

# Сравнительный анализ различных преобразователей частоты для электропривода вентилятора ВЦД47У

Иванцов В.В.

Центробежный вентилятор ВЦД47У используется для главного проветривания шахт и рудников угольной и горнодобывающей промышленности с потребным расходом воздуха до 590 м<sup>3</sup>/с и давлением до 830 даПа. Наиболее часто вентиляторы ВЦД47У используются для проветривания глубоких (600-1600 м) труднопроветриваемых угольных шахт и рудников с большой протяженностью подземных выработок.

В зависимости от типа используемого электропривода вентилятор ВЦД47У имеет три исполнения:

- с нерегулируемым асинхронным электроприводом (ВЦД47У-Н);
- с регулируемым асинхронным электроприводом (ВЦД47У-Р);
- с нерегулируемым синхро-асинхронным электроприводом (ВЦД47У-НС).

В качестве приводных электродвигателей вентилятора ВЦД47У наиболее часто используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором (АД ФР). В качестве электропривода для регулирования скорости вала асинхронного электродвигателя с фазным ротором целесообразно использовать преобразователь частоты, который устанавливается между цепью ротора электродвигателя и питающей сетью, и осуществляет регулирование скорости за счет регулирования мощности скольжения с минимальными потерями. Такой преобразователь частоты имеет существенно меньшую цену по сравнению с преобразователем частоты в статоре электродвигателя из-за существенно меньшего напряжения ротора и меньшей мощности скольжения при вентиляторной нагрузке.

В настоящее время выпускается два вида преобразователей для регулирования скорости электродвигателей с фазным ротором за счет регулирования мощности скольжения:

- тиристорный преобразователь частоты на базе ведомого сетью инвертора тока;
- транзисторный преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения.

Указанные преобразователи частоты выполнены на различных силовых полупроводниковых элементах, имеют различные силовые схемы, в них реализованы различные принципы работы и они имеют различные технические характеристики. Общим для этих преобразователей является одинаковая зависимость активной мощности скольжения ротора электродвигателя, которую должен пропустить через себя преобразователь при регулировании скорости. Эта зависимость определяется графиком изменения момента на валу электродвигателя от скорости и не зависит от типа преобразователя частоты. При близких значениях КПД преобразователей практически одинаковой будет зависимость активной мощности питающей сети  $P_c$  от скорости электродвигателя, которая повторяет зависимость мощности на валу электродвигателя  $P_d$  с учетом КПД.

Вентилятор ВЦД-47У приводится в движение двумя асинхронными электродвигателями с фазным ротором, например, типа АКН2-18У3 (1600 кВт, 6 кВ, 495 об/мин, номинальный ток ротора 1150А, линейное напряжение ротора 850В). Определим параметры электроэнергии в цепях одного электродвигателя при регулировании производительности вентилятора за счет изменения оборотов его вала, приняв допущение о равномерном распределении мощности вала вентилятора между электродвигателями. Результаты расчета приведены в Таблице 1 (КПД электродвигателя и преобразователя с трансформатором приняты равными 95%).

Таблица 1

Производительность Q, м <sup>3</sup> /с	140	225	250	275	300	325	350	375	400	425
Скорость вала, об/мин	200	290	315	340	365	390	415	440	465	495
Мощность вала, кВт	112	294	375	481	594	755	856	1000	1194	1460
Ток ротора, А	199	360	424	504	579	689	734	809	913	1049
ЭДС ротора, В	510	357	315	272	230	187	145	102	60	9
Активная мощность ротора, кВт	176	223	231	238	230	223	184	143	94	15
Активная мощность статора, кВт	295	534	627	746	858	1021	1089	1200	1356	1559
Активная мощность сети, кВт	127	322	408	521	639	809	914	1064	1267	1544

Как следует из анализа данных Таблицы 1 преобразователь частоты в цепи ротора одного электродвигателя ГВУ должен обеспечивать передачу активной мощности из ротора в питающую сеть не менее 240 кВт. При этом он должен быть рассчитан на пусковое напряжение ротора 850В и номинальный ток ротора 1150А. Рассмотрим возможности реализации преобразователя частоты с такими параметрами для двух указанных выше вариантов построения ПЧ в цепи ротора электродвигателя и проведем сопоставление их показателей.

1. Регулируемый электропривод вентилятора ВЦД47У с тиристорным преобразователем частоты в роторе электродвигателей на базе ведомого сетью инвертора тока.

Однолинейная структурная схема электропривода с тиристорным преобразователем частоты на базе ведомого сетью инвертора тока (ПЧ ВИТ) для регулирования скорости вентилятора ВЦД47У с двумя электродвигателями АKN2-18У3 показана на рис. 1. ПЧ ВИТ состоит из роторного и сетевого преобразователей. Электроприводы по такой схеме с неуправляемым роторным преобразователем традиционно называют асинхронными вентиляционными каскадами (АВК), а с управляемым роторным преобразователем — асинхронными тиристорными каскадами (АТК). Рекуперация энергии в сеть в ПЧ ВИТ с регулируемым роторным преобразователем (АТК) достигается регулированием углов управления роторного и сетевого преобразователей. В цепь ротора каждого асинхронного двигателя включен тиристорный преобразователь по 3-фазной мостовой схеме. Тиристорные мостовые комплекты роторного преобразователя соединены последовательно. Сетевой тиристорный преобразователь выполнен по аналогичной схеме, подключен к двум роторным преобразователям и получает питание от сети 6кВ, 50 Гц через согласующий трансформатор. Между цепями выпрямленного тока роторного и сетевого преобразователей включены сглаживающие дроссели. Выпрямленное напряжение сетевого преобразователя направлено встречно напряжению роторного преобразователя. В двигательном режиме ток ротора выпрямляется роторным преобразователем, а затем мощность, вводимая в роторную цепь, рекуперирована в сеть сетевым преобразователем, который работает в инверторном режиме. В режиме рекуперативного торможения сетевой преобразователь должен переводиться в режим выпрямления, а роторный преобразователь — в режим инвертирования. При этом мощность скольжения из сети передается в цепь ротора, что переводит электродвигатели в тормозной режим и мощность с вала электродвигателя возвращается в питающую сеть. В отличие от асинхронного тиристорного каскада электропривод с неуправляемым роторным преобразователем типа АВК не может работать в режиме рекуперативного торможения.

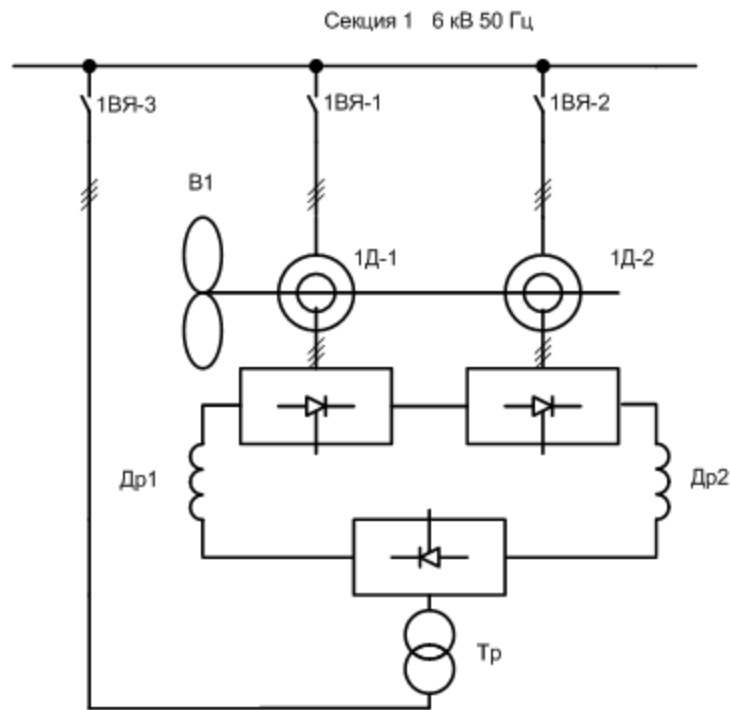


Рис. 1. Однолинейная структурная схема электропривода вентилятора типа АТК

Для осуществления плавного пуска электродвигателей вентилятора с помощью ПЧ ВИТ с нулевой скорости необходимо обеспечить равенство средних значений выпрямленных ЭДС сетевого и роторного преобразователей при нулевой скорости электродвигателей. При нулевой скорости электродвигателей линейная ЭДС ротора максимальна и для электродвигателя АКН2-18У3 равна  $E_{po} = 850\text{В}$ . Если исходный угол управления тиристорных комплектов роторного преобразователя установить равным нулю (аналогично неуправляемому выпрямителю в АВК), то среднее значение выпрямленной ЭДС двух тиристорных комплектов роторного преобразователя, соединенных последовательно, будет равно

$$E_{вро} = 2 * 1,35 * E_{po} = 2 * 1,35 * 850 = 2295 \text{ В.}$$

Сетевой преобразователь должен создать выпрямленную ЭДС того же знака, что и ЭДС роторного преобразователя и эта ЭДС будет направлена против направления выпрямленного тока, что обеспечит передачу мощности из ротора в питающую сеть. Для этого сетевой преобразователь должен работать в инверторном режиме с максимально возможной фазой импульсов управления, максимально близкой к 180 градусам. Реально максимальная фаза импульсов управления инвертора, ведомого сетью, ограничена по условиям коммутации тиристоров и устанавливается не более 150 эл. градусов. При этом среднее значение выпрямленной ЭДС сетевого преобразователя частоты  $E_{вco}$  равно (отрицательный знак свидетельствует о том, что ЭДС направлена встречно направлению протекания тока через сетевой преобразователь)

$$E_{вco} = 1,35 * E_{тр} * \cos 150^\circ = - 2295 \text{ В,}$$

где  $E_{тр}$  — линейная ЭДС согласующего трансформатора Тр.

Из последнего соотношения может быть найдено значение линейной ЭДС согласующего трансформатора  $E_{тр}$ , которую нужно обеспечить при нерегулируемом роторном преобразователе частоты асинхронного вентиляционного каскада (АВК)

$$E_{тр} = E_{вс0}: 1,35 : \cos 150^\circ = 2295 : 1,35 : 0,865 = 1965 \text{ В.}$$

Вычислив линейную ЭДС трансформатора и зная ток ротора электродвигателя (Таблица 1), который равен току фазы согласующего трансформатора, можем найти полную мощность  $S_{тр}$  трансформатора  $Tr$  при регулировании производительности вентилятора с помощью АВК

$$S_{тр} = 3 * I_p * E_{тр} : 1,73,$$

а также активную мощность, передаваемую трансформатором в питающую сеть  $P_{тр}$ , которая равна удвоенной активной мощности ротора одного электродвигателя (Таблица 1) за вычетом потерь в преобразователе частоты (КПД собственно ПЧ принят равным 97%).

Результаты вычислений параметров электроэнергии АВК приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Производительность ГВУ Q, м³/с	140	225	250	275	300	325	350	375	400	425
Скорость вала, об/мин	200	290	315	340	365	390	415	440	465	495
Мощность вала АД Рд1, кВт	112	294	375	481	594	755	856	1000	1194	1460
Мощность статора АД Рс1, кВт	295	534	627	746	858	1021	1089	1200	1356	1559
Ток статора АД Іс1, А	105	113	118	124	130	141	145	153	165	181
Активная мощность $P_r$ , кВт	335	424	439	451	438	424	349	272	179	29
Полная мощность $P_r$ , кВА	679	1228	1443	1716	1972	2347	2501	2755	3112	3576
Первичный ток $P_r$ , А	67	121	142	169	194	231	247	272	307	352

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что для реализации выбранного алгоритма работы электропривода с плавным запуском за счет АВК потребуются мощный, дорогостоящий согласующий трансформатор и преобразователь частоты будет потреблять из сети весьма большую реактивную мощность, сопоставимую с номинальной мощностью всей установки, которая будет загружать реактивным током питающую сеть, что сведет на нет достоинства регулируемого электропривода.

Для снижения реактивной мощности, потребляемой электроприводом на базе ПЧ ВИТ, необходимо снизить вторичную ЭДС согласующего трансформатора, поскольку ток в цепи ротора электродвигателей определяется моментом на валу вентилятора и изменению не подлежит. При этом равенство выпрямленных ЭДС нерегулируемого роторного и сетевого преобразователей будет обеспечиваться не при нулевой скорости вала, как выбиралось в предыдущем примере, а при какой-то промежуточной скорости. Равенство выпрямленных напряжений роторного и сетевого преобразователей при регулировании скорости вниз относительно этой промежуточной скорости обеспечивается увеличением фазы импульсов управления роторного преобразователя при нерегулируемом сетевом преобразователе. При этом роторный преобразователь потребляет от ротора реактивную мощность и ток ротора и статора электродвигателя возрастает по сравнению с нерегулируемым роторным преобразователем. При регулировании скорости вверх относительно промежуточной роторный преобразователь не регулируется и потребляет от ротора только активную мощность, а сетевой преобразователь регулируется и потребляет из сети увеличенную реактивную мощность, отдавая в сеть активную мощность скольжения. Такой прием в определенной степени улучшает энергетические показатели электропривода с ПЧ ВИТ, однако не может полностью устранить основной недостаток тиристорного электропривода, который заключается в неудовлетворительных энергетических показателях при регулировании скорости. В качестве примера рассмотрим энергетические показатели электропривода по схеме асинхронного тиристорного каскада (АТК) при линейном напряжении вторичной обмотки согласующего трансформатора  $E_{тр} = 510\text{В}$ , при котором равенство ЭДС роторного и сетевого преобразователей обеспечивается ориентировочно при скорости вала электродвигателя 380 об/мин. Результаты расчета энергетических показателей электропривода по схеме АТК для  $E_{тр} = 510\text{В}$  приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Производительность ГВУ Q, м <sup>3</sup> /с	140	225	250	275	300	325	350	375	400	425
Скорость вала, об/мин	200	290	315	340	365	390	415	440	465	495
Мощность вала АД Рд1, кВт	112	294	375	481	594	755	856	1000	1194	1460
Мощность статора АД Рс1, кВт	295	532	626	744	855	1018	1085	1196	1351	1552
Ток статора АД Іс1, А	139	138	137	137	135	141	145	153	165	181
Активная мощность Тр, кВт	335	424	439	451	438	424	349	272	179	29
Полная мощность Тр, кВА	407	515	534	549	532	609	649	715	808	928
Первичный ток Тр, А	40	51	53	54	52	60	64	70	80	91

Энергетические показатели электропривода с ПЧ ВИТ при регулировании роторного и сетевого преобразователей согласно данных Таблицы 3 улучшаются по сравнению с показателями электропривода с нерегулируемым роторным преобразователем (Таблица 2), однако в цепях электропривода остается циркулирующая значительная по величине реактивная мощность, создающая дополнительные потери в электродвигателе, кабельном хозяйстве, трансформаторе, ПЧ, что неудовлетворительно сказывается на энергетических показателях.

Подключение к ротору электродвигателя ПЧ ВИТ также отрицательно сказывается на потерях в электродвигателе. ПЧ ВИТ потребляет от ротора электродвигателя при регулировании роторного преобразователя значительную реактивную мощность (Таблица 3), увеличивающую потери в электродвигателе. При этом ток в цепи ротора АД ФР имеет прямоугольную форму с высоким содержанием высокочастотных гармоник за счет применения схемы выпрямитель-инвертор со сглаживающим дросселем в звене постоянного тока. Это приводит к дополнительному нагреву электродвигателя.

ПЧ ВИТ имеет крайне неудовлетворительные энергетические показатели по влиянию на питающую сеть и кабельное хозяйство. Как следует из данных Таблицы 3 ПЧ ВИТ потребляет из сети значительную реактивную мощность при регулировании сетевого преобразователя, которая загружает сеть реактивным током и увеличивает потери. При этом форма тока в питающей сети отличается от синусоидальной за счет высших гармоник с высоким процентным содержанием. Высшие гармоники тока искажают напряжение питающей сети, создают помехи, дополнительно нагревают подводящие кабели, что также увеличивает потери и ускоряет старение кабельного хозяйства.

Кроме перечисленных выше недостатков ПЧ ВИТ характеризуется весьма низкой надежностью работы в условиях просадок напряжения промышленной сети. Для ПЧ ВИТ характерно возникновение аварийных режимов срыва инвертора, ведомого сетью, при просадках напряжения сети, которые приводят к возникновению коротких замыканий сети и отключению электропривода.

## 2. Регулируемый электропривод вентилятора ВЦД47У с транзисторным преобразователем частоты на базе автономного инвертора напряжения

Однолинейная структурная схема электропривода с транзисторным преобразователем частоты на базе автономного инвертора напряжения (ПЧ АИН) для регулирования скорости вентилятора ВЦД47У с двумя электродвигателями АKN2-18У3 показана на рис. 2. В цепи ротора каждого электродвигателя включен преобразователь частоты типа ПЧ АИН. Преобразователь частоты в роторе одного электродвигателя содержит два транзисторных инвертора напряжения. Трехфазная цепь одного инвертора напряжения подключена к ротору электродвигателя (роторный инвертор), а второго инвертора (сетевой инвертор) - к вторичной обмотке согласующего трансформатора через «синусный» силовой LC-фильтр. Цепи постоянного тока роторного и сетевого инвертора соединены друг с другом и подключены к накопительным конденсаторам относительно большой емкости, образуя тем самым промежуточное звено постоянного тока. Каждый инвертор (роторный и сетевой) управляется по закону синусоидальной широтно-импульсной модуляции. За счет последовательного соединения двух инверторов напряжения с промежуточным звеном постоянного тока преобразователь частоты в цепи ротора обеспечивает двухсторонний обмен энергией между цепью ротора электродвигателя и питающей сетью. За счет введения регулируемой

противоЭДС в цепь ротора осуществляется регулирование тока ротора и регулирование величины и направления потока активной мощности в цепи ротора электродвигателя. При этом осуществляется регулирование момента и скорости вала электродвигателя в широком диапазоне. Диапазон регулирования момента и скорости вала электродвигателя с преобразователем частоты ПЧ АИН в цепи ротора в режиме S1 ограничен только предельно-допустимыми параметрами электродвигателя.

Роторный инвертор, представляющий собой автономный транзисторный инвертор напряжения с высокочастотной синусоидальной широтно-импульсной модуляцией позволяет формировать в цепи ротора электродвигателя трехфазный ток синусоидальной формы и позволяет обеспечивать передачу активной мощности как из ротора АД ФР в промежуточное звено постоянного тока, так и в обратном направлении. Кроме передачи активной мощности роторный инвертор позволяет передавать и регулировать реактивную мощность в цепи ротора электродвигателя, возбуждая тем самым электродвигатель по цепи ротора. Сетевой инвертор также позволяет передавать активную мощность из звена постоянного тока в питающую сеть и обратно при синусоидальной форме тока в питающей сети, а также регулировать реактивную мощность в питающей сети, компенсируя тем самым реактивную мощность, потребляемую асинхронным электродвигателем. За счет этих свойств электропривод на базе ПЧ АИН позволяет регулировать скорость электродвигателя с фазным ротором без потребления реактивной мощности и мощности искажений из питающей сети, что невозможно обеспечить при использовании ПЧ ВИТ (АВК и АТК). Возможность передачи активной мощности из ротора в сеть и из сети в ротор электродвигателя позволяет регулировать скорость электродвигателя в широком диапазоне и обеспечивать режим рекуперативного торможения электропривода.

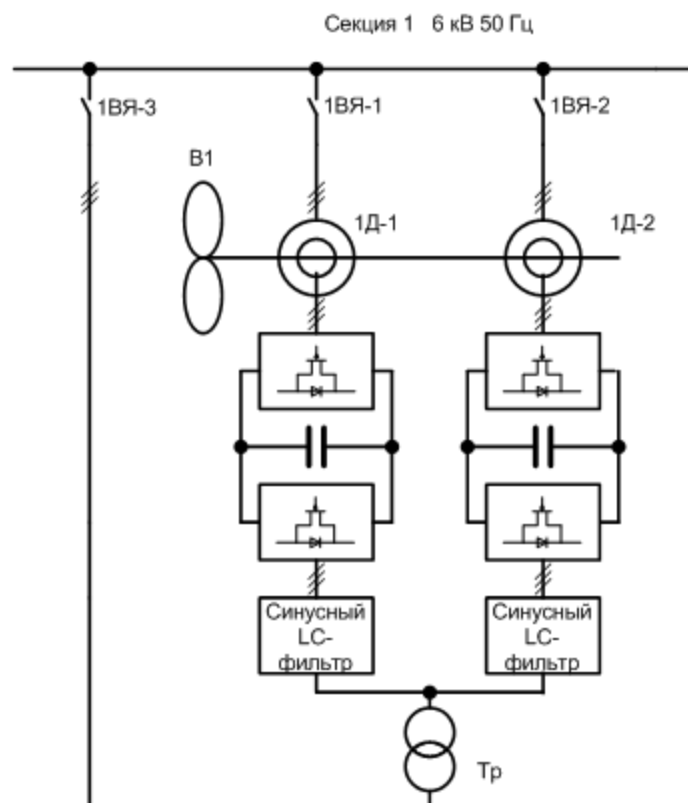


Рис. 2. Однолинейная структурная схема электропривода вентилятора на базе ПЧ АИН

ПЧ АИН представляют собой транзисторные инверторы напряжения, в которых коммутация транзисторов не зависит от напряжения питающей сети. Это существенно повышает надежность работы электропривода за счет исключения возможности возникновения аварийных режимов опрокидывания инвертора, ведомого сетью, которые возможны в тиристорных преобразователях типа ПЧ ВИТ (АВК и АТК). Преобразователи ПЧ

АИН также не потребляют из сети реактивную мощность, напротив могут работать в режиме генерирования в сеть реактивной мощности из накопительных конденсаторов, установленных в звене постоянного тока инверторов напряжения.

Преобразователи частоты типа ПЧ АИН могут использоваться как в одно-, так и в многодвигательных электроприводах, причем в последнем случае реализована функция выравнивания загрузки двигателей по току и моменту на этапе запуска электропривода и при работе в установившемся режиме.

Таким образом, электропривод на базе ПЧ АИН позволяет обеспечить регулирование производительности вентилятора ГВУ за счет регулирования скорости вала вентилятора в требуемом диапазоне с минимальным потреблением электроэнергии из питающей сети и при высоком качестве потребляемой электроэнергии. Достижимые параметры электроэнергии электропривода на базе ПЧ АИН с возбуждением электродвигателей по цепи ротора представлены в Таблице 4. При возбуждении АД ФР по цепи ротора в пределах допустимого тока ротора ток статора АД ФР имеет минимальные значения при регулировании производительности ГВУ. При использовании возбуждения АД ФР по цепи статора ток статора электродвигателя имеет такие же значения, как при использовании АВК (Таблица 2), но при существенно лучшей форме тока, близкой к синусоидальной.

Таблица 4

Производительность Q, м <sup>3</sup> /с	140	225	250	275	300	325	350	375	400	425
Скорость вала, об/мин	200	290	315	340	365	390	415	440	465	495
Мощность вала Р <sub>д1</sub> , кВт	112	294	375	481	594	755	856	1000	1194	1460
Мощность статора Р <sub>с1</sub> , кВт	295	532	626	744	855	1018	1085	1196	1351	1552
Ток статора АД I <sub>с1</sub> , А	29	64	76	91	105	123	133	146	162	181
Активная мощность Т <sub>р</sub> , кВт	335	424	439	451	438	424	349	272	179	29
Полная мощность Т <sub>р</sub> , кВА	335	424	439	451	438	424	349	272	179	29
Первичный ток Т <sub>р</sub> , А	32	40	42	43	42	40	33	26	17	3

ЗАО «ЭРАСИБ» выполнило разработку электропривода для регулирования скорости электродвигателей с фазным ротором на базе транзисторных автономных инверторов напряжения типа «ЭРАТОН-ФР». Преобразователь частоты «ЭРАТОН-ФР» выполнен с цифровой микропроцессорной системой управления на оригинальных компонентах фирм MITSUBISHI, EPSON, MOTOROLA.

Частотно-регулируемый электропривод с преобразователем частоты типа «ЭРАТОН-ФР» может быть выполнен без датчика скорости (положения) и с датчиком скорости (положения) электродвигателя. Связь ЧРП с системой управления установкой осуществляется по протоколу промышленных сетей с интерфейсом RS-485, RS-232 и протоколом Modbus.

ЧРП «ЭРАТОН-ФР» без датчика скорости обеспечивает:

- плавный безударный пуск с пусковым моментом до 200% номинального;
- плавное регулирование скорости электродвигателя в диапазоне 1:70;
- стабилизация номинальной скорости электродвигателя с точностью 1%;
- быстрое действие регулирования момента электродвигателя не менее  $2M_{н/сек}$ ;
- выравнивание нагрузки двух электродвигателей с точностью не менее 5%;
- рекуперативное торможение электропривода с указанными выше параметрами.

Преобразователи частоты «ЭРАТОН-ФР» реализуют следующие виды защит:

- максимально-токовая;
- тепловая – от длительной токовой перегрузки (время-токовая);
- от обрыва фазы ротора;
- от недопустимого превышения, снижения или несимметрии напряжения, обрыва фазы питающей сети системы управления;
- от недопустимого превышения, снижения или несимметрии напряжения, обрыва

- фазы питающей статора высоковольтной сети;
- от недопустимого превышения или снижения напряжения звена постоянного тока
- преобразователя частоты;
- от перегрева силовых транзисторных модулей;
- от неуспешного пуска;
- внутренние логические защиты.

#### Выводы:

1. Регулируемый электропривод центробежного вентилятора ВЦД47У позволяет экономить значительную величину электроэнергии при регулировании производительности за счет изменения оборотов вала при полностью открытом направляющем аппарате.

2. Экономия потребляемой электроэнергии с минимальными первоначальными затратами обеспечивает электропривод с преобразователем частоты в цепи ротора приводных асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Это объясняется существенно меньшим напряжением ротора электродвигателя по сравнению с напряжением статора, а также меньшим значением мощности скольжения ротора, подлежащей преобразованию роторным преобразователем частоты, по сравнению с мощностью статора электродвигателя, подлежащей преобразованию статорным преобразователем частоты, что существенно отражается на цене.

3. В качестве роторного преобразователя частоты можно использовать ведомый сетью тиристорный преобразователь частоты (асинхронный тиристорный каскад — АТК), либо транзисторный преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения, который производится ЗАО «ЭРАСИБ» под маркой «ЭРАТОН-ФР». Оба рассматриваемых преобразователя частоты позволяют решить задачу экономии электроэнергии, потребляемой электроприводом вентилятора, за счет регулирования скорости вала вентилятора при полностью открытом направляющем аппарате.

4. Регулируемый электропривод на базе транзисторного преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-ФР» производства ЗАО «ЭРАСИБ» имеет определенные преимущества перед электроприводом на базе тиристорного преобразователя частоты типа АТК за счет

- снижения потребления реактивной мощности электроприводом;
- исключения потребления мощности искажения электроприводом;
- повышения надежности электропривода за счет исключения аварийных режимов срыва инвертирования мощности скольжения, характерных для тиристорных преобразователей, ведомых сетью (АВК и АТК).