.П.Разинкин, Л.Г.Зотов, А.Д.Мехтиев, Н.Т.Исембергенов, В.В.Югай, Г.Б.Валеева

Тұрақты тоқтың конверторлары негізіндегі көпдеңгейлі ИКМ-реттеуіштер

Мақалада көпдеңгейлі екі бағытталған тұрақты тоқтың импульсті-көпдеңгейлі DC-DC конденсаторы негізіндегі резонансты конвертері жайында баяндалды. Реттеуіштер тербелістер мен кіріс және шығыс тоқтың төменгі коэффициенті, жақсартылған көпмассалы көрсеткіштермен және ПӘК-тің жоғары болуымен өзгешеленеді. Нәтиже көптактілі және көпдеңгейлі жұмыс принципі, сонымен қатар реттеуіштің күш тізбегінің құрамына кіретін транзисторлық кілттің жұмсақ коммутациясы арқасында алынды. РПТ күш тізбегінің элементтерінің параметрлерін есептеу үшін теңдеулер келтірілген. Қолданыстағы ток көзінің тербелісінің коэффициентін азайту мүмкіндігі көрсетілген.

V.P.Razinkin, L.G.Zotov, A.D.Mehtiyev, N.T.Isembergenov, V.V.Yugay, G.B.Valeyeva

Multilevel Pulse width regulators based DC converters

The article analyzes the principles of construction and operation of multi-level bi-directional pulse-width controller DC-based capacitor DC-DC converters of the resonance type. Regulators have a low coefficient of harmonics of the input and output current, improved weight and size parameters and high efficiency. Effect is achieved using a Multicycle and tiered of operation, as well as soft-switching of transistor switches are part of the power circuit of the controller. The equations for calculating the parameters of the elements of the main circuit of the DCcontroller. The possibility of reducing the coefficient of harmonic currents consumed by the primary source.

References

- 1 Kobzev A.V., Mikhachenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulation power supply CEA*, Tomsk: Radio i svyaz, 1990, p. 336.
- 2 Zotov L.G. *Electrical Engineering*, 2011, 4, p. 46–50.
- 3 Zotov L.G. *Radio industry*, 2012, 1, p. 103–113.
- 4 Zotov L.G. *Electrical Engineering*, 2011, 7, p. 52–57.