

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ, ПОСТРОЕННОГО ПО МОДУЛЬНОМУ ПРИНЦИПУ, ПРИ РАБОТЕ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Проблема создания преобразователей частоты для двигателей с номинальным напряжением 6-10 кВ актуальна для промышленности Украины. При этом наиболее перспективным путем решения является использование многоуровневых инверторов, что позволяет снизить износ изоляции двигателя. Наиболее острой проблемой является выбор правильной топологии схемы многоуровневого инвертора, которая должна обеспечить использование минимального количества силовых ключей и реактивных элементов на один уровень инвертора. Наибольшее распространение получили схемы многоуровневых инверторов с фиксирующими диодами, «плавающими» конденсаторами, а также схемы, построенные с использованием последовательно соединенных H-мостов. Эти схемы имеют недостатки, связанные с необходимостью применения дорогостоящего многообмоточного трансформатора, сложных алгоритмов выравнивания частичных напряжений, а также существенное увеличение количества ключей при повышении количества уровней на единицу. Кроме того, реализация этих схем невозможна при использовании однотипных ячеек с идентичными характеристиками, что существенно усложняет эксплуатацию преобразователя, а также делает невозможным резервирование ячеек на случай выхода из строя. Поэтому наиболее привлекательными являются схемы многоуровневых инверторов, построенные по модульному принципу. В работе рассматривается преобразователь, схема включения ячеек которого представлена на рис. 1, а на рис. 2 – схема одной ячейки. Все ячейки являются однотипными, как в плане схемы соединений, так и в плане их параметров.

Преобразователи по такой схеме успешно применяются в системах передачи электрической энергии, но их использование в электрическом приводе существенно затруднено, поскольку основной проблемой такого многоуровневого инвертора является использование емкостного делителя для получения частичных напряжений звена постоянного тока, при этом в процессе работы преобразователя происходит изменение величины этого напряжения, а амплитуда этих изменений увеличивается со снижением частоты выходного напряжения инвертора. Это существенно сокращает диапазон регулирования привода, поэтому проблема требует решения, причем более предпочтительным вариантом является использование специальных алгоритмов управления ключами инвертора без необходимости установки дополнительных цепей выравнивания напряжения.

На рис.3 представлена схема замещения инвертора. Исходя из принятых на ней обозначений, уравнения для токов верхнего и нижнего плеча фазы А инвертора можно записать так:

$$i_A = i_{A6} - i_{Aн}; i_{A6} = i_{номА} + 0.5i_A; i_{Aн} = i_{номА} - 0.5i_A. \quad (1)$$

Мощность, потребляемая от конденсаторов верхнего плеча инвертора:

$$P_{сС} = \int 0.5U_{ном} \cdot i_A dt = \int 0.5U_{ном} \cdot I_{Амаз} \cos \omega t dt = \frac{0.5U_{ном} I_{Амаз}}{\omega} \sin \omega t \quad (2)$$

Мощности верхнего и нижнего плеча инвертора можно записать так:

$$P_6 = u_{A6} i_{A6} = \left( \frac{U_{ном}}{2} - u_A - u_{N0} \right) \left( \frac{i_{ном}}{3} - \frac{i_A}{2} + i_{N0} \right) = p_n - p_p; \quad (3)$$

$$P_н = u_{Aн} i_{Aн} = \left( \frac{U_{ном}}{2} + u_A + u_{N0} \right) \left( \frac{i_{ном}}{3} + \frac{i_A}{2} + i_{N0} \right) = p_n + p_p, \quad (4)$$

где  $p_n = \frac{U_{ном} i_{ном}}{6} + \frac{u_A i_A}{2} + \frac{U_{ном} i_{N0}}{2} + \frac{u_{N0} i_A}{2};$

$$p_p = \frac{i_A U_{ном}}{4} + \frac{u_A i_{ном}}{3} + u_A i_{N0} + \frac{u_{N0} i_{ном}}{3} + u_{N0} i_{N0}$$

$u_{N0}$  – напряжение между нулевой точкой нагрузки и нулевой точкой преобразователя.

Из уравнения (2) видно, что колебания напряжения на конденсаторах прямо пропорциональны величине выходного тока инвертора и обратно пропорциональны величине выходной частоты, что и создает трудности при использовании схемы в составе электрического привода. Решение этой проблемы возможно путем использования избыточных комбинаций включения инвертора, но такой способ выравнивания напряжения все равно существенно ограничивает диапазон регулирования электропривода, поскольку, в предельном случае (при нулевой или близкой к ней частоте) на одном полупериоде выходного тока инвертора происходит постоянный заряд одной части плеча инвертора и постоянный разряд другой.

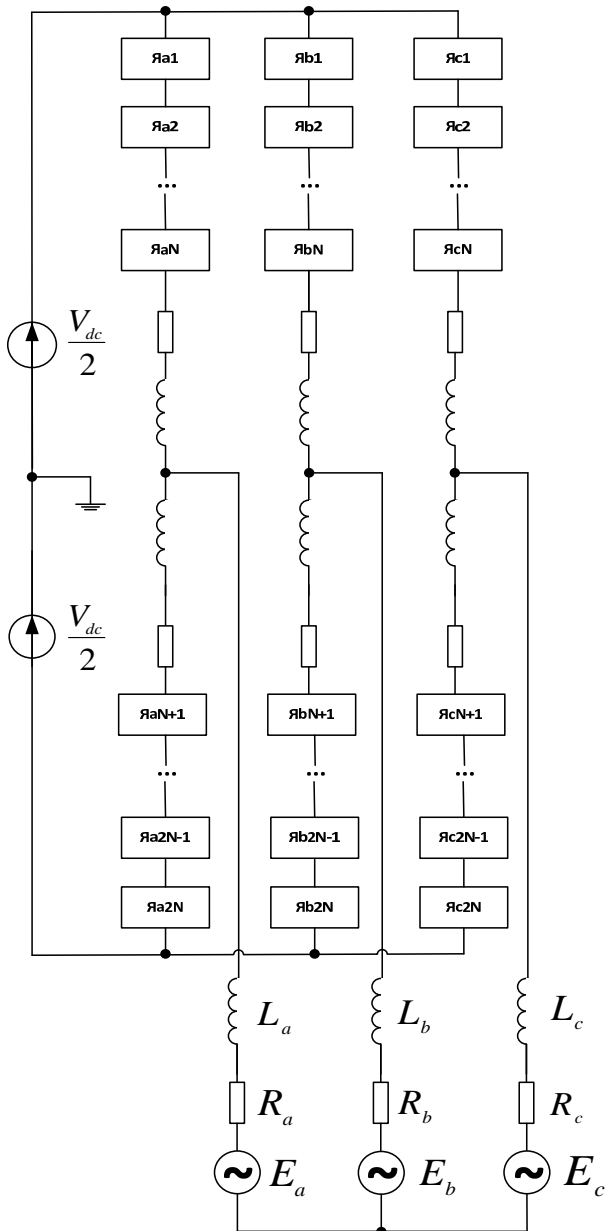


Рис. 1. Структура модульного многоуровневого преобразователя

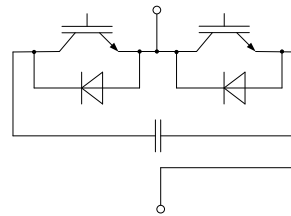


Рис. 2. Структура ячейки многоуровневого преобразователя

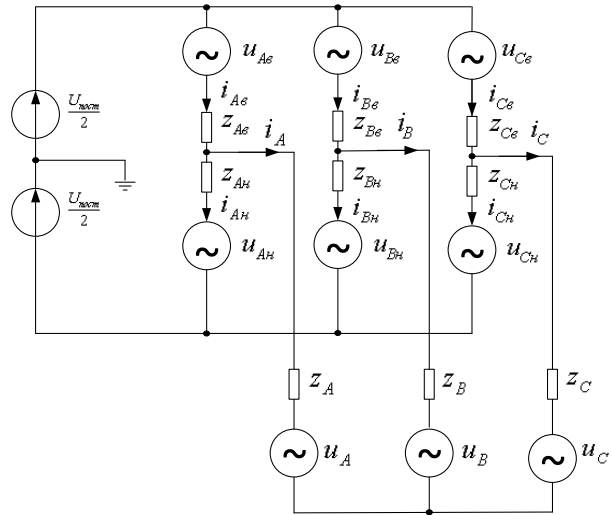


Рис. 3. Схема замещения одного плеча модульного многоуровневого преобразователя

В среде Matlab/Simulink была построена математическая модель многоуровневого инвертора напряжения. Результаты моделирования представлены на рис. 4. По ним видно, что в случае неиспользования избыточных комбинаций включения инвертора, напряжение на конденсаторах может колебаться даже при работе на частоте 50 Гц (рис. 4, а), применение алгоритма выбора комбинации включения в зависимости от напряжения на конденсаторах позволяет существенно сократить амплитуду колебаний (рис. 4, б), но при переходе инвертора на работу с низкой частотой выходного напряжения (5 Гц), амплитуда этих колебаний существенно увеличивается (рис. 4, в), что существенно снижает качество выходного напряжения, а в случае пере-

хода на нулевую частоту происходит безвозвратное перетекание заряда из конденсаторов одной части плеча в конденсаторы другой части плеча, что делает работу инвертора в этом режиме невозможной. В качестве возможного решения проблемы модульного многоуровневого инвертора, связанной с работой на низкой и нулевой частоте, не требующего изменения аппаратной части инвертора, является введение дополнительного сигнала в сигналы управления инвертором. В то же время на этот сигнал накладываются дополнительные требования, связанные с тем, что он не должен влиять, как на выходной ток инвертора, так и на ток, который потребляется инвертором из источника постоянного тока. В то же время, системе управления необходимо контролировать токи, перетекающие из одного плеча инвертора в другое с целью предотвращения возможных аварийных ситуаций, связанных с выравниванием напряжения конденсаторов. Аналитически выражения для максимального перетекающего тока могут быть получены из баланса мощностей с помощью уравнений (3), (4).

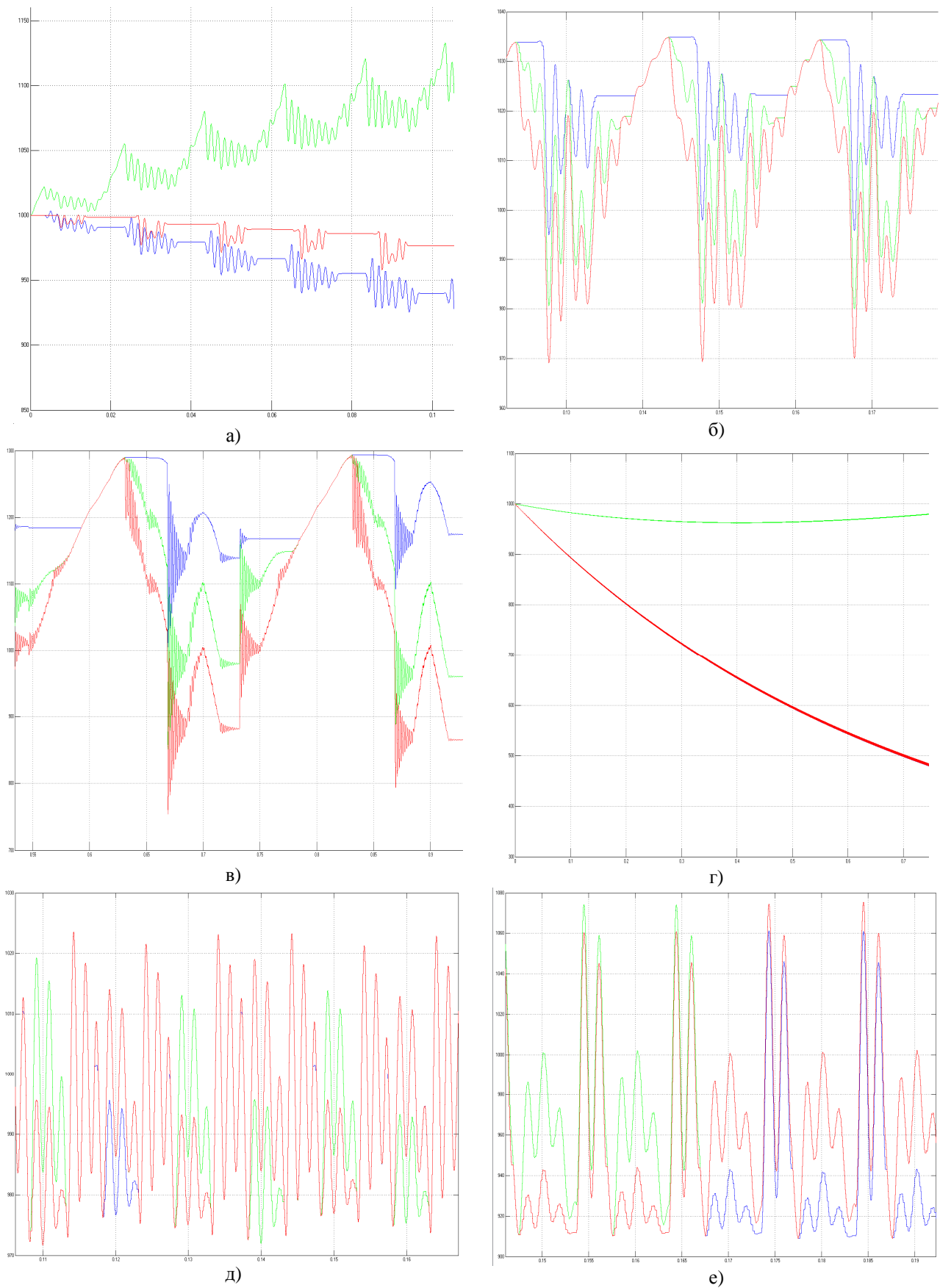


Рис. 4. Результаты моделирования напряжения на конденсаторах верхнего плеча четырехуровневого модульного инвертора при: а) отсутствии блока выбора избыточных комбинаций включения инвертора, частота выходного напряжения – 50 Гц; б) наличии блока выбора избыточных комбинаций включения инвертора, частота выходного напряжения – 50 Гц; в) те же условия, но частота выходного напряжения – 5 Гц; г) те же усло-

вия, но частота выходного напряжения – 0 Гц; д) нулевой выходной частоте и введении дополнительного сигнала амплитудой 30% от величины основного сигнала; е) те же условия, но амплитуда дополнительного сигнала составляет 10% от величины основного сигнала.

Примером такого сигнала может быть синусоидально изменяющийся сигнал нулевой последовательности. На рис. 4, г, д представлены графики изменения напряжения на конденсаторах при нулевой частоте выходного напряжения и разных значениях амплитуды сигнала нулевой последовательности, который вводится в сигналы управления инвертором. Из сравнения этих графиков можно сделать вывод о том, что с уменьшением амплитуды вводимого сигнала, увеличивается величина колебания напряжения на емкостях ячеек преобразователя.

Таким образом, применение предложенного способа позволяет использовать модульный многоуровневый инвертор в широком диапазоне изменения выходной частоты без существенного отклонения напряжения ячеек от их номинального значения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bin Wu High-power converters and AC drives / Bin Wu. – IEEE Press, 2006. – p. 333.
2. Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Кулик О.М. Аналіз можливостей підтримання балансу часткових напруг в ланці постійного струму багаторівневого інвертора з фіксуючими діодами // Вісник Криворізького національного університету, Вип. 30, 2012.
3. Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А., Сінчук І.О. Алгоритм компенсації ефекту «мертвого часу» в трьохрівневих інверторах напруги // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, Вип. 1, 2010.
4. Spichartz M., Staudt V., Steimel A. Analysis of the module-voltage fluctuations of the modular multilevel converter at variable speed drive applications // 13<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012.
5. M. Hagiwara, K. Nishimura, H. Akagi A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter // IEEE Transactions on power electronics, Vol. 25, № 7, 2010.
6. J. Kolb, F. Kammerer, M. Braun Straight forward vector control of the modular multilevel converter for feeding three-phase machines over their complete frequency range // IECON 2011 – 37<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011.