

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАБОТУ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

ВЕЙНГЕР А. М., МЕДВЕДЕВ В. Н.

*Работа посвящена одной из сторон важнейшей проблемы – иммунитета регулируемого электропривода по отношению к возмущениям в питающей сети. Нарушение симметрии напряжений – один из наиболее вероятных видов возмущений. Введены критерии оценки иммунитета. Исследовано влияние данного вида возмущений на примере конкретного электропривода – высоковольтного регулируемого асинхронного электропривода PowerFlex 7000.*

*The work is dedicated to one of the most important problem – immunity of a controlled drive to disturbances in supply system. Disturbance in symmetry of supply voltages (voltage unbalance) is one of the most probable disturbances. Criteria are proposed to valuation of the immunity. Influence of this kind of disturbance is investigated for an example – MV asynchronous controlled drive PowerFlex 7000.*

## ЗАДАЧИ СТАТЬИ

Возмущения в питающей сети оказывают существенное влияние на работу регулируемых электроприводов. Во многих случаях это влияние даже более существенно, чем влияние возмущений со стороны механизма и со стороны оператора (системы верхнего уровня). На работу электропривода оказывают влияние отклонения модуля вектора напряжений, искажения напряжений, нарушение симметрии системы 3-фазных напряжений.

Международным и отечественным стандартами в отношении качества питающих напряжений, [1] – [3], установлены нормально допустимые и предельные отклонения. Предельные отклонения нормируются для вероятности 5 % при времени усреднения 24 ч. Это – достаточно продолжительные отклонения. Электропривод должен нормально работать с сохранением всех основных характеристик в условиях предельных отклонений.

Однако в питающей сети возникают также аварийные отклонения. Возможности регулируемых электроприводов в отношении иммунитета к аварийным отклонениям

мало исследованы. Поэтому уставки защит оборудования по отношению к питающей сети обычно недалеко выходят за рамки предельных отклонений, соответствующих Стандартам, что зачастую приводит к неоправданному отключению оборудования и остановке технологического процесса. Нахождение допустимых границ уставок защит от возмущений питающей сети, при которых сохраняется работоспособность оборудования, – важная задача, которая поможет сократить потери, вызванные остановкой технологического процесса.

В данной работе рассмотрен только один вид возмущения в питающей сети – нарушение симметрии питающего 3-фазного напряжения. Однако, этот вид возмущений имеет наивысшую вероятность, [4], [5].

Задачи работы:

1. Разработка предложений в отношении показателей для оценки режимов при возмущении в сети.
2. Исследование режимов на примере высоковольтного регулируемого электропривода PowerFlex 7000.
3. Разработка рекомендаций по выбору уставок защиты от нарушения симметрии.

## **ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ**

### ***Показатели с их приоритетностью***

Очевиден перечень показателей с убывающей приоритетностью:

1. Сохранение электропривода в работе.
2. Сохранение момента и скорости.
3. Сохранение в необходимых пределах пульсаций момента.
4. Сохранение в необходимых пределах искажений токов статора и токов, потребляемых от сети.

### ***Показатель искажения токов***

Использован векторный показатель искажения тока, [6], наиболее полно учитывающий факторы искажения. Для тока статора этот показатель выражается следующим образом:

$$I_{sD} = \sqrt{\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} |\mathbf{i}_s(t) - \mathbf{i}_{Fs}(t)|^2 dt}. \quad (1)$$

Здесь  $T_M$  – время измерения,  $\mathbf{i}_s$  – изображающий вектор токов статора в системе координат, вращающейся синхронно, например, с полем двигателя,  $\mathbf{i}_{Fs}$  – фильтрованный вектор токов статора в этой же системе координат:

$$\mathbf{i}_{Fs}(t) = \frac{1}{1 + T_F p} \mathbf{i}_s(t). \quad (2)$$

Постоянная времени фильтра  $T_F$  также является одним из параметров измерения показателя искажения.

## ПРИНЯТЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ НАРУШЕНИЙ СИММЕТРИИ В СЕТИ

Рассматриваются возмущения в сети, возникающие при однофазном (междуфазном) к. з. на одном из ответвлений сети или при подключении к сети мощного двигателя с разрывом в цепи одной из фаз. Именно такой вид возмущений имеет наибольшую вероятность; например, в [5] указано, что 85 % провалов напряжения – именно такого вида. В таком режиме имеет место глубокий провал одного из линейных напряжений и некоторое снижение остальных линейных напряжений. Упрощенная расчётная схема и фазорная диаграмма представлены на рис. 1.

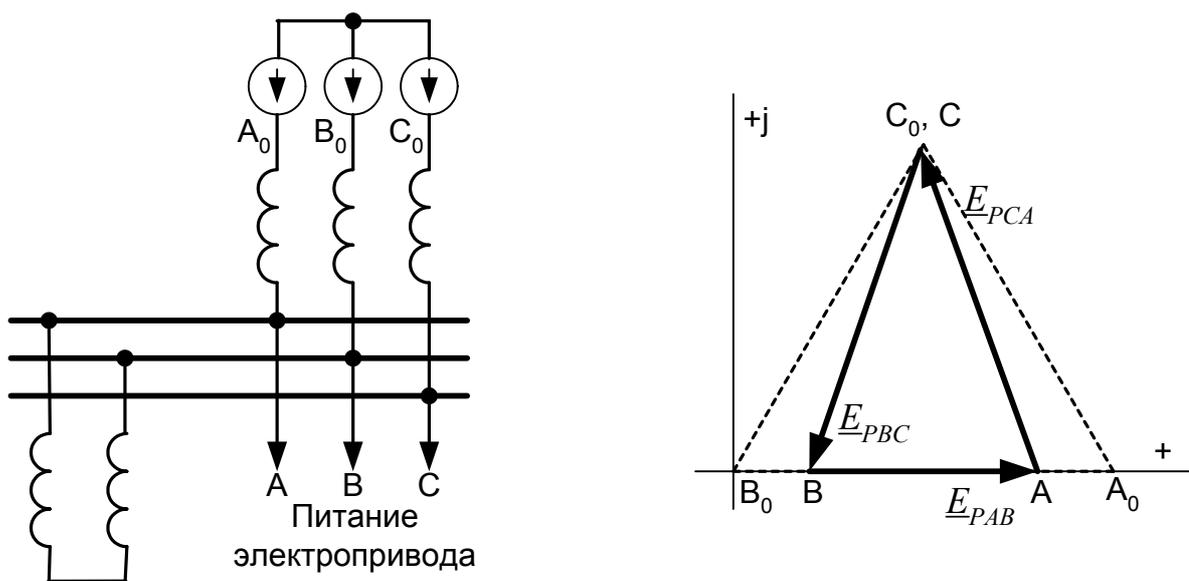


Рис. 1. Расчётная схема и фазорная диаграмма для нарушения симметрии

В данном режиме возникает напряжение обратной последовательности и несколько уменьшается напряжение прямой последовательности. Степень нарушения симметрии определяется относительным напряжением обратной последовательности  $U_{P2}/U_{PN}$ .

Фазорная диаграмма рис. 1 не учитывает токов от регулируемого электропривода. Поэтому напряжения диаграммы могут рассматриваться как эквивалентные ЭДС трехфазного источника  $\underline{E}_{PAB}$ ,  $\underline{E}_{PBC}$ ,  $\underline{E}_{PCA}$ , которым может быть представлена сеть по отношению к электроприводу.

# ИССЛЕДУЕМЫЙ ПРИМЕР ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## Общая структура

В качестве примера исследован регулируемый асинхронный электропривод насоса, в состав которого входят: асинхронный двигатель и преобразовательно-регулирующее устройство (ПРУ) PowerFlex 7000 на основе инвертора тока с ШИМ компании Rockwell Automation. Функциональная схема представлена на рис. 2.

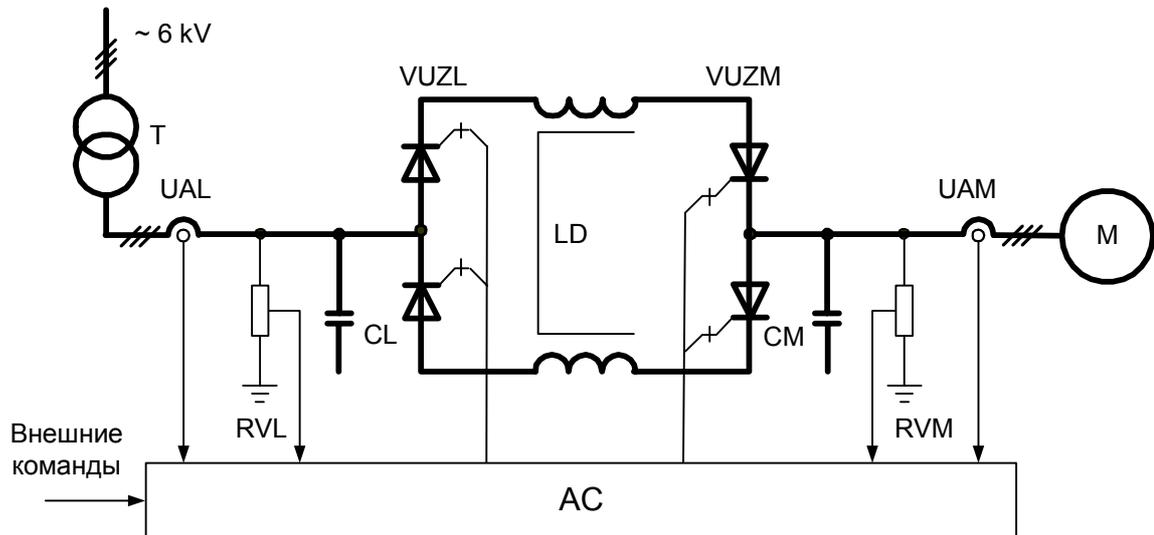


Рис. 2. Функциональная схема исследуемого электропривода

В состав ПРУ входят: мостовые преобразователи  $VUZL$ ,  $VUZM$  на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов, конденсаторные батареи фильтров  $CL$ ,  $CM$ , сглаживающий реактор выпрямленного тока  $LD$ , трансформатор  $T$ , устройство управления  $AC$ , а также элементы обратной связи по токам и напряжениям. Преобразователь  $VUZL$  преобразует входное напряжение в регулируемый выпрямленный ток; преобразователь  $VUZM$  преобразует выпрямленный ток в двуполярные пакеты импульсов; высокочастотные составляющие этих пакетов фильтруются конденсаторной батареей  $CM$ . Входные токи преобразователя  $VUZL$  также представляют собой двуполярные пакеты импульсов; высокочастотные составляющие фильтруются батареей  $CL$ .

## **Воздействие нарушения симметрии питающих напряжений**

Нарушение симметрии питающих напряжений воздействует на данный вид электропривода по следующим направлениям:

1. В выпрямленном напряжении возникает дополнительная составляющая пульсаций с периодом, равным полупериоду питающих напряжений; соответственно увеличиваются пульсации выпрямленного тока. Это вызывает

повышенное искажение токов статора и токов, потребляемых от сети. Повышенное искажение токов статора увеличивает пульсации момента.

2. При снижении линейных напряжений по расчётной схеме рис. 1 снижается постоянная составляющая выпрямленного напряжения. При достаточно высокой степени искажения сниженное выпрямленное напряжение не позволяет реализовать номинальный режим электропривода. Система автоматического регулирования снижает поток двигателя и уровень ограничения момента. Если электропривод работал с номинальной скоростью и полной нагрузкой, при сильном искажении система снижает скорость электропривода.
3. Управление преобразователем *VUZL* синхронизировано с питающими напряжениями. При несовершенстве синхронизации и сильном нарушении симметрии питающих напряжений возможно нарушение синхронизации.

### **Параметры электропривода в исследованном примере**

Механизм – насос. Номинальные данные асинхронного двигателя: 1600 кВт, 1490 об/мин, 6 кВ, 190 А, 50 Гц.

Электромеханическая постоянная времени электропривода  $T_j = 0.8$  с. Относительные значения: постоянной составляющей момента нагрузки  $M_{c0} = 0.1$ , квадратичной составляющей момента при базовой скорости  $M_{c2} = 0.7$ .

## **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Виртуальный стенд**

Экспериментальное исследование выполнено на виртуальном испытательном стенде высоковольтных электроприводов. В состав стенда входят шкаф управления серийного электропривода PowerFlex 7000 и компьютерная модель силовой части электропривода, работающая в реальном времени. Из шкафа управления в компьютерную модель поступают логические команды проводящего состояния для каждого плеча преобразователя частоты. Из модели в шкаф управления поступают аналоговые сигналы обратной связи по напряжениям и токам. В состав компьютерной модели входят модели механизма, двигателя, силовой части преобразовательно-регулирующего устройства, питающей сети.

Соответствие процессов стенда и реальных электроприводов было подтверждено многократно.

## **Представление переменных и параметров**

Все переменные и параметры, кроме времени и постоянных времени, представлены в как относительные величины. В качестве базовых значений приняты:

- базовое напряжение – амплитуда номинального фазного напряжения двигателя  $U_b = U_{phNm}$ ;
- базовый ток – амплитуда номинального фазного тока двигателя  $I_b = I_{Nm}$ ;
- базовая угловая частота – номинальная угловая частота двигателя  $\Omega_b = \Omega_N$ ;
- базовая угловая скорость – номинальная синхронная угловая скорость двигателя  $\Omega_{MB} = \Omega_{MN}$ .

Базовое значение тока трансформатора  $I_{Tb}$  связано с током  $I_b$  соотношением  $I_{Tb} / I_b = U_N / U_{T2N}$ , где  $U_{T2N}$  – номинальное вторичное напряжение трансформатора.

Следует отметить, что при выбранных базовых значениях номинальный момент двигателя не совпадает с базовым моментом. Относительное значение номинального момента в рассматриваемом примере составляет  $M_N = 0.816$ .

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Установившиеся режимы электропривода**

Исследованы режимы при скорости электропривода в пределах  $v = 0.6-1$  при искажении питающих напряжений в пределах  $E_{P2} / U_{PN} = 0-0.16$ . Режимы при более сильном нарушении симметрии не рассматриваются: в таких случаях общее снижение линейных напряжений сети вызывает отключение электропривода защитой минимального напряжения с выдержкой времени 1-2 периода.

На рис. 3, 4 в качестве примера представлены осциллограммы установившегося режима при скорости  $v \approx 1$  и симметричном питании.

Зарегистрированы переменные:  $i_D$  – выпрямленный ток,  $i_{FSA}$  – фазная компонента фильтрованного вектора тока статора,  $i_{SA}$  – фазный ток статора,  $M$  – электромагнитный момент,  $|\Delta \mathbf{i}_T|$  – модуль отклонения вектора первичного тока трансформатора от фильтрованного вектора,  $|\Delta \mathbf{i}_s|$  – модуль отклонения вектора тока статора от фильтрованного вектора.

По данным, представленным на рис. 4, рассчитаны среднеквадратичные отклонения векторов тока статора и трансформатора  $I_{sD}$ ,  $I_{TD}$ , а также среднеквадратичные отклонения выпрямленного тока и момента от их средних значений  $\Delta i_{D.RMS}$ ,  $\Delta M_{RMS}$ . Время измерения составляет  $T_M = 5$  с, число точек на этом интервале  $N = 50000$ , постоянная времени для фильтров векторов тока  $T_F = 1$  с. Такие же процессы, как представленный на рис. 4, зарегистрированы в указанных ранее

диапазоне скорости и диапазоне нарушения симметрии питающих напряжений. В табл. 1 представлены результаты измерений для номинальной скорости  $v \approx 1$ .

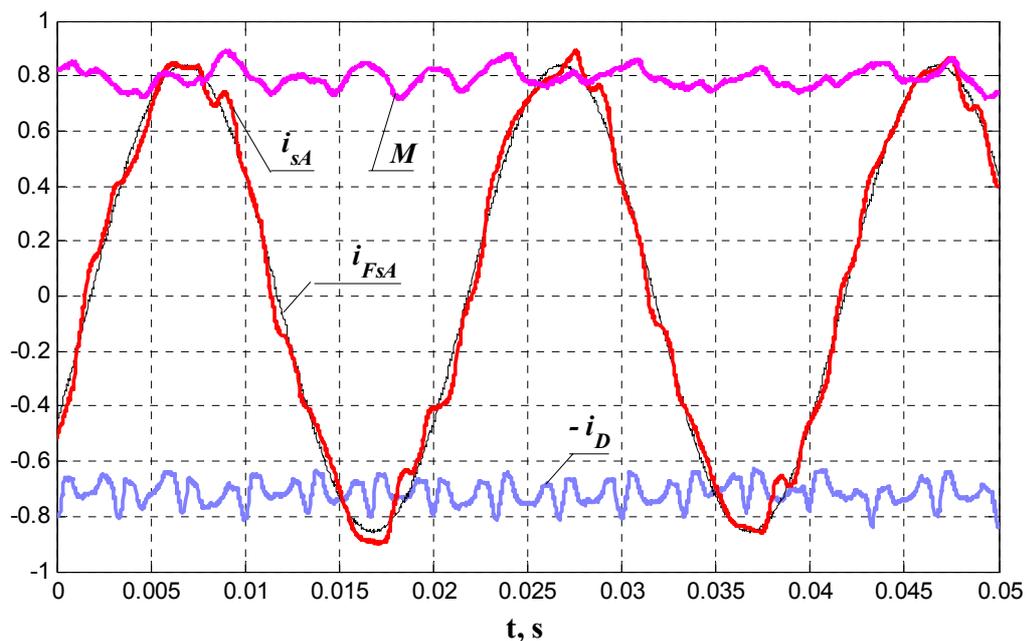


Рис. 3. Установившийся режим при симметричном питании

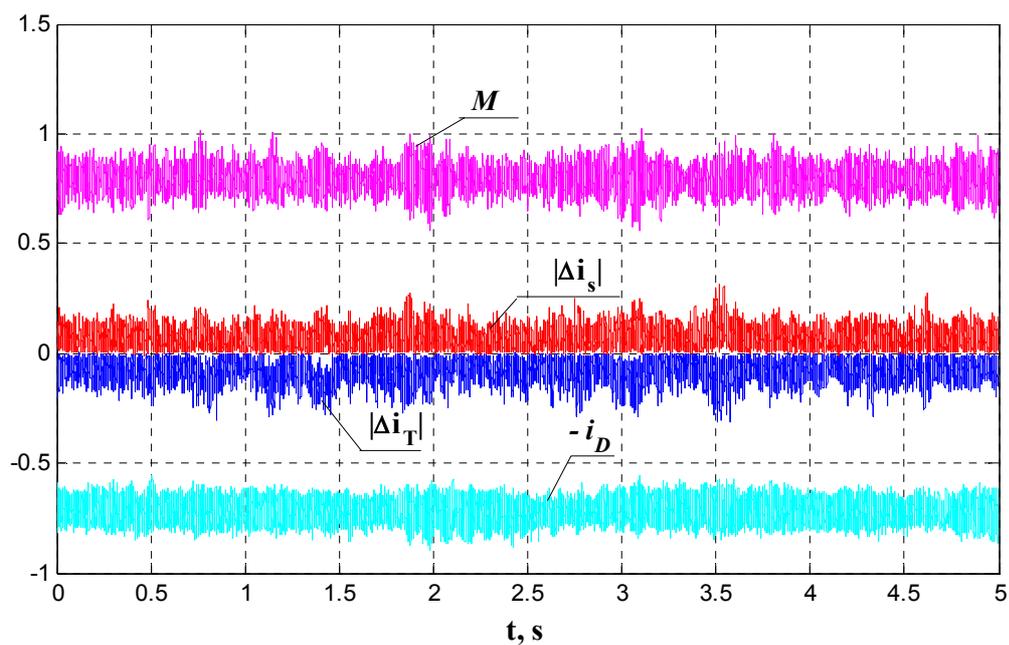


Рис. 4. Осциллограмма для расчёта среднеквадратичных отклонений

Таблица 1

**Режимы электропривода при нарушении симметрии питающих напряжений**

Показатели режима	Напряжение обратной последовательности $E_{P2} / U_{PN}$			
	0	0.04	0.10	0.16
Среднее значение момента $M_{av}$	0.80	0.80	0.79	0.71

Среднеквадратичное отклонение выпрямленного тока $\Delta i_{D,RMS}$	0.046	0.047	0.063	0.084
Среднеквадратичное отклонение вектора тока трансформатора $I_{TD}$	0.099	0.106	0.179	0.230
Среднеквадратичное отклонение вектора тока статора $I_{sD}$	0.091	0.094	0.126	0.155
Среднеквадратичное отклонение момента $\Delta M_{RMS}$	0.059	0.060	0.079	0.106

Измерения показывают, что режим с нарушением симметрии  $E_{P2} / U_{PN} = 0.04$ , предельно допустимый по отечественному Стандарту, практически не отличается от режима с симметричным питанием; электропривод может продолжительно работать в таком режиме.

При увеличении напряжения обратной последовательности до значения  $E_{P2} / U_{PN} = 0.1$  среднеквадратичное отклонение выпрямленного тока возрастает примерно в 1.35 раза. Примерно в таком же отношении возрастают среднеквадратичные отклонения вектора тока статора и момента. Среднеквадратичное отклонение вектора тока трансформатора возрастает в 2.3 раза. Электропривод сохраняет момент и скорость. Он в состоянии продолжать работу в течение достаточного времени, пока не восстановится нормальный режим системы электроснабжения.

При значительно более сильном нарушении, при  $E_{P2} / U_{PN} = 0.16$ , существенно нарастают искажения токов и момента. Однако самое важное, под действием системы регулирования снижается скорость электропривода – это отражается в снижении среднего момента. Минимальное линейное напряжение сети в этом режиме составляет всего 68 % номинального напряжения; снижены и остальные линейные напряжения. Этого недостаточно для поддержания номинальной скорости при номинальном магнитном потоке двигателя. Следует отметить, что режим электропривода не является аварийным. Однако он допустим лишь на несколько секунд.

Режимы электропривода при пониженной скорости имеют такие же особенности, но снижение скорости при повышенном искажении не происходит.

### **Переходные процессы**

На рис. 5, 6 представлены процессы при скачкообразном нарушении симметрии и скачкообразном её восстановлении. Рассматривается глубокое нарушение симметрии, до значения  $E_{P2} / U_{PN} = 0.16$ .

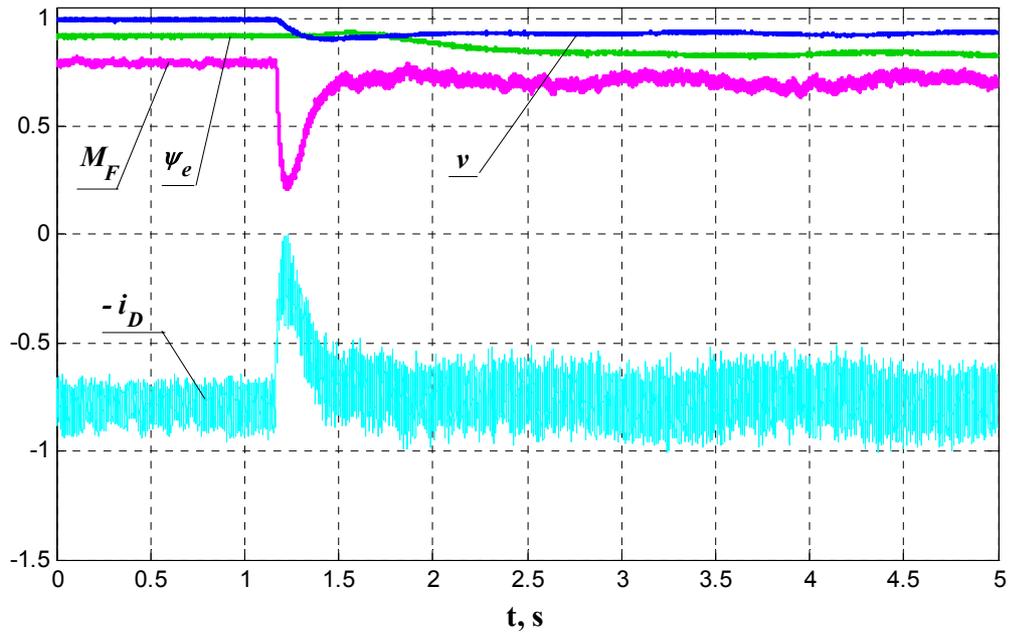


Рис. 5. Скачкообразное нарушение симметрии

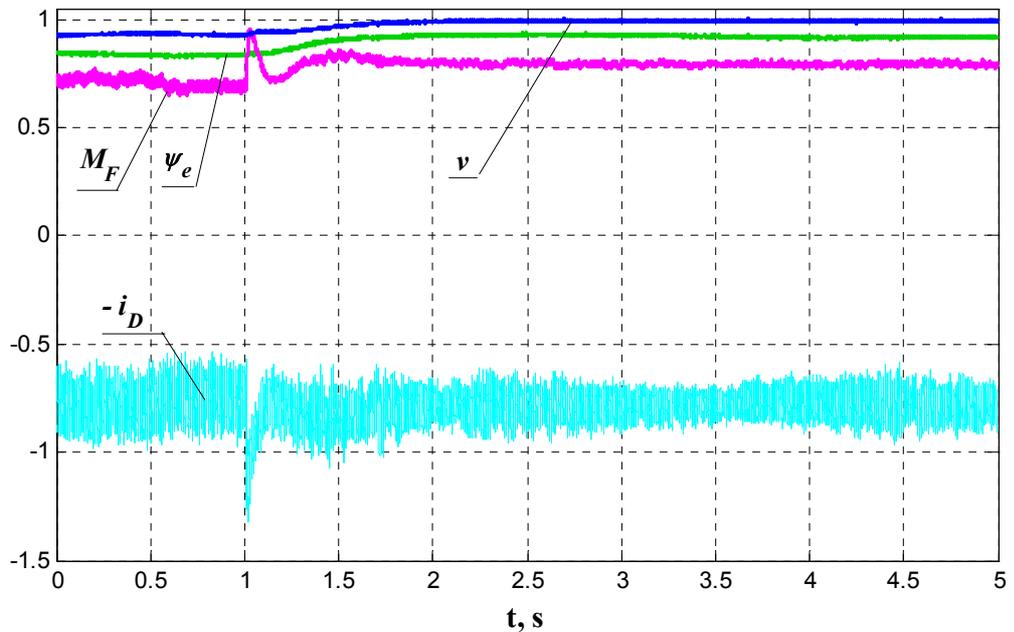


Рис. 6. Скачкообразное восстановление симметрии

Помимо выпрямленного тока  $i_D$ , зарегистрированы также эквивалентный магнитный поток ротора  $\psi_e$ , электромагнитный момент  $M_F$  (фильтрованный сигнал, постоянная времени фильтра 0.01 с) и скорость  $v$ .

Наибольшее влияние на переходные процессы оказывает не нарушение симметрии, а снижение выпрямленного напряжения. Поэтому процессы сходны с таковыми при симметричной просадке напряжения сети.

Сразу же после возмущения очень быстро падает выпрямленный ток. С током падает и момент, скорость начинает снижаться. Затем под действием системы регулирования происходит восстановление выпрямленного тока; прекращается падение

скорости и начинается её восстановление. В функции пониженного напряжения питания система регулирования снижает магнитный поток ротора и уровень ограничения момента. Этот уровень оказывается ниже момента нагрузки при номинальной скорости. Поэтому скорость восстанавливается не до номинального значения, а до более низкого уровня. В возникшем установившемся режиме заметны малые качания всех зарегистрированных переменных; они объясняются интерференцией гармоник напряжения в цепи выпрямленного тока: со стороны выпрямителя и со стороны инвертора.

При скачкообразном восстановлении режима питающей сети мгновенно повышается выпрямленное напряжение; поэтому имеет место бросок выпрямленного тока. В данном случае ток достигает значения  $I_{D,max} \approx 1.3$ . Затем под действием системы регулирования восстанавливаются выпрямленный ток, магнитный поток и скорость электропривода.

Синхронизация управления электропривода с питающей сетью не срывается при данном сильном возмущении (впрочем, и при более сильных нарушениях).

В целом характер переходных процессов не представляет угрозы для оборудования. Подтверждается возможность сохранения электропривода в работе в течение нескольких секунд при таком сильном нарушении симметрии питающих напряжений; такая возможность уже отмечена при анализе установившихся режимов.

### ***Рекомендации по уставкам защиты от нарушения симметрии***

На основании результатов исследования имеется возможность задать уровень срабатывания защиты от нарушения симметрии, соответствующий напряжению обратной последовательности  $U_2 = 0.1 U_{PN}$ . Выдержка времени защиты может быть установлена в пределах  $T_{UB} = 1-5$  с.

## **ВЫВОДЫ**

1. Иммуниет регулируемого электропривода по отношению к возмущениям в питающей сети является одной из важнейших характеристик электропривода. К сожалению, данные по иммунитету к аварийным возмущениям не приводятся производителями электроприводов, в особенности, высоковольтных электроприводов большой мощности.
2. В значительной степени отсутствие необходимых характеристик объясняется трудностями создания аварийных режимов сети при испытаниях реальных электроприводов. Данное исследование подтверждает преимущества испытаний

такого вида на виртуальном стенде, содержащем устройство управления реального привода и компьютерную модель силовой части, работающую в реальном времени.

3. Выполненное исследование восполняет указанный пробел для одного из видов электропривода. Испытания продемонстрировали высокую степень иммунитета электроприводов PowerFlex 7000 по отношению к наиболее вероятному виду возмущений – нарушению симметрии 3-фазной системы питающих напряжений. Электропривод может функционировать достаточно продолжительно при напряжении обратной последовательности в 2.5 раза превышающем предельно допустимое значение по отечественному Стандарту.
4. Результаты исследования позволяют изменить уставки соответствующей защиты электропривода и сохранять электропривод в работе при более сильных нарушениях. Эта возможность уже использована в регулируемых электроприводах 3.15 МВт шахтных вентиляторов рудника «Мир» компании «Алроса», введенных в эксплуатацию в апреле 2008 г.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] International Standard IEC 61000-2-1. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-1: Environment – Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems. – 1990.05.

[2] International Standard IEC 61000-2-12. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-12: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems. – 2003.04.

[3] Межгосударственный Стандарт ГОСТ 13109-1997. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Переиздание, январь 2002.

[4] M.H.Bollen and L.D.Zhang. Analysis of voltage tolerance of AC adjustable speed drives for three phase balanced and unbalanced sags. – IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, Vol. 36, No.3.

[5] Power Quality Newsletter – May 2007. Power Standards Lab., California, USA. – <http://www.powerstandards.com>.

[6] Вейнгер А. М., Медведев В. Н. Векторный показатель искажения напряжений и токов в трехфазной системе. – Электротехника, 2008, № 9 (в печати).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Вейнгер Александр Меерович,  
121002, Москва, пер. Староконюшенный, 5/14-3,  
тел. раб. (495) 956-04-64,  
доктор техн. наук, профессор, автор и соавтор 4 книг,  
более 190 опубликованных статей и докладов, более 60  
изобретений в области автоматизированного  
электропривода и смежных областях; в настоящее время –  
консультант по мощным электроприводам, регион ЕМЕА,  
компания Rockwell Automation.



Медведев Владимир Николаевич,  
428034, Чебоксары, б-р Юности 9-21,  
тел. раб. (499) 613-57-81  
ООО «Центртехкомплект» г.Москва, начальник отдела  
научно-технического развития.  
Окончил факультет электрификации и автоматизации  
промышленности Чувашского государственного  
университета в 1992 году, автор и соавтор 2 статей и  
одного изобретения в области автоматизированного  
электропривода.