

УДК 620.926

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

*М.А. Дзюба, В.И. Сафонов*

В статье предложен новый способ одновременного увеличения фазности и регулирования величины выпрямленного напряжения для двух 12-фазных мощных выпрямителей, работающих на общую нагрузку. Автономные инверторы напряжения (АИН) формируют необходимые напряжения отдельно для регулирования напряжения и для увеличения фазности. Внесение сформированного напряжения осуществляется при помощи общего вольтодобавочного трансформатора. Разделение функций инверторов и использование общего вольтодобавочного трансформатора позволяет существенно уменьшить суммарную мощность оборудования по сравнению с аналогичными схемами при диапазоне регулирования выпрямленного напряжения до 5 %. Расчет показывает, что мощность АИН для увеличения фазности составляет около 3 % от мощности выпрямителя.

Ключевые слова: 12-фазный мощный выпрямитель, фазосдвигающий трансформатор, регулирование напряжения под нагрузкой, автономный инвертор напряжения.

Для выпрямителей мощных установок электротехнологии очень важны энергетические показатели в точке подключения к электрической сети и возможность регулирования (стабилизации) величины напряжения нагрузки.

Для регулирования величины напряжения используются различные способы, такие как ступенчатое регулирование напряжения трансформаторов под нагрузкой, дроссельное регулирование и т.д. [1]. Наиболее перспективным способом является применение активных преобразователей со звеном постоянного тока [2, 3]. Для 12-фазных и 24-фазных выпрямителей разработаны схемы регулирования с применением преобразователя со звеном постоянного тока и с использованием шин постоянного тока выпрямителей [4]. Однако при существующей элементной базе силовой электроники мощность таких фильтров ограничена техническими и особенно экономическими факторами. Поэтому при плавном регулировании для мощных выпрямителей приходится ограничиваться только регулированием в пределах одной ступени регулирования регулятора под напряжением (РПН) преобразовательного трансформатора.

Для улучшения энергетических показателей в точке подключения к сети применяют компенсированные выпрямители и схемы с большим чис-

лом фаз [5, 6]. Для улучшения качества также применяют активные фильтры, соединенные последовательно и параллельно нагрузке [7].

Поэтому актуальным является поиск новых схемных решений, позволяющих как выполнять улучшение качества электроэнергии, так и регулирование напряжения и при этом снизить установленную мощность оборудования. В работе [8] предложена схема для увеличения эквивалентной фазности двух 12-фазных выпрямителей до 24-фазного режима при обеспечении плавного регулирования напряжения. Схема позволяет решить проблемы качества электроэнергии и регулирования напряжения, и она эффективна при большом диапазоне регулирования напряжения (более 25 % от номинального значения). Если регулирование напряжения не требуется, то для увеличения мощности необходимо трансформаторное оборудование в 13 % от мощности выпрямителя и автономные инверторы мощностью в 13 % от мощности выпрямителя.

В настоящей работе рассмотрен альтернативный вариант схемы, в котором мощность автономных инверторов может быть снижена. Общая 24-фазная схема показана на рис. 1.

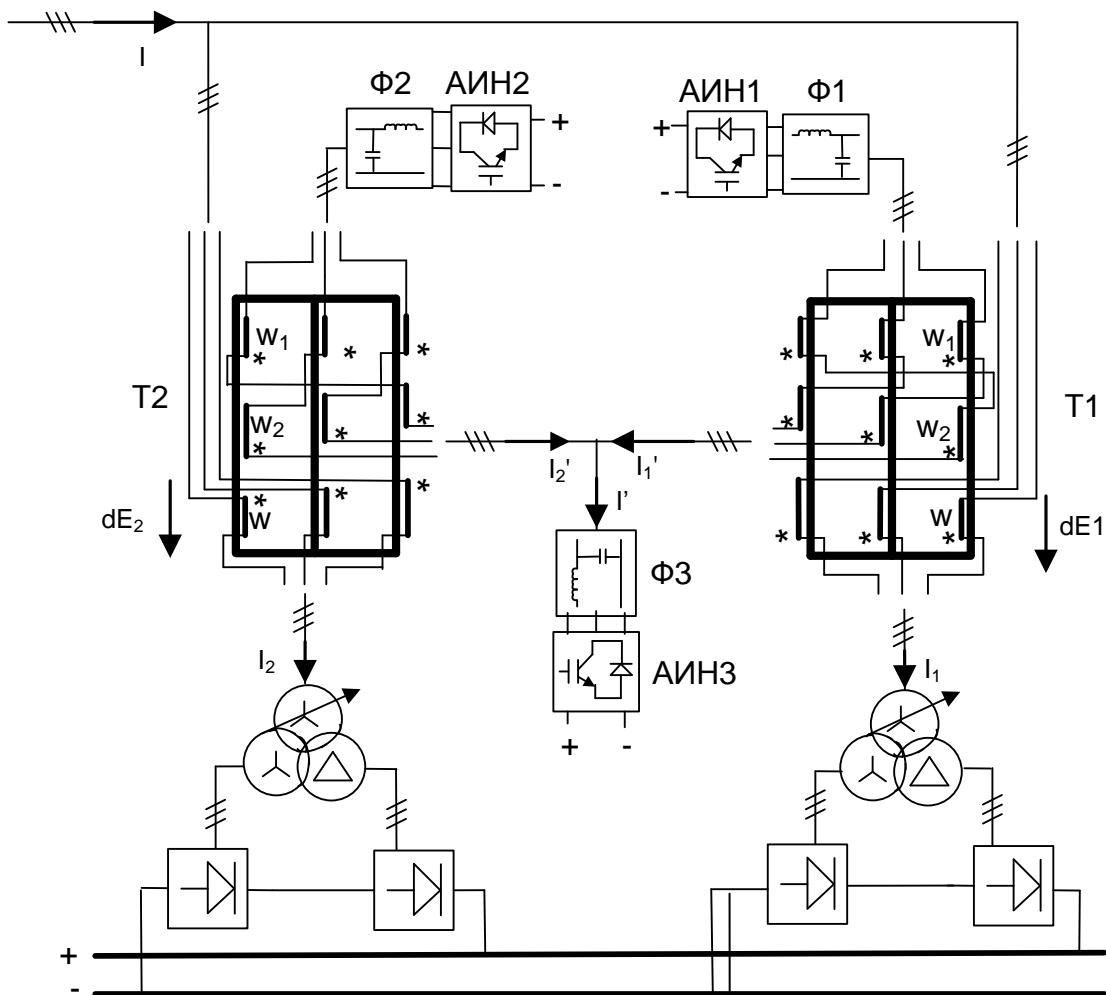


Рис. 1. Схема выпрямителя

АИН1 и АИН2 осуществляют регулирование напряжения и получают (отдают) необходимую для этого активную мощность из сети через преобразователь или от шин постоянного напряжения выпрямителя. АИН3 осуществляет увеличение фазности двух 12-фазных групп до 24-фазного режима работы выпрямителя. При предположении об идеальности элементов АИН3 не потребляет активной мощности и может функционировать с емкостным накопителем энергии. Внесение сформированных преобразователями АИН1-АИН3 напряжений  $dE_1$  и  $dE_2$  в контуры коммутации осуществляется при помощи вольтодобавочных трансформаторов напряжений Т1 и Т2 специальной конструкции.

Начала обмоток Т1 и Т2 обозначены символом «\*». Способ подключения трансформаторов Т1 и Т2 показан на рис. 1. Вторичные обмотки вольтодобавочных трансформаторов соединены в «зигзаг» таким образом, чтобы обеспечивать сдвиг первой гармоники тока на  $+7.5$  и  $-7.5$  эл. градусов. Для этого количество витков обмоток должно удовлетворять соотношению:

$$w_2 = w_1 \sin(7.5^\circ) / \sin(112.5^\circ).$$

При оценке уставленной мощности дополнительного трансформаторного оборудования в схеме (рис. 1) учитывались установленные мощности вольтодобавочных трансформаторов.

Мощности обмоток вольтодобавочного трансформатора от глубины регулирования  $a = U_R / U_F$  ( $U_R$  – величина добавляемого напряжения,  $U_F$  – фазное напряжение сети) имеют вид:

$$S(a) = \frac{S_1(a) + S'_2(a) + S''_2(a)}{2}.$$

Для одной из фаз первичной обмотки и составляющих вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора мощности равны  $S_1(a) = dE_1(a)I_1$ ,  $S'_2(a) = dE'_1(a)I'_1$ ,  $S''_2(a) = dE''_1(a)I'_1$ . Ток вторичной обмотки равен  $I'_1 = I_1 K_T$ , где  $I_1$  – фазный ток сети,  $K_T$  – коэффициент трансформации. Напряжение первичной обмотки создается АИН3 для увеличения фазности  $U' = U_F \sin(7.5^\circ)$  и одним из автономных инверторов АИН1 или АИН2 для регулирования величины напряжения  $U''(a) = aU_F$ . Сдвиг фаз между этими составляющими напряжениями будет равен 90 эл. градусов, следовательно, напряжение обмотки равно:

$$U_{IV}(a) = U_F \sqrt{\sin(7.5^\circ)^2 + a^2}.$$

Вторичная обмотка соединена в «зигзаг», и напряжения на частях обмотки равны:

$$U'_{2V}(a) = \frac{\sin(112.5^\circ)}{\sin(60^\circ)} \frac{U_{V1}(a)}{K_T}, \quad U''_{2V}(a) = \frac{\sin(7.5^\circ)}{\sin(60^\circ)} \frac{U_{V1}(a)}{K_T}.$$

При выполнении расчетов предполагалось, что сдвиг по фазе между током и напряжением сети составляет 15 эл. градусов и мощность выпрямителя  $P_d = 6U_F I_F \cos(15^\circ)$ . Таким образом, относительная (нормированная на мощность выпрямителя) установленная мощность двух 3-фазных вольтодобавочных трансформаторов равна:

$$S'(a) = \frac{6S_V(a)}{P_d} = \frac{\sqrt{\sin(7.5^\circ)^2 + a^2} (1 + (\sin(112.5^\circ) + \sin(7.5^\circ)) / \sin(60^\circ))}{2 \cos(15^\circ)}. \quad (1)$$

Для оценки установленной мощности АИН1, АИН2 и АИН3 предполагалось, что они заменены идеальными источниками ЭДС. Для одной фазы АИН3 мощность равна:

$$S_{3P}(a) = \frac{U_F \sin(7.5^\circ)}{K_T} 2K_T \sqrt{\frac{I_F^2}{11^2} + \frac{I_F^2}{13^2}}.$$

При расчете использовано допущение, что гармоника тока сети для трехфазной мостовой схемы равна  $I_{(n)} = I_{(1)} / n$  и тот факт, что в цепи АИН3 протекают в основном токи 11-й и 13-й гармоник.

Для одной фазы АИН1 и АИН2 мощность равна:

$$S_{1P}(a) = S_{2P}(a) = \frac{U_F a}{K_T \cos(30^\circ)} K_T I_F.$$

Таким образом, относительная (нормированная на мощность выпрямителя) суммарная установленная мощность одной фазы АИН1, АИН2 и АИН3 равна:

$$s'(a) = \frac{a / \cos(30^\circ) + \sin(7.5^\circ) \sqrt{(1/11)^2 + (1/13)^2}}{\cos(15^\circ)}. \quad (2)$$

Расчеты установленной мощности трансформаторного оборудования и установленной мощности преобразователей для альтернативной схемы [8] выполнены аналогичным образом. В каждом случае зависимость определяется выражением:

$$S''(a) = \frac{\sqrt{\sin(7.5^\circ)^2 + a^2}}{\cos(15^\circ)}. \quad (3)$$

Кривые 1 и 3, построенные соответственно по выражениям (1) и (3), представлены на рис. 2. Кривые 2 и 3, построенные соответственно по выражениям (2) и (3), представлены на рис. 3.

Мощность трансформаторного оборудования в рассматриваемом случае несколько выше за счет соединения обмоток вольтодобавочного трансформатора по схеме «зигзаг». Мощность автономных инверторов в рассматриваемом в данной статье случае значительно ниже. Если в схеме нет необходимости регулирования напряжения, то увеличение фазности достигается автономным инвертором, мощность которого составляет 3 % от мощности выпрямителя, против 13 % в альтернативном варианте. Это происходит потому, что в предложенной конструкции ток первой гармоники не попадает на вход инвертора. По мере увеличения глубины регулирования напряжения это отношение сокращается, но в любом случае рассматриваемая схема остается более выгодной.

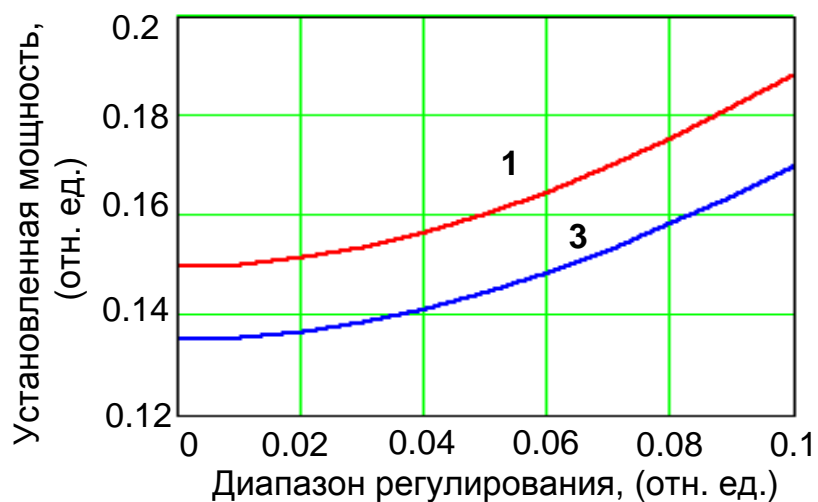


Рис. 2. Зависимость установленной мощности трансформаторного оборудования от диапазона регулирования

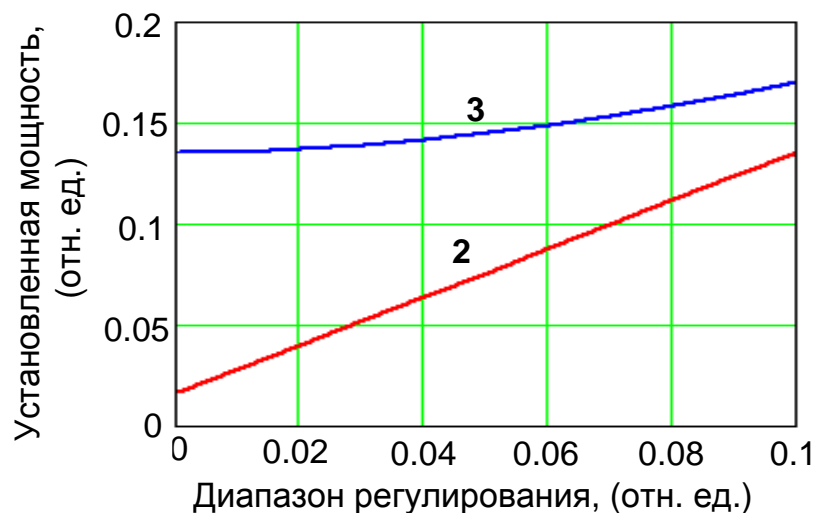


Рис. 3. Зависимость установленной мощности автономных инверторов от диапазона регулирования

## **Выводы**

Предложенная схема позволяет снизить установленную мощность инверторов по сравнению со схемой, в которой регулирование и увеличение фазности выполняется общим инвертором [8]. Проведенные расчеты показали, что при диапазоне регулирования 5 % от выпрямленного напряжения установленная мощность инверторов уменьшается с 20 % до 13 % от мощности выпрямителя.

## **Библиографический список**

1. Coordinate control strategy for current stabilization in an aluminum smelter including on load tap changer / H. Xu, Q. Xu, Y. Gao and H. Liu // *Energy and Power Engineering*. – 2013. – Vol. 5 No. 4B. – P. 1410–1414.
2. Makoschitz, M. Control concepts for hybrid rectifiers utilizing a flying converter cell active current injection unit / M. Makoschitz, M. Hartmann and H. Ertl // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2017. – Vol. 32, no. 4. – P. 2584–2595.
3. Хохлов, Ю.И. Электромагнитные процессы в мощных трансформаторах с векторным регулированием / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // *Электротехника*. – 2016. – № 3. – С. 145–149.
4. Improvement in harmonic reduction of a zigzag autoconnected transformer based 12-pulse diode bridge rectifier by current injection at DC side / S. Vidyasagar, R. Kalpana, S. Bhim, P. Saravana // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2017. – P. 1–11.
5. Thirty-six pulse rectifier scheme based on zigzag auto-connected transformer / X.Q. Chen, C.L. Hao, H. Qiu, and M. Li. // *Archives of Electrical Engineering* – 2016. – No. 1. – P. 117–132.
6. Ma, X.G. The voltage output characteristics of new 24-pulse rectification system under unbalanced source voltage / X.G. Ma, J.T. Xu and M.Z. Lu // *Materials Science and Information Technology, Pts 1–8*, edited by C.S. Zhang. *Advanced Materials Research*, – 2012. – 3820–25.
7. Fujita, H. The unified power quality conditioner: the integration of series active filters and shunt active filters / H. Fujita and H. Akagi // *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Baveno*. – 1996. – Vol. 1996. – P. 494–501.
8. Хохлов, Ю.И. Электромагнитные процессы в некомпенсированном выпрямителе с векторным регулированием / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, П.В. Лонзингер // *Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук*. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 935–941.

[К содержанию](#)