

## Цены и сроки окупаемости высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов тягодутьевых машин (дымососов и вентиляторов)

Иванцов В.В.

Важным экономическим показателем тягодутьевых машин (дымососов и вентиляторов) является их эксплуатационная экономичность, которая зависит от способа и глубины регулирования производительности. Простейшим и наиболее часто используемым способом регулирования производительности тягодутьевых машин (ТДМ) является шибберное регулирование при постоянной скорости вала приводного электродвигателя ТДМ. Однако, несмотря на простоту и минимальные капитальные затраты, шибберное регулирование сопровождается существенным снижением эксплуатационного КПД, которое выражается в значительных непроизводительных затратах электроэнергии, потребляемой ТДМ. Более экономичным способом регулирования производительности ТДМ является плавное изменение оборотов приводного вала ТДМ при полностью открытом шиббере. Однако такой способ регулирования производительности требует применения дорогостоящих устройств регулирования скорости приводных электродвигателей ТДМ, что существенно увеличивает первоначальные капитальные затраты. Для повышения экономической эффективности регулирования производительности ТДМ за счет регулирования оборотов вала приводного электродвигателя и снижения сроков окупаемости капитальных затрат весьма актуальным является поиск технических решений, позволяющих существенно снизить стоимость электропривода ТДМ. Ниже приведен сравнительный анализ трех вариантов построения электропривода для регулирования скорости ТДМ с приводными высоковольтными электродвигателями с точки зрения минимизации первоначальной стоимости оборудования, снижения капитальных затрат и сроков их окупаемости. Для оценки стоимостных показателей электроприводов использованы данные о стоимости электродвигателей концерна РУСЭЛПРОМ, а также информация о стоимости преобразователей частоты производства ЗАО «ЭРАСИБ».

Мощные тягодутьевые машины (дымососы и вентиляторы с производительностью более 130000 м<sup>3</sup>/час) в подавляющем большинстве оснащаются высоковольтными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором (АД КЗ), например, типа ДАЗО. Достаточно большой класс ТДМ оснащается электродвигателями мощностью от 315 до 1000 кВт с номинальным напряжением статора 6 кВ. Для регулирования оборотов вала таких электродвигателей с нагрузкой в виде ТДМ в настоящее время традиционно используются два вида преобразователей частоты, которые устанавливаются между питающей сетью 50 Гц 6 кВ и статором электродвигателя.

1. Первым рассмотрим преобразователь частоты (ПЧ) с входным многообмоточным согласующим трансформатором и выходным многоуровневым транзисторным инвертором. Многоуровневый транзисторный инвертор содержит в каждой выходной фазе несколько транзисторно-диодных ячеек (Н-мостов), которые соединены последовательно для получения номинального напряжения 6 кВ. Количество ячеек в выходной фазе зависит от величины формируемого одной ячейкой напряжения и, в зависимости от допустимого напряжения используемых транзисторов, изменяется от двух до пяти. Каждая ячейка получает питание от изолированной трехфазной обмотки входного трансформатора и формирует часть выходного напряжения за счет синусоидальной широтно-импульсной модуляции. За счет фазового сдвига высокочастотных модулированных сигналов отдельных ячеек и суммирования их напряжений преобразователь частоты формирует напряжение, близкое по форме к синусоидальному. Назовем такой преобразователь частоты ПЧ В (ПЧ высокое напряжение). ЗАО «ЭРАСИБ» производит такие преобразователи частоты под маркой «ЭРАТОН-В». Однолинейные структурные схемы преобразователя ПЧ В типа «ЭРАТОН-В» с двумя Н-мостами в каждой фазе показаны на рис. 1.

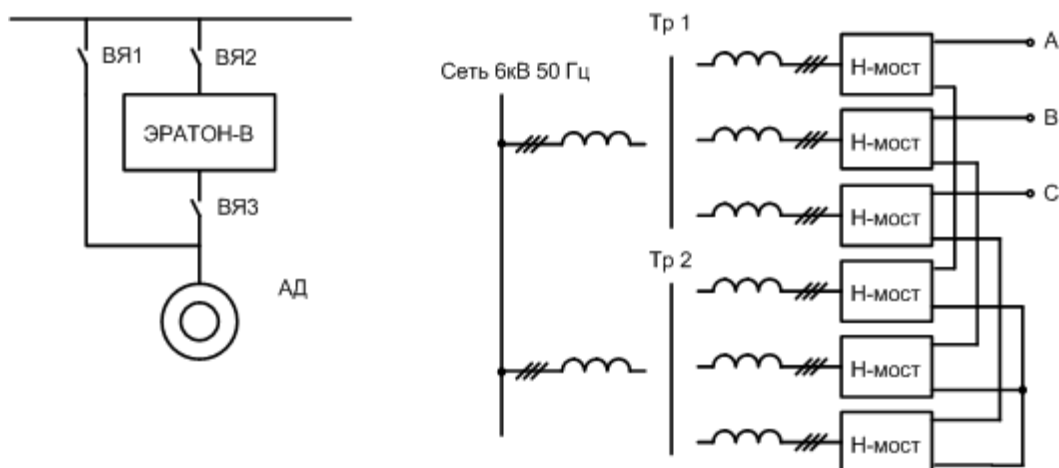


Рис. 1. Однолинейные структурные схемы преобразователя «ЭРАТОН-В»

2. Вторым традиционным видом является преобразователь частоты с входным трансформатором, понижающим напряжение с 6 кВ до 0,4 кВ или 0,69 кВ, промежуточным транзисторным преобразователем частоты низкого напряжения и выходным трансформатором, повышающим напряжение в номинальном режиме до 6 кВ. Низковольтный преобразователь частоты имеет относительно простую структуру, строится на базе трехфазных транзисторно-диодных мостов и формирует выходное напряжение за счет синусоидальной широтно-импульсной модуляции. Выходное напряжение преобразователя частоты имеет сложный гармонический состав со значительной долей высокочастотных составляющих, поэтому между выходом низковольтного преобразователя частоты и выходным повышающим трансформатором обязательно устанавливается силовой «синусный» LC-фильтр, который устраняет высокочастотные пульсации напряжения на входе повышающего трансформатора. Назовем такой преобразователь частоты ПЧ ВНВ (ПЧ высокое-низкое-высокое напряжение). ЗАО «ЭРАСИБ» производит такие преобразователи под маркой «ЭРАТОН-ВНВ» на базе низковольтных преобразователей частоты типа «ЭРАТОН-М5» и согласующих трансформаторов масляного или «сухого» типа. Однолинейные структурные схемы преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-ВНВ» показаны на рис. 2.

Сопоставляя между собой два вида преобразователей частоты (ПЧ В и ПЧ ВНВ) можно выделить следующие особенности и отличия, влияющие на экономические показатели и стоимость ПЧ:

1. При наличии нескольких последовательных ячеек в каждой фазе преобразователя ПЧ В каждая отдельная ячейка формирует относительно небольшую часть выходного напряжения и пропускает через себя относительно небольшой ток, равный току фазы высоковольтного электродвигателя. Это позволяет использовать при построении ПЧ относительно недорогие транзисторно-диодные модули. В преобразователе ПЧ ВНВ также можно использовать модули с небольшим допустимым напряжением, но на значительно больший ток, поскольку преобразователь в звене низкого напряжения пропускает через себя полную мощность нагрузки при существенно меньшем напряжении и большем токе. Стоимость транзисторно-диодных модулей в существенно большей степени зависит от допустимого напряжения, чем от величины тока. Поэтому стоимость комплектации одной ячейки высоковольтного ПЧ В может быть близка к стоимости всего преобразователя частоты ПЧ ВНВ, выполненного на транзисторах того же класса. Поскольку для формирования высокого напряжения 6 кВ в преобразователе ПЧ В нужно соединить несколько ячеек последовательно, стоимость полупроводниковых комплектующих ПЧ В может значительно превысить стоимость полупроводниковых комплектующих ПЧ ВНВ. С ростом мощности ПЧ ВНВ приходится соединять ячейки параллельно и разница в стоимости ПЧ В и ПЧ ВНВ уменьшается.

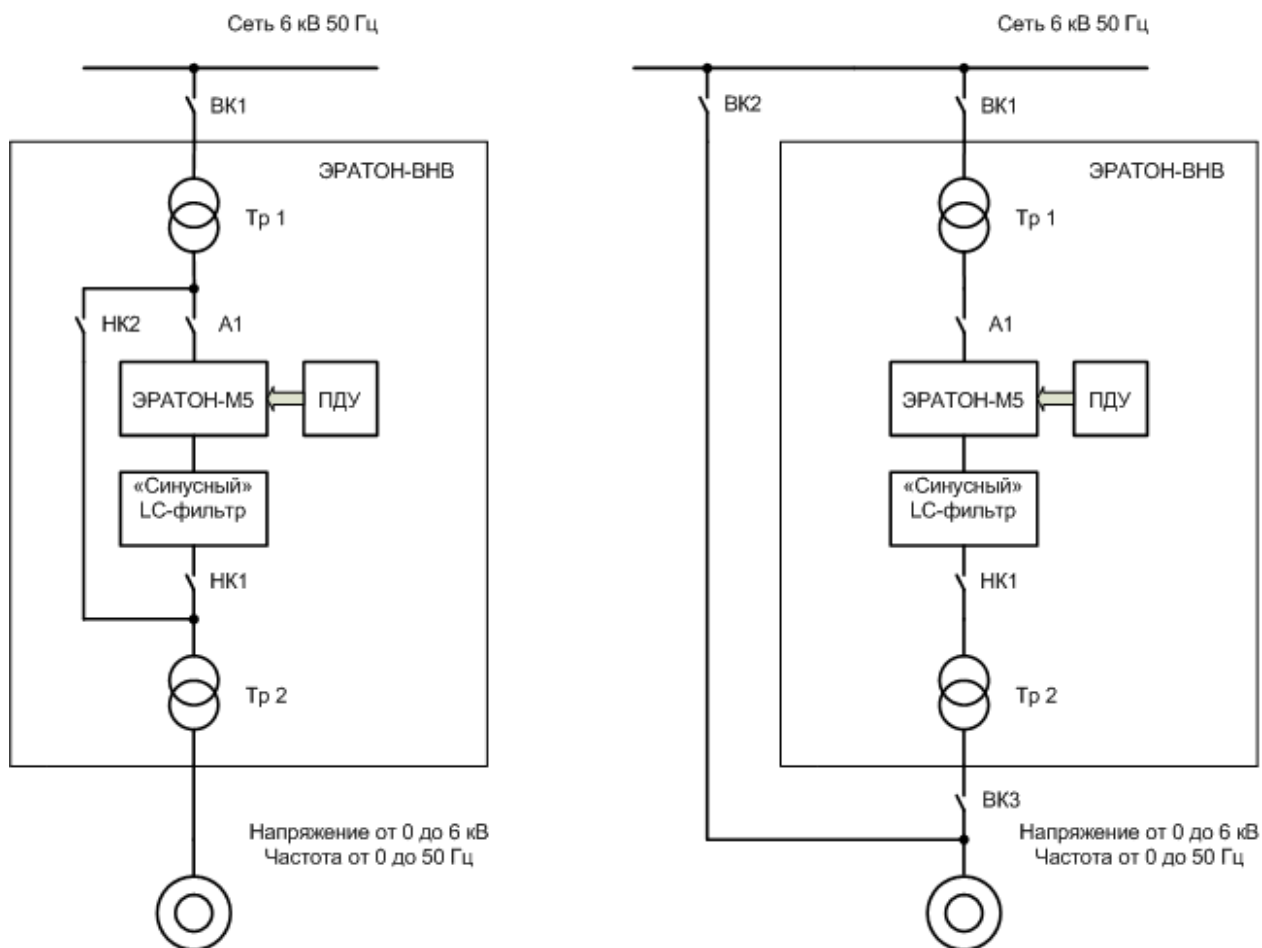


Рис. 2. Однолинейные структурные схемы преобразователя типа «ЭРАТОН-ВНВ»

2. В преобразователе частоты ПЧ В используется только входные многообмоточные трансформаторы на полную мощность преобразователя частоты. Такие трансформаторы имеют повышенную стоимость и не могут быть заменены на обычные серийные трансформаторы. В преобразователе ПЧ ВНВ используется два трансформатора на входе и выходе ПЧ на полную мощность электродвигателя, но эти трансформаторы, как правило, простые, серийные трехфазные трансформаторы с относительно небольшой стоимостью.

Отмеченные выше отличия двух типов преобразователей частоты приводят к существенной разнице их стоимости, которая примерно в два раза меньше у двухтрансформаторного преобразователя частоты типа ПЧ ВНВ по сравнению с преобразователем ПЧ В той же мощности.

В качестве третьего варианта электропривода, позволяющего регулировать производительность ТДМ с минимальными затратами, целесообразно рассмотреть частотно-регулируемый электропривод с высоковольтным асинхронным электродвигателем с фазным ротором (АД ФР) и преобразователем частоты в роторе электродвигателя. ЗАО «ЭРАСИБ» производит такие преобразователи частоты под маркой «ЭРАТОН-ФР».

При построении регулируемого электропривода с двигателем с фазным ротором статор электродвигателя АД ФР подключается непосредственно к высоковольтной сети 50 Гц 6 кВ, а преобразователь частоты «ЭРАТОН-ФР» устанавливается между цепью ротора АД ФР и питающей сетью 50 Гц 0,4 кВ или 50 Гц 6 кВ. Регулирование момента и скорости АД ФР осуществляется за счет частотного регулирования по цепи ротора с помощью ПЧ «ЭРАТОН-ФР» с одновременным возвратом мощности скольжения ротора в питающую сеть. Однолинейные структурные схемы электропривода с АД ФР показаны на рис. 3.

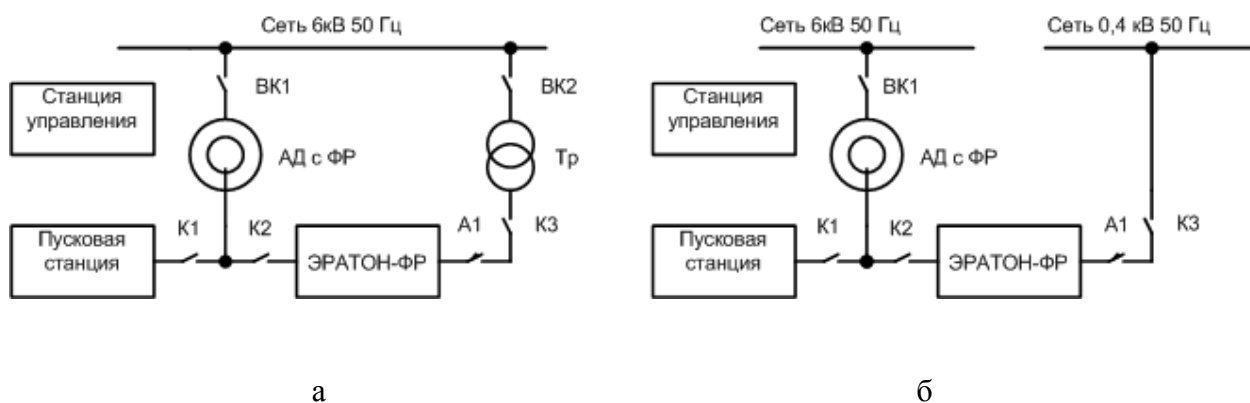


Рис. 3. Однолинейные структурные схемы электропривода с АД ФР и «ЭРАТОН-ФР»

Целесообразность рассмотрения варианта частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) с асинхронным электродвигателем с фазным ротором и преобразователем частоты в цепи ротора с точки зрения минимизации стоимости электропривода определяется следующими особенностями:

1. В настоящее время высоковольтные электродвигатели с фазным ротором почти полностью вытеснены асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Это вполне объяснимо и обосновано для случаев нерегулируемого электропривода из-за меньшей стоимости АД КЗ, более высокой надежности и меньших затрат благодаря отсутствию щеточного узла вывода обмоток вращающегося ротора на неподвижный корпус электродвигателя и отсутствию обязательной для АД ФР пускорегулирующей аппаратуры. Однако недостатки АД ФР по сравнению с АД КЗ существенно минимизируются и отходят на второй план при необходимости глубокого регулирования скорости вала электродвигателя с использованием пускорегулирующей аппаратуры, поскольку стоимость этой аппаратуры существенно превышает стоимость электродвигателя. В этих условиях минимальную стоимость оборудования электропривода обеспечит то техническое решение, у которого будет наименьшая стоимость пускорегулирующей аппаратуры и дешевая строительная часть. При этом стоимость электродвигателя в меньшей степени влияет на суммарную стоимость оборудования и не обязательно должна быть минимальной.

2. У подавляющего большинства типов электродвигателей с фазным ротором напряжение холостого хода между кольцами ротора существенно ниже напряжения статора и не превышает 1200В. Номинальный ток ротора напротив превышает ток статора АД ФР. Коэффициент увеличения тока ротора равен отношению напряжений статора и ротора АД ФР. С учетом этих особенностей преобразователь частоты в цепи ротора АД ФР может быть выполнен на низковольтных транзисторах с минимальным количеством транзисторно-диодных ячеек и стоимость такого преобразователя может быть существенно ниже стоимости преобразователя частоты ПЧ В в цепи статора высоковольтного электродвигателя.

3. Преобразователь частоты в цепи ротора АД ФР также может иметь согласующий трансформатор, силовой фильтр как и ПЧ В и ПЧ ВНВ. Однако преобразователь в цепи ротора АД ФР пропускает через себя только мощность скольжения, которая пропорциональна произведению скольжения и момента, развиваемого электродвигателем. При вентиляторной зависимости момента сопротивления нагрузки от скорости АД ФР мощность скольжения существенно меньше номинальной мощности электродвигателя, поскольку при большом скольжении на малой скорости момент двигателя мал, а при большом моменте на большой скорости мало скольжение. Эта особенность электропривода АД ФР с вентиляторной нагрузочной характеристикой позволяет использовать элементы оборудования ПЧ в цепи ротора (трансформаторы, дроссели, фильтры и др.) минимальной мощности и стоимости, что позволяет существенно снизить

стоимость преобразователя в цепи ротора АД ФР по сравнению с преобразователями в статоре высоковольтного электродвигателя типа ПЧ В и ПЧ ВНВ.

Перейдем к количественной оценке стоимостных показателей высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов для ТДМ. Для этого рассмотрим данные о цене преобразователей частоты «ЭРАТОН-В» (рис. 1 б), «ЭРАТОН-ВНВ» (рис. 2 б) и «ЭРАТОН-ФР» (рис. 3 б) с согласующими трансформаторами «сухого» типа, которые представлены в Таблице 1 с учетом НДС.

Таблица 1

	Мощность электродвигателя ТДМ, кВт					
	320	400	500	630	800	1000
Цена ЭРАТОН-В, тыс. руб.	6050	6250	6480	7350	8210	8400
Цена ЭРАТОН-ВНВ, тыс. руб.	3515	4590	4960	5790	6950	8140
Цена ЭРАТОН-ФР, тыс. руб.	2420	2660	2850	4100	4335	4700

Согласно данным, представленным в Таблице 1, минимальную цену во всем мощностном ряду от 320 до 1000 кВт имеют преобразователи частоты типа «ЭРАТОН-ФР» (рис. 3 б), предназначенные для регулирования скорости ТДМ с приводными асинхронными электродвигателями с фазным ротором (АД ФР). Наибольшую цену в рассматриваемом мощностном ряду имеют преобразователи частоты типа «ЭРАТОН-В» (рис. 1 б) с высоковольтным транзисторным инвертором, которые устанавливаются в цепь статора асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором (АД КЗ). Средние ценовые показатели имеют преобразователи частоты типа «ЭРАТОН-ВНВ» с низковольтным преобразователем по двухтрансформаторной схеме для регулирования скорости АД КЗ по цепи статора (рис. 2 б).

Для оценки стоимости комплектных частотно-регулируемых электроприводов для ТДМ производства ОАО «Сибэнергомаш» (г. Барнаул) и ОАО «Тайра» (г. Новосибирск) с преобразователями частоты производства ЗАО «ЭРАСИБ» воспользуемся данными о стоимости электродвигателей АД КЗ и АД ФР, предоставленными Торговым домом концерна РУСЭЛПРОМ (Таблица 2).

Таблица 2

	Мощность электродвигателя ТДМ, кВт					
	320	400	500	630	800	1000
Цена АД КЗ типа ДАЗО, тыс. руб.	615	626	1375	1325	1518	1531
Цена АД ФР типа АКЗ, тыс. руб.	1210	1182	1306	1543		

Совместное рассмотрение данных Таблицы 1 и Таблицы 2 позволяет сделать вывод о возможности замены электродвигателей с короткозамкнутым ротором на электродвигатели с фазным ротором при оснащении ТДМ регулируемым электроприводом без существенного увеличения цены оборудования, а в некоторых случаях с одновременным снижением цены. Например, цена комплектного электропривода для ТДМ мощностью 630 кВт с АД ФР и ПЧ типа «ЭРАТОН-ФР» составляет сумму  $4100 + 1543 = 5643$  тыс. руб. с НДС, что менее цены ПЧ типа «ЭРАТОН-ВНВ» такой же мощности на величину  $5790 - 5643 = 147$  тыс. руб. Аналогичный расчет для мощности электродвигателя 500 кВт дает снижение цены комплектного электропривода АД ФР типа АКЗ с преобразователем типа «ЭРАТОН-ФР» по сравнению с ПЧ «ЭРАТОН-ВНВ» на  $4960 - (2850 + 1306) = 804$  тыс. руб.

Перейдем к рассмотрению сроков окупаемости частотно-регулируемого электропривода тягодутьевых машин за счет экономии электроэнергии при переходе с шибберного регулирования производительности ТДМ на регулирование производительности за счет изменения оборотов вала электродвигателя ТДМ. Для этого

воспользуемся данными Таблицы 3, в которой представлены зависимости производительности ТДМ  $Q^* = Q/Q_n$ , потребляемой электроэнергии электродвигателями ТДМ из питающей сети при шибберном регулировании (ШР)  $N_{ш}^* = N_{ш}/N_n$  и при регулировании оборотов (РО) электродвигателя  $N_o^* = N_o/N_n$ , а также относительная величина экономии электроэнергии при переходе с шибберного регулирования производительности на регулирование оборотов электродвигателя  $\Delta N^* = (N_{ш} - N_o) / N_{ш}$  (индексом «н» обозначены номинальные значения соответствующих параметров).

Таблица 3

Производительность ТДМ $Q^* = Q/Q_n$ , о.е.	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
Потребляемая энергия э/д $N_{ш}^*$ при ШР, о.е.	1,00	0,84	0,72	0,63	0,56	0,52
Потребляемая энергия э/д $N_o^*$ при РО, о.е.	1,00	0,74	0,52	0,37	0,24	0,14
Экономия электроэнергии $\Delta N^* = (N_{ш} - N_o)/N_{ш}$ , о.е.	0,00	0,11	0,28	0,42	0,57	0,74

Расчетные параметры ТДМ, представленные в Таблице 3 для двух способов регулирования производительности, получены на основе аэродинамических характеристик дымососа цементной печи ДРЦ-21х2 производства ОАО «Сибэнергомаш» (г. Барнаул). Представление расчетных параметров в базисе относительных единиц позволяет использовать полученные характеристики для достаточно большого класса мощных ТДМ с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Приведем пример использования расчетных характеристик ТДМ Таблицы 3 для определения срока окупаемости регулируемого электропривода дымососа цементной печи типа ДРЦ-21х2 (номинальная производительность 315 тыс. м<sup>3</sup>/час, шибберное регулирование производительности, приводной электродвигатель типа ДАЗО 630 кВт, 6 кВ, 740 об/мин, потребляет из сети 460 кВт\*час электроэнергии при номинальной производительности дымососа). Исходными данными для расчета являются годовая среднестатистическая производительность дымососа в долях по отношению к номинальной производительности  $Q^* = Q/Q_n$  и количество электроэнергии, потребляемой электродвигателем из питающей сети за год при шибберном регулировании производительности  $N_{ш}$ . Например, при годовой продолжительности работы печи 320 суток по 24 часа  $320 \times 24 = 7680$  часов и среднестатистической производительности дымососа  $Q^* = 0,8$  расходуемая электродвигателем дымососа энергия при шибберном регулировании составит величину  $N_{ш} = 2543616$  кВт\*час. Экономия электроэнергии при переходе на регулирование оборотов электродвигателя и сохранении среднестатистической производительности дымососа  $Q^* = 0,8$  согласно данным Таблицы 3 составит величину  $N_{ш} \cdot \Delta N^* = 2543616 \cdot 0,28 = 712212$  кВт\*час. В денежном выражении при стоимости электроэнергии 2 руб/кВт\*час годовая экономия составит величину порядка 1420 тыс. руб. При этом срок окупаемости преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-В» составит 5,2 года, а типа «ЭРАТОН-ВНВ» – 4,1 года. На некоторых цементных заводах сохранились на дымососах электродвигатели с фазным ротором. Срок окупаемости преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-ФР» для двигателя мощностью 630 кВт составит 2,9 года. При регулировании производительности дымососа в более широком диапазоне экономия электроэнергии за счет регулируемого электропривода возрастает, а сроки окупаемости электроприводов уменьшаются. Имеется возможность дополнительного снижения стоимости преобразователей частоты и сроков окупаемости за счет применения более дешевых масляных трансформаторов вместо «сухих» согласующих трансформаторов.

Рассмотренная в данной работе методика расчета экономии электроэнергии и сроков окупаемости частотно-регулируемых электроприводов может быть использована для достаточно широкого круга технико-экономических расчетов тягодутьевых машин.