

Д.С. Крылов, О.И. Холод

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ АКТИВНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Розглянуто роботу активного керованого випрямляча-джерела напруги (АВДН) з параметричною та векторною системами управління, які працюють з фіксованою частотою модуляції в складі електроприводу потужністю 315 кВт паралельно з іншими навантаженнями в умовах спотворення напруги джерела живлення. Виконано математичне моделювання АВДН з різними системами управління. Запропоновано критерії визначення якості споживаної електроенергії в точці підключення схеми. Розроблено рекомендації щодо використання систем управління АВДН при роботі зі спотвореною напругою джерела живлення. Бібл. 8, табл. 4, рис. 11.

Ключові слова: активний випрямляч, векторна система управління, параметрична система управління, частота ШІМ, спотворення напруги мережі, спотворення струму мережі, сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень.

Рассмотрена работа активного управляемого выпрямителя-источника напряжения (АВИН) с параметрической и векторной системами управления, работающих с фиксированной частотой модуляции в составе электропривода мощностью 315 кВт паралельно с другими нагрузками в условиях искажённого напряжения источника питания. Выполнено математическое моделирование АВИН с различными системами управления. Предложены критерии определения качества потребляемой электроэнергии в точке подключения схемы. Разработаны рекомендации по использованию систем управления АВИН при работе с искажённым напряжением источника питания. Библ. 8, табл. 4, рис. 11.

Ключевые слова: активный выпрямитель, векторная система управления, параметрическая система управления, частота ШІМ, искажения напряжения сети, искажения сетевого тока, суммарный коэффициент гармонических искажений.

Введение. Активные управляемые выпрямители – источники напряжения (АВИН) всё чаще используются во входных цепях промышленных приводов средней мощности на основе автономных инверторов напряжения, обеспечивая двухсторонний обмен энергией между двигателем и питающей сетью при практически синусоидальной форме тока на входе схемы с нулевым фазовым сдвигом его относительно фазного напряжения [1-3]. Эффективность работы схемы АВИН, обеспечивается, прежде всего, правильным выбором структуры его системы управления [4, 5]. В работе [6] авторами проведен анализ эффективности работы базовых схем систем управления (СУ) АВИН при реализации ими основных функций, возлагаемых на силовую схему преобразователя, а также предложена новая структура СУ на основе теории представления мгновенных токов и напряжений трёхфазной сети в виде обобщённых векторов в $p-q-r$ координатах. Усложнение схемы СУ АВИН оправдано при использовании преобразователя в условиях промышленного цеха, где от общего источника может быть запитано несколько нагрузок, оказывающих взаимное влияние друг на друга, т.е. в условиях, когда в питающем напряжении возможны долговременные искажения.

Цель работы - проверка эффективности работы АВИН с различными типами систем управления в условиях глубоких искажений напряжения трёхфазной трёхпроводной питающей сети.

Структура схемы электропитания привода. Структурная схема исследуемого частотного электропривода средней мощности с использованием трёхфазного активного выпрямителя-источника напряжения приведена на рис. 1.

Она содержит: источник трёхфазного переменного напряжения u_s ; преобразовательный трансформатор Т; входные реакторы АВИН, которые, при

необходимости, могут быть объединены с фильтром высоких частот ФВЧ; активный выпрямитель АВ, выполненный по мостовой схеме на ключах знакопеременного тока; в промежуточной цепи постоянного тока включены два конденсатора C_1 и C_2 одинаковой ёмкости; трёхфазный мостовой автономный инвертор напряжения АИН, также выполненный по мостовой схеме на ключах знакопеременного тока и нагруженный на трёхфазную асинхронную машину Н. Преобразовательный трансформатор Т, в общем случае, может питать и другие нагрузки ДН, подключенные к выводам его вентильных обмоток параллельно исследуемой схеме.

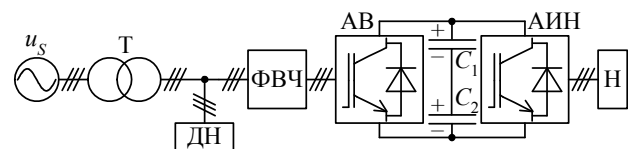


Рис. 1. Структурная схема частотного электропривода с АВИН

На практике данная схема должна содержать ещё коммутационные и защитные аппараты, а также выходящий фильтр инвертора напряжения. Они не представлены на рис. 1, так как не оказывают существенного влияния на работу АВИН и не являются предметом рассмотрения этой статьи.

Для корректного восприятия полученных результатов в рамках последовательно проводимых авторами исследований, параметры основных элементов рассматриваемой системы были взяты такими же, как и в [6].

Прототипом нагрузки был принят асинхронный двигатель фирмы АВВ тип МЗВР 355 SMC4, паспортные данные которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры нагрузки

Параметр	Значение
Линейное напряжение статора, В	400
Номинальная частота, Гц	50
Номинальная мощность, кВт	315
Номинальный ток статора, А	553

Так как исследование динамики работы асинхронного электропривода не является целью данной статьи, а большинство систем управления АВИН легко справляются с задачей рекуперации, модель нагрузки представлена эквивалентной RL -цепью, обеспечивающей выделение на нагрузке аналогичной мощности.

СУ АИН построена по принципу синусоидальной широтно-импульсной модуляции с фиксированной на уровне 4 кГц частотой и глубиной регулирования, задаваемой замкнутой системой автоматического управления с обратной связью по входной мощности инвертора, поддерживаемой в любом режиме на уровне номинальной активной мощности двигателя, т.е. 315 кВт. Равной 4 кГц принята и частота работы коммутатора АВИН во всех режимах.

Суммарная ёмкость звена постоянного тока выбрана равной 28 мФ из условия обеспечения требуемого уровня пульсаций выпрямленного напряжения, как в неуправляемом, так и в активном режиме работы АВ. Величина входной индуктивности фазы АВИН принята равной 150 мкГн, что, в сочетании с имеющейся индуктивностью питающей сети, обеспечивает устойчивую работу схемы во всех режимах.

Мощность короткого замыкания питающей сети в точке подключения преобразователя равна 150 МВА.

Преобразовательный трансформатор установленной мощностью 1 МВА обеспечивает преобразование линейного напряжения питающей сети уровня 6 кВ в линейное 0,4 кВ с возможностью параллельного подключения ещё двух аналогичных преобразователей или другой нагрузки соответствующей мощности.

Критерии оценки качества. При оценке качества потребляемой электроэнергии и уровня влияния преобразователя на питающую сеть необходимо задаться основными критериями, по которым будем оценивать степень успешности применения того или иного технического решения.

Согласно [7, 8] достаточно точно определить степень взаимного влияния преобразователя и питающей сети можно, рассчитав *суммарный коэффициент гармонических искажений THD* (коэффициент искажения синусоидальности кривой) напряжения и тока питающей сети, а также *коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности* в точке подключения преобразователя к питающей сети.

Суммарный коэффициент гармонических искажений определяется [7, 8] как отношение среднеквадратичной суммы высших гармоник сигнала к его первой гармонике и берётся, обычно, в процентах. Для фазного тока и напряжения сети он определяется, как

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} 100\%, \quad (1)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} 100\%, \quad (2)$$

где I_k и U_k – действующие значения k -й гармоники фазного тока и напряжения в точке подключения преобразователя к сети; I_1 и U_1 – действующие значения 1-й гармоники фазного тока и напряжения в точке подключения.

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности можно определить из выражения [7]

$$K_{NS2} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100\%, \quad (3)$$

где $U_{1(1)}$ и $U_{2(1)}$ – действующие значения напряжения соответственно прямой и обратной последовательности основной частоты трёхфазной системы напряжений, которые можно определить, как [7]

$$U_{1(1)} = \frac{1}{12} \sqrt{\left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)} + \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} + U_{AB(1)} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

$$U_{2(1)} = \frac{1}{12} \sqrt{\left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)} - \sqrt{4U_{BC(1)}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} + U_{AB(1)} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

где $U_{AB(1)}$, $U_{BC(1)}$, $U_{CA(1)}$ – действующие значения первых гармоник линейных напряжений питающей сети в точке подключения преобразователя.

Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности [7] в схеме рис. 1 не определяется в связи с отсутствием в ней нулевого провода.

Структура системы управления АВИН. В [6] авторами было показано, что среди следящих структур СУ АВИН с фиксированной частотой модуляции целесообразно применять схему с управлением по напряжению, приведенную на рис. 2.

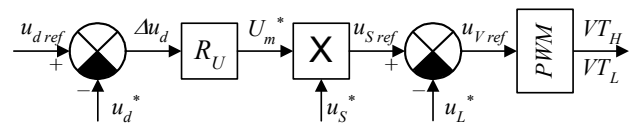


Рис. 2. Структурная схема СУ с управлением по напряжению

Её принцип действия основан на формировании сигнала задания PWM генератора в виде разности напряжения, пропорционального напряжению фазы питающей сети, и падения напряжения на входном

дросселе преобразователя. Это позволяет устранить неопределённость задания фазы тока питающей сети, возникающий при фиксации частоты модуляции схемы, и поддерживать его нулевое значение во всех режимах работы схемы [6]. Недостатком структуры, представленной на рис. 2, является зависимость сигнала задания PWM генератора от формы и фазы питающего напряжения. Это недопустимо в режиме глубоких искажений напряжения питающей сети и может привести к существенному снижению эффективности работы АВИН.

Для борьбы с этим в [6] была предложена структура, формирующая сигнал задания PWM генератора, который получается в результате представления сетевого напряжения и тока в виде пространственных векторов во вращающейся системе координат $p-q-r$ и выделения из их проекций составляющих, пропорциональных прямым последовательностям трёхфазной системы. Это позволило создать структуру системы управления АВИН, приведенную на рис. 3, малочувствительную к искажениям напряжения источника питания.

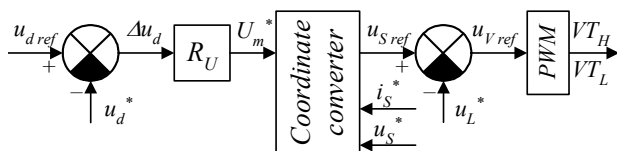


Рис. 3. Структурная схема СУ с векторным управлением.

Моделирование работы схемы. Моделирование работы активного выпрямителя с двумя структурами систем управления было проведено в программном пакете Matlab/Simulink применительно к единой силовой схеме, соответствующей рис. 1. Внешний вид Matlab модели силовой схемы преобразователя, приведен на рис. 4. Она содержит следующие блоки:

- силовая схема – блоки 1, 2, 5, 6, 10-12, 15, 16, 19;
- системы управления – блоки 4, 13, 17;
- датчики токов и напряжений – блоки 3, 7-9, 14;

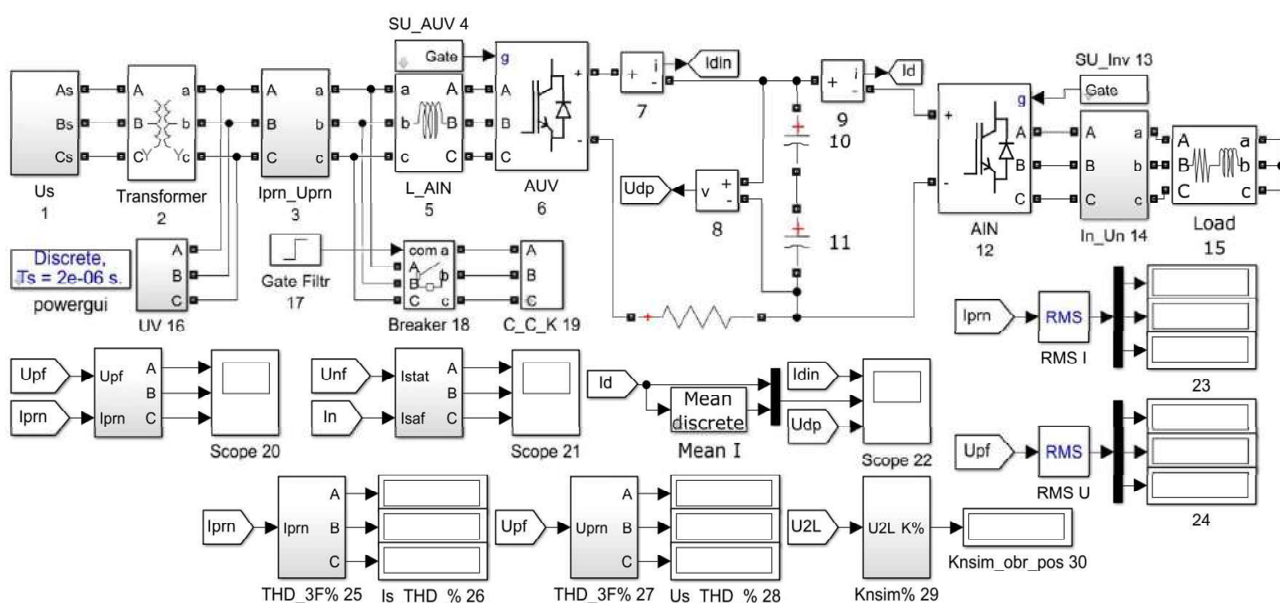


Рис. 4. Matlab модель силовой схемы АВИН

- расчётчики параметров – блоки 25, 27, 29;
- вывода информации – блоки 20-24, 26, 28, 30.

Назначение основных блоков силовой схемы:

1 – сеть трёхфазного переменного напряжения; 2 – силовой трансформатор; 5 – входные реакторы АВИН; 6 – мост АВИН; 10, 11 – ёмкости звена постоянного тока; 12 – мост АИН; 15 – нагрузка; 16 – дополнительная нагрузка; 19 – фильтр высоких частот.

Параметры силовых цепей модели заданы в строгом соответствии с данными силовой схемы электропривода (рис. 1), приведенными выше. Дополнительной нагрузкой схемы (16) является шестипульсовый мостовой управляемый выпрямитель установленной мощностью 300 кВт, работающий с углом управления 60 эл. град. Он вносит в напряжение вентильной обмотки преобразовательного трансформатора коммутационные искажения. Фильтр высоких частот (19) предназначен для борьбы с искажениями в питающем напряжении на частоте работы АВИН. Он может подключаться к схеме через коммутатор (18) в момент времени, задаваемый блоком 17. Блоки расчёта параметров (25, 27, 29) позволяют рассчитать коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, коэффициенты гармонических искажений тока и напряжения каждой фазы вентильной обмотки преобразовательного трансформатора и вывести эти данные в процентах (блоки 26, 28, 30). Блоки 23 и 24 отображают действующие значения тока и напряжения каждой фазы вентильной обмотки трансформатора для оценки их возможной несимметрии. Блоки осциллографов (20-22) позволяют наглядно оценить мгновенные значения параметров схемы.

Моделирование производилось для трёх вариантов работы систем управления АВИН (блок 4): нерегулируемый режим – импульсы управления транзисторами не выдаются и АВИН работает в режиме диодного выпрямителя; режим работы с параметрической СУ по структуре рис. 2; режим работы с векторной СУ по структуре рис. 3.

В качестве долговременных искажающих факторов были приняты: коммутационные искажения, вносимые дополнительной нагрузкой при её параллельной работе с основным преобразователем; снижение питающего напряжения фазы *B* на 10 % от номинального значения; сдвиг напряжения фазы *C* на 130 эл. град. относительно напряжения фазы *B*. Все измерения проводились с включенным фильтром высоких частот.

На рис. 5 приведены временные диаграммы сетевого напряжения и тока для нерегулируемого режима работы (АВИН работает как диодный выпрямитель) при отсутствии дополнительных искажений, вносимых в напряжение питающей сети в результате воздействия внешних факторов. Из диаграмм видно, что форма сетевого тока существенно отличается от синусоиды, а его суммарный коэффициент гармонических искажений (THD_I) в разы превышает предельно допустимые значения, что подтверждают данные, приведенные в табл. 2.

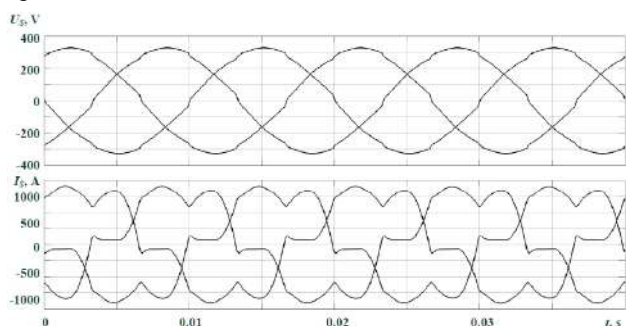


Рис. 5. Напряжение и ток сети в нерегулируемом режиме без искажений параметров сети

Таблица 2

Параметры питающей сети для трёх вариантов работы систем управления АВИН в условиях отсутствия внешних сетевых искажений

Тип схемы	Диодный выпрямитель			Параметрическая СУ АВИН			Векторная СУ АВИН		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
I_2	499,8	499,0	499,9	468	468,1	468,3	467,7	467,8	468,2
U_2	228,2	228,2	228,2	229,4	229,4	229,4	229,4	229,4	229,4
THD_I	25,23	25,37	25,36	2,88	2,86	2,88	2,88	2,85	2,86
THD_U	2,99	2,99	2,99	4,44	4,43	4,44	4,43	4,42	4,43
K_{NS2}	0,002			0,0007			0,0007		

Из табл. 2 также видно, что независимо от типа СУ, АВИН позволяет эффективно устранить нежелательную генерацию в сеть высших гармоник тока и получить нормально допустимые значения THD_I и THD_U .

Анализируя данные из табл. 2 можно говорить об одинаковой эффективности параметрической и векторной СУ АВИН в режиме симметричной неискажённой сети. Временные диаграммы сетевого напряжения и тока для этого случая, приведенные на рис. 6, идентичны для обоих типов СУ.

Внесение симметричных коммутационных искажений от дополнительной нагрузки, работающей параллельно с основным преобразователем, заметно усугубляют картину работы схемы в нерегулируемом

режиме и, согласно табл. 3, дают незначительные преимущества векторной системе управления. Временные диаграммы работы схемы в нерегулируемом режиме приведены на рис. 7. На рис. 8 приведены диаграммы, иллюстрирующие работу АВИН в режиме симметричных искажений, характерные для обеих систем управления.

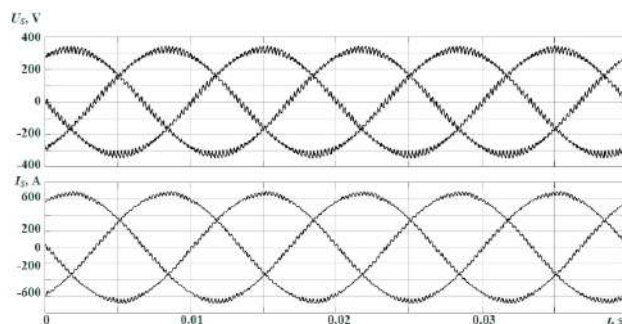


Рис. 6. Напряжение и ток сети с АВИН в режиме симметричного неискажённого источника питания

Таблица 3

Параметры питающей сети для трёх вариантов работы СУ АВИН в условиях внешних симметричных искажений

Тип схемы	Диодный выпрямитель			Параметрическая СУ АВИН			Векторная СУ АВИН		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
I_2	548,0	547,8	549,1	496,9	496,3	496,0	496,6	495,7	496,0
U_2	215,3	215,3	215,3	217,6	217,6	217,6	217,7	217,7	217,7
THD_I	29,75	30,33	30,13	4,95	4,99	5,04	4,75	4,79	4,73
THD_U	7,45	7,43	7,46	9,36	9,39	9,42	9,44	9,47	9,45
K_{NS2}	0,004			0,0006			0,0005		

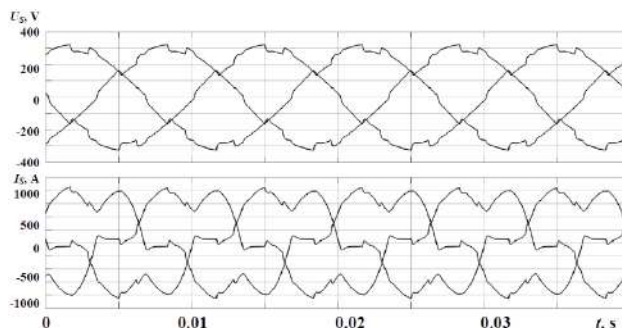


Рис. 7. Напряжение и ток сети в нерегулируемом режиме в условиях внешних симметричных искажений

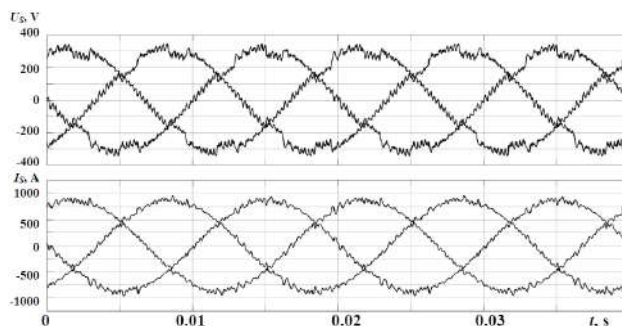


Рис. 8. Напряжение и ток сети с АВИН в условиях внешних симметричных искажений

Оценим качество работы рассматриваемых систем управления, внося дополнительную асимметрию в напряжение питающей сети.

Параметры сети при трёх вариантах работы систем управления АВИН в условия глубоких сетевых искажений

Тип схемы	Без АВИН			Параметрическая СУ			Векторная СУ		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С
I_2	775,6	579,4	516,6	611,6	517,1	576,9	580,6	559,6	572,5
U_2	198,4	168,4	193,7	200,6	170,6	194,2	200,9	170,8	194
THD_I	17,08	39,34	30,8	3,5	3,14	3,48	3,4	2,95	3,47
THD_U	4,15	6,54	7,21	6,31	6,66	8,18	6,39	6,69	8,31
K_{NS2}	9,85			9,5			9,51		

Выводы.

1. В условиях симметричных искажений питающего напряжения предложенная авторами векторная система управления АВИН имеет незначительное преимущество перед параметрической.

2. При наличии несимметрии в напряжении источника питания, АВИН с векторной системой управления потребляет из питающей сети ток, отклонение действующего значения которого от номинального не превышает 2 % в каждой фазе. Отклонение же действующего значения тока фаз от номинала в параметрической системе достигает 10 % как в большую, так и в меньшую сторону. То есть, в режиме глубоких искажений напряжения питающей сети АВИН с векторной системой управления значительно лучше симметрирует потребляемый из трёхфазной сети ток, чем с параметрической.

3. АВИН показал высокую эффективность во всех режимах работы, продемонстрировав допустимые нормами значения для суммарного коэффициента гармонических искажений тока и напряжения сети в точке подключения. Проведенные исследования позволяют говорить, что использование векторных систем управления, по мнению авторов, является наиболее перспективным, а их дальнейшее исследование и оптимизация – актуальной задачей.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Vaideeswaran V., Sankar N. Control Techniques of Three Phase PWM Rectifier. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2018, vol. 8, iss. 2S, pp. 148-152. Available at: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i2s/B10391282S18.pdf> (Accessed 10.10.2020).
- Jamma M., Akherraz M., Barar M. ANFIS Based DC-Link Voltage Control of PWM Rectifier-Inverter System with Enhanced Dynamic Performance. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, 2018, pp. 2219-2224. doi: <https://doi.org/10.1109/iecon.2018.8591620>.
- Premkumar K., Prema Kandasamy, Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S.B. Three-Phase Rectifier Control Techniques: A Comprehensive Literature Survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*, January 2020, vol. 9, iss. 1, pp. 3183-3188. Available at: <http://www.ijstr.org/final-print/jan2020/Three-phase-Rectifier-Control-Techniques-A-Comprehensive-Literature-Survey.pdf> (Accessed 10.10.2020).
- Trinh Q.N., Choo F.H., Tang Y., Wang P. Control Strategy to Compensate for Current and Voltage Measurement Errors in

На рис. 9-11 приведены временные диаграммы сетевого напряжения и тока для трех режимов работы СУ АВИН в условиях внешних несимметричных искажений источника питания.

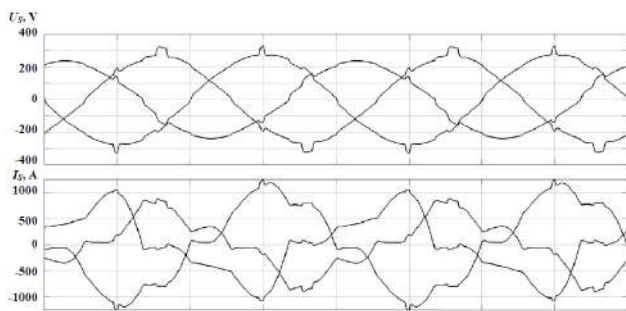


Рис. 9. Напряжение и ток сети в нерегулируемом режиме в условиях глубоких несимметричных искажений

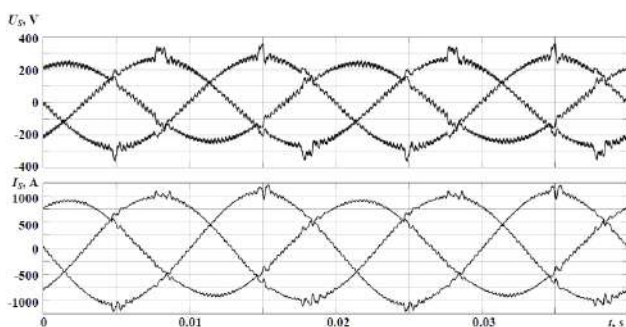


Рис. 10. Напряжение и ток сети с параметрической СУ в условиях глубоких несимметричных искажений

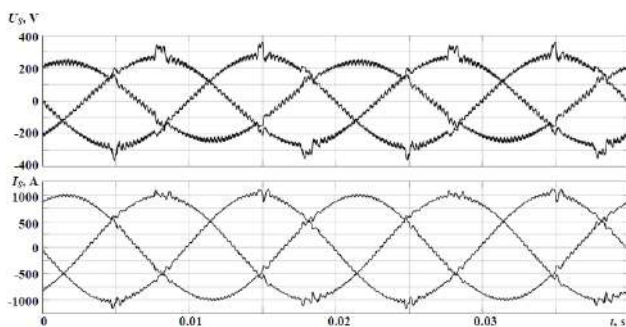


Рис. 11. Напряжение и ток сети с векторной СУ АВИН в условиях глубоких несимметричных искажений

В табл. 4 приведены показатели оценки качества сети при глубоких несимметричных искажениях напряжения источника питания для трех режимов работы СУ АВИН.

Анализ полученных данных показывает, что при глубоком искажении параметров сети и работе АВИН в неуправляемом режиме сетевой ток и напряжение существенно отличаются от синусоиды, присутствует асимметрия токов и напряжений по фазам, превышены показатели THD_I и THD_U . При работе АВИН в таких условиях векторная СУ оказывается уже ощутимо более эффективной, чем параметрическая – она значительно лучше симметрирует потребляемые из сети токи.

Значения THD_I и THD_U при работе двух типов СУ практически одинаковы и соответствуют нормам [8]. Улучшить симметрию питающих напряжений не позволяет ни одна из рассмотренных СУ.

Three-Phase PWM Rectifiers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, May 2019, vol. 55, no. 3, pp. 2879-2889. doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2019.2894107>.

5. Zhou D., Li X., Tang Y. Multiple-Vector Model-Predictive Power Control of Three-Phase Four-Switch Rectifiers With Capacitor Voltage Balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jul. 2018, vol. 33, no. 7, pp. 5824-5835. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2017.2750766>.

6. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 273-278. doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263226>.

7. Tlili F., Bacha F., Guesmi M. New switching lookup table for direct power control of a three-phase PWM rectifier. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia, 2018, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/irec.2018.8362513>.

8. *IEEE STD 519-2014*. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>.

Поступила (Received) 10.11.2020

Принята (Accepted) 29.12.2020

Опубликована (Published) 05.04.2021

Крылов Денис Сергійович¹, к.т.н., доц.,
Холод Ольга Ігорівна¹, к.т.н., старший викладач,

¹ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: Denis.Krylov@khipi.edu.ua, Olha.Kholod@khipi.edu.ua

D.S. Krylov¹, O.I. Kholod¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The efficiency of the active controlled rectifier operation in the mains voltage distortion mode.

Goal. Checking the efficiency of the active rectifier with differences types of control systems in conditions of deep voltage distortions of a three-phase three-wire supply network. **Methodology.**

The authors have used the Matlab/Simulink software environment to create a model of an active rectifier with various types of control systems as part of a frequency electric drive. We performed a series of simulations of the operating modes of an active rectifier with various control systems when the supply voltage is distorted.

Results. When the active rectifier is operating in an unregulated mode, the distortions of the current and mains voltage exceed the maximum permissible values. The quality indicators of the mains current and mains voltage are significantly higher than the normally permissible values. In the absence of voltage distortions in the supply network, the operation of the active rectifier can effectively eliminate the distortions of the mains current, regardless of the type of control system of the active rectifier. In conditions of deep distortions of the supply network voltage, the operation of an active rectifier with a vector control system is more efficient than with a parametric control system. **Originality.** Criteria for determining the quality of consumed electricity at the connection point of the circuit are proposed. **Practical significance.** Recommendations have been developed for the use of active rectifier control systems when working with a distorted power supply voltage. References 8, tables 4, figures 11.

Key words: active rectifier, vector control system, parametric control system, PWM frequency, mains voltage distortion, mains current distortion, total harmonic distortion.