

УДК 621.313.3 (Машины переменного тока)
ББК 31.261.6 (Электрические машины переменного тока)
Н02К

Е. Д. Дуюнов, Д. А. Дуюнов
Н02К Справочник обмотчика машин переменного тока с
совмещёнными обмотками Славянка

ISBN_____

Книга «Справочник обмотчика машин переменного тока с совмещёнными обмотками Славянка» подробно освещает принципы построения и перерасчёта стандартных обмоток на совмещённые. Приведены схемы совмещённых обмоток для наиболее распространённых сочетаний числа пазов и пар полюсов.

Приведен перерасчёт обмоточных данных для модернизации существующего парка электрических машин при проведении капитального ремонта с заменой стандартных обмоток на совмещённые. Даны практические рекомендации и основные положения для самостоятельного перерасчёта стандартных обмоток на совмещённые.

Книга рассчитана на обмотчиков малых частных предприятий, частных предпринимателей и ремонтных цехов. Данный справочник призван помочь обмотчикам освоить совмещённые обмотки и снабдить их практическим справочным материалом. Он так же будет полезен инженерно-техническим работникам крупных ремонтных предприятий.

Приведенная в нём информация может быть полезна энергетикам различных отраслей народного хозяйства и коммунальных служб при разработке планов технических мероприятий по снижению удельного расхода электроэнергии, повышению надёжности оборудования и сокращению эксплуатационных затрат.

Технические решения, приведенные в книге, защищены патентами Российской Федерации. Правообладателем патентных прав является ООО «АС и ПП». При коммерческом использовании за лицензией обращаться к правообладателю.

Название организации: Общество с ограниченной ответственностью «АС и ПП».

Юридический адрес: 124482, Москва, Зеленоград, Савелкинский проезд, д. 4, оф. 1313

E-mail: jin@as-pp.ru

Сайт: <http://as-pp.ru>

Форум: <http://dvigatel.myfor.ru/index.php>

Тел./Факс: (495) 228-6872

«Стандартная перемотка электродвигателя так же бесплодна, как и ...»

Замена же обмоток на совмещённые сродни ... - сперва боязно, но потом трудно себе отказать в удовольствии.»

Из высказываний обмотчиков

Введение

Если Вас не волнует будущее Ваших детей и внуков, если нет желание сделать этот мир хоть чуть-чуть лучше, если Вам не надоело дышать выхлопными газами – положите эту книгу туда где взяли и больше никогда не берите. Эта книга не для Вас. Она для тех, кто не может не созидать. Для тех, кто хочет делать свой бизнес четко и стабильно - развивающимся.

Область применения асинхронных двигателей охватывает все сферы жизнедеятельности человека. Несколько миллиардов двигателей различной мощности и исполнений производит в год мировая промышленность. А объёмы перемотки двигателей «средних» габаритов в РФ фактически мало уступают объёмам потребления новых двигателей...

К чему все эти прописные истины? Зачем писать о том, что и так хорошо известно из других источников? А вот за чем. Среди обмотчиков - консерваторов бытует мнение, что активное внедрение совмещённых обмоток неизбежно приведёт к сокращению объёмов заказов. Смею вас заверить – это не так. Постараюсь в двух - трёх словах, «на пальцах», объяснить почему.

Первое, для владельца перемотка сгоревшего двигателя (или его замена на новый аналогичный) никогда не окупается. Это безвозвратно потраченные деньги. И с этим ничего не поделаешь.

Второе, есть вариант – купить двигатель более высокого класса энергоэффективности, например, вместо IE1 приобрести IE2 и установить его вместо сгоревшего. Но за это удовольствие придётся дополнительно раскошелиться, да и по габаритам двигатель вряд ли станет на прежнее место без доработок оборудования. Затраты возрастут в разы, а окупятся они до очередного выхода двигателя из строя или нет - неизвестно. Обычно срок окупаемости подобного мероприятия существенно превышает гарантийный срок на сам двигатель.

Третье, перемотка на славянку повышает экономичность двигателя при незначительном увеличении затрат (обмотчики тоже люди и хотят иметь свой гешефт), при этом не требуется вносить изменения в конструкцию оборудования. Суммарные затраты получаются существенно ниже, чем при замене на новый двигатель более высокого класса энергоэффективности. В итоге, собственник двигателя, окупив затраты на замену обмоток, будет получать дополнительный доход годами. И чем больше двигателей он переведёт на совмещённые обмотки, тем меньше будут его затраты на электроэнергию и текущие ремонты обмоток двигателей.

О каком порядке возможной экономии средств может идти речь? Да о сущих «пустяках». Вот небольшой анализ в крупную клетку.

В России на долю асинхронных двигателей, по разным оценкам, приходится от 47 до 53% потребления всей вырабатываемой электроэнергии. В промышленности в среднем 60%, в системах холодного водоснабжения до 80%. Ранее, поскольку задача экономии энергоресурсов не была столь актуальна, при проектировании оборудования стремились «подстраховаться», и использовали двигатели с мощностью, превышающей расчётную. Экономия электроэнергии в проектировании отходила на второй план. Сегодня сэкономить единицу энергетических ресурсов, например, 1 т топлива в условном исчислении, вдвое дешевле, чем её добыть.

Известно, что средняя загрузка электродвигателя (отношение мощности, потребляемой рабочим органом машины к номинальной мощности электродвигателя) в отечественной промышленности составляет 0,3–0,4 (в европейской практике эта величина составляет 0,6). Это значит, что двигатель работает с КПД значительно ниже номинального. В отличие от стандартных, двигатели с совмещёнными обмотками обладая более высокой кратностью моментов при меньшей кратности токов, имеют КПД и коэффициент мощности близкий к номинальному в широком диапазоне нагрузок.

За счёт улучшенной механической характеристики и более высоких энергетических показателей, они позволяют экономить от 15 до 40% потребления энергии при той же полезной работе. При этом наибольший эффект достигается при их использовании в установках с переменным характером нагрузки.

По данным сайта федеральной службы государственной статистики потребление электроэнергии в 2011 году в целом по России составило 1 021,1 млрд. кВт·ч.

Согласно приказу Федеральной службы по тарифам от 06.10.2011 г. № 239-э/4 минимальный уровень тарифа на электрическую энергию (мощность), поставляемую покупателям на розничных рынках в 2012 году, составил 164,23 коп/кВт·ч (без НДС).

Экономический эффект от повсеместной замены составит минимум:

$1021,1 \cdot 0,47 \cdot 0,3 \cdot 1,6423 = 236,4503$ млрд. рублей в год.

По Московской области эффект составит минимум:

$47100,4 \cdot 0,47 \cdot 0,3 \cdot 1,6423 = 10906,771$ млн. рублей в год.

Учитывая предельные уровни тарифов на электрическую энергию на территориях, максимальный эффект и минимальный период окупаемости достигается в регионах с максимальными тарифами – Иркутская область, Ханты-Мансийский автономный округ, Чукотский автономный округ, Ямало-Ненецкий автономный округ, особенно при замене двигателей с непрерывным режимом работы, например – насосные агрегаты водоснабжения, вентиляторы, прокатные станы; высоконагруженных двигателей, например – лифты, эскалаторы, транспортёры.

Для расчёта периода окупаемости за основу приняты цены ОАО «УралЭлектро». Полагаем, что с предприятием заключён контракт по замене обмоток двигателя АДМ 132 М4 насосного агрегата. Цена двигателя 11 641 рубль. Стоимость работ по его замене (30% стоимости) 3 492,3 рубля. Дополнительные расходы (10% стоимости) 1 164,1 рубля.

Всего затрат:

$11\ 641 + 3\ 492,3 + 1\ 164,1 = 16\ 297,4$ рубля.

Экономический эффект составит:

$11\ \text{кВт} \cdot 0,3 \cdot 1,6423\ \text{руб./кВт} \cdot \text{ч} \cdot 1,18 \cdot 24 = 153,48278$ рублей в сутки (с НДС).

Период окупаемости:

$16\ 297,4 / 153,48278 = 106,18$ суток или 0,291 года.

Для остальных мощностей расчёт даёт аналогичные результаты. Учитывая, что время работы двигателей на промышленных предприятиях может не превышать 12 часов, период окупаемости может составлять не более 0,7–0,8 года.

Предполагается, что по условиям контракта предприятие после уплаты услуг по замене обмоток выплачивает в течение трёх лет 30% от экономии электроэнергии. В этом случае доход составит:

$153,48278 \cdot 365 \cdot 3 = 168\ 063,64$ рубля.

Следовательно, замена одного двигателя малой мощности позволяет получить доход от 84 до 168 тысяч рублей в год. В среднем

от замены двигателей с одного небольшого коммунального предприятия можно получить доход не менее 4,8 млн. рублей.

Эти выкладки не голословны. Они сделаны на основании многолетнего опыта эксплуатации двигателей с совмещёнными обмотками в различных регионах бывшего СССР и в различных отраслях народного хозяйства. Вот один из конкретных примеров.

В ходе испытаний, проведенных на стендах Китайского насосного завода, штатный двигатель мощностью 5,5 кВт был заменён на двигатель с совмещёнными обмотками мощностью 4,0 кВт. Насос обеспечил все параметры в соответствии с требованиями ТУ, при этом двигатель практически не грелся и на всех режимах показал снижение удельного потребления электроэнергии в среднем на 0,5 кВт*ч.

При таком раскладе у потенциального заказчика возникает дилемма - мотать по старинке, покупать более совершенные двигатели или же переводить свои двигатели на совмещённые обмотки. Первые два варианта решения вроде как привычны, но что если всё, что сказано выше правда? Ведь есть высокая вероятность, что конкуренты воспользуются этим решением для снижения собственных издержек. А вот с этим бизнес уже не сможет так просто согласиться. Поэтому он неизбежно вынужден будет пойти на масштабную замену обмоток. Конкуренцию и дух соперничества, однако, никто не отменял.

Вот тут то и кроется ответ на главный вопрос – какое мнение верно? Думаю, что обмотчикам не составит большого труда посчитать сколько потребуется лет для перемотки всех двигателей в его регионе на совмещённые обмотки. И что надо предпринять, чтобы успеть это сделать за оставшуюся активную часть жизни. А для того, чтобы всё это можно было претворить в жизнь, вначале необходимо показать собственникам двигателей, что это не очередной развод на деньги. Что им предлагается взаимовыгодное долгосрочное партнёрство.

Общие положения

Прежде, чем приступить к рассмотрению принципов построения и расчёта совмещённых обмоток, проведём небольшой «экскурс» по некоторым основам. Как известно, стандартные обмотки электрических машин подключаются к трехфазной электрической сети по схеме «звезда»

(рис. 1, а) или «треугольник». При этом обмотку двигателя в «треугольник» возможно соединить одним из двух способов (рис. 1, б и в).

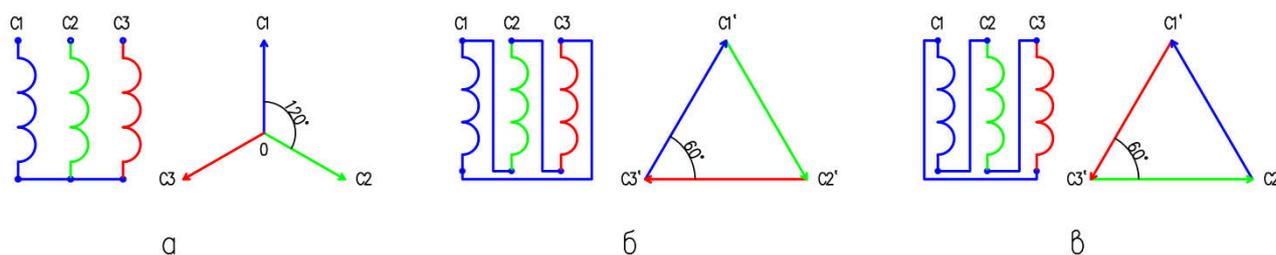


Рис. 1 Схемы соединения стандартных обмоток

Схемы отличаются друг от друга порядком соединения обмоток. Для каждого варианта соединения рядом со схемой приведена векторная диаграмма напряжений, приложенных к обмоткам. Диаграммы представлены в общепринятом виде. Следует обратить внимание на векторные диаграммы рис. 1, б и в. В зависимости от схемы соединения, они отличаются направлением векторов одноимённых фаз. Угол между этими векторами составляет 60 градусов.

В отличие от стандартных, совмещённые обмотки содержат не один, а два комплекта катушек. При этом один комплект соединяют в «звезду», а другой в «треугольник». Между собой «звезду» и «треугольник» можно соединить двумя способами. Первый способ – это последовательное соединение. Он предполагает два варианта последовательного соединения (рис. 2 и 3), отличающиеся направлением векторов.

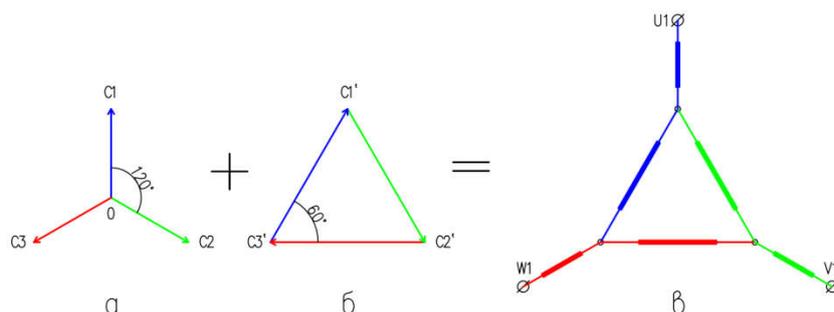


Рис. 2 Первый вариант последовательного соединения «звезды» и «треугольника»

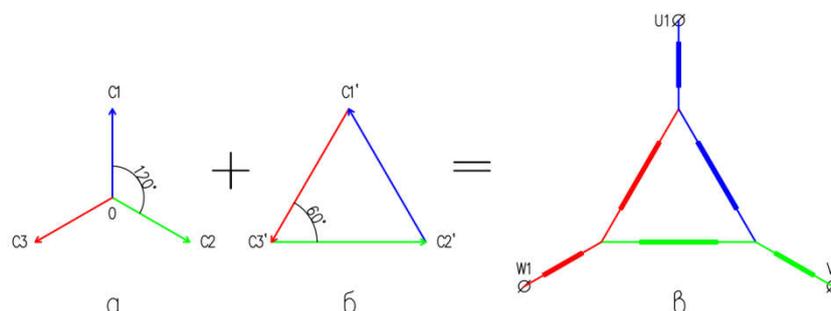


Рис. 3 Второй вариант последовательного соединения «звезды» и «треугольника»

В дальнейшем последовательное соединение рассматривать не будем. Основное внимание уделим второму способу – параллельному соединению «звезды и «треугольника». Его так же можно выполнить двумя способами Рис. 4 и Рис. 5. При «объединении» систем векторов «звезды» (Рис. 4а и Рис. 5а) и «треугольника» (Рис. 4б и Рис.5б) получаем две системы векторов напряжений (Рис. 4г и Рис. 5г). В системе Рис. 4г вектор напряжения C1 опережает вектор C1', а в системе Рис. 5г отстаёт от него. Приведенные векторные диаграммы наглядно показывают, что трёхфазные сети на практике

можно рассматривать как шестифазные. Это свойство трёхфазных сетей широко используется для снижения уровня пульсаций при создании различных выпрямительных устройств.

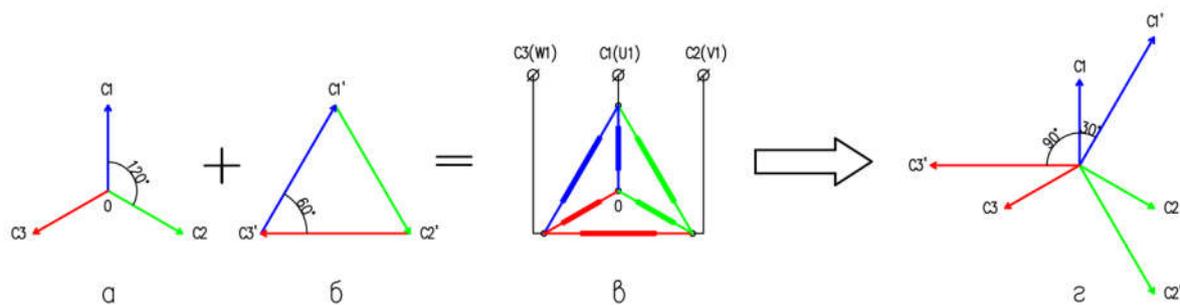


Рис. 4 Первый способ параллельного соединения «звезды» и «треугольника»

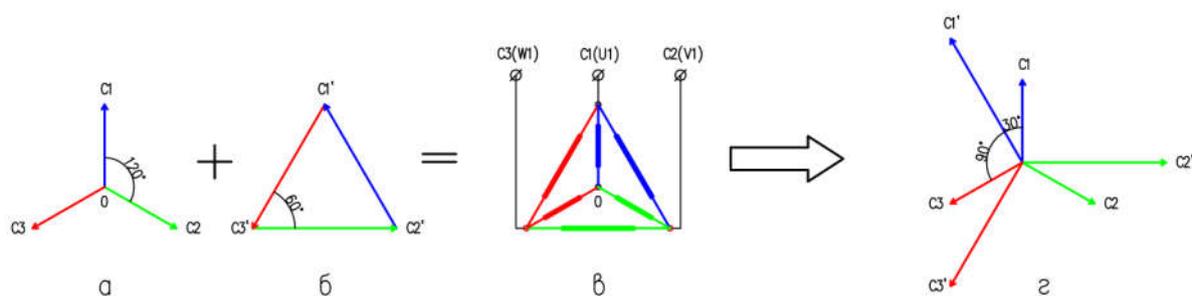


Рис. 5 Второй способ параллельного соединения «звезды» и «треугольника»

Несмотря на привычные нам изображения «звезды» и «треугольника» с указанием углов между векторами в 120 и 60 градусов, на практике каждый обмотчик знает, что за выводом С1 следует вывод С6. То есть за началом первой фазы следует конец третьей фазы, а затем следует начало второй фазы и так далее (Рис. 6).

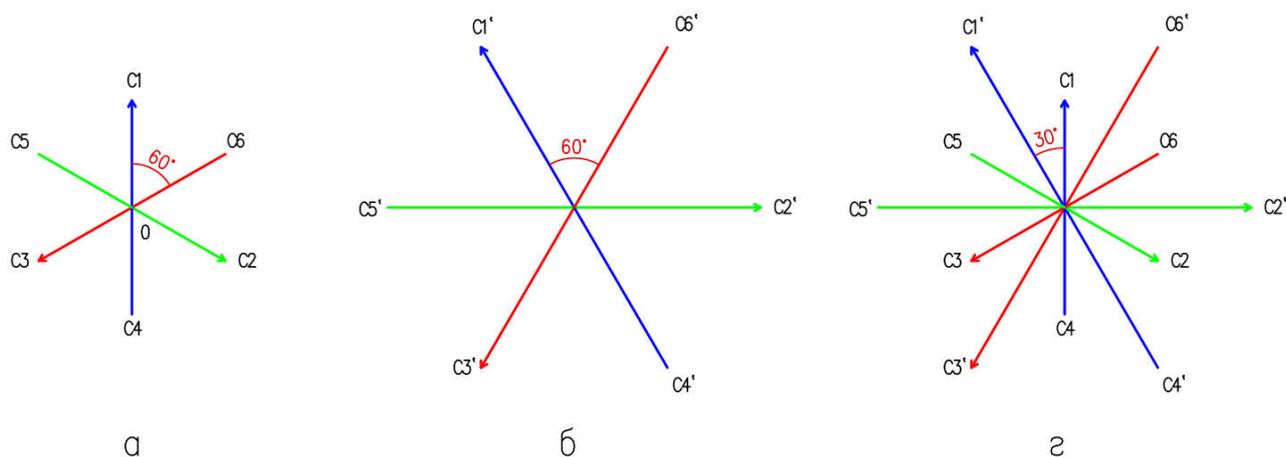


Рис. 6 Изображение векторов с учётом укладки обмоток

При таком изображении векторов всё «становится на свои места», что в «звезде» (Рис. 6а), что в «треугольнике» (Рис. 6б) вектора (как и катушки в стандартной обмотке электрической машины) следуют друг за другом через 60 градусов. При «сложении» двух систем мы получаем картинку с равномерным распределением векторов через 30 градусов (Рис. 6г). Эти 30 градусов будут играть важную роль при построении схем совмещённых обмоток.

Из всего выше описанного отметим наиболее важное:

1. К трёхфазным сетям можно подключать шестифазную нагрузку. Для этого одна её часть должна быть соединена в «треугольник», а другая в «звезду».
2. К элементам нагрузки, соединённым в «звезду» прикладывается фазное напряжение, а к элементам, соединённым в «треугольник» линейное. При этом линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз (в 1,73 раза) превышает фазное.
3. «Звезду» и «треугольник» между собой можно соединить как последовательно, так и параллельно.
4. При параллельном соединении, в зависимости от схемы соединения в «треугольник», получаем две системы векторов напряжений, прикладываемых к нагрузке. Между собой они отличаются взаимным расположением векторов одноименных фаз.
5. Вектора напряжений одноименных фаз «звезды» и «треугольника» при их параллельном соединении образуют между собой угол 30 градусов.
6. Вектора напряжений близлежащих фаз «звезды» и «треугольника» при их параллельном соединении образуют между собой угол 90 градусов.

Теперь вспомним, чем отличаются геометрические градусы от электрических. Любая окружность, как геометрическая фигура, содержит 360 градусов. Поперечное сечение внутренней поверхности статора (Рис. 7) и наружной поверхности ротора электрической машины представляют собой окружность.

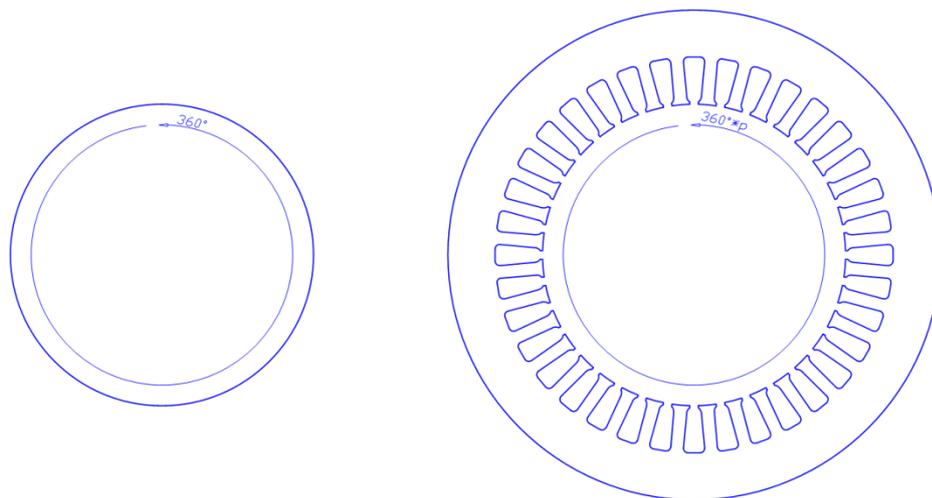


Рис. 7 Окружность и поперечное сечение статора электрической машины.

(Естественно, что внутреннюю поверхность расточки статора окружностью называть можно только условно.) С геометрической точки зрения эти окружности содержат 360 «геометрических» градусов. А если их рассматривать с точки зрения электромашиностроения, то они содержат $360 \cdot p$ электрических градусов, где p – число пар полюсов электрической машины. При этом, можно утверждать, что на один паз приходится $360 \cdot p / z$ электрических градусов, где z – число пазов.

Конкретный пример. На рис. 7 изображен разрез статора, имеющего $z=36$ пазов. Если это статор электрической машины с $2p=2$, то на один паз приходится $360 \cdot 1 / 36 = 10$ электрических градусов, для $2p=4$ соответственно $360 \cdot 2 / 36 = 20$ электрических градусов, для $2p=6$ – $360 \cdot 3 / 36 = 30$ электрических градусов.

Конструкция совмещённых обмоток

Итак, конструкция совмещённых обмоток обусловлена тем, что в соответствии с возможными схемами подключения электрической машины к трёхфазной сети (звезда или треугольник) в ней можно объединить две системы обмоток, на которые действуют напряжения, образующие между

векторами углы в 30, 60, 90 и 120 электрических градусов. При этом часть обмотки должна быть включена в звезду, а часть в треугольник.

В соответствии с этим правилом должны быть сконструированы и уложены полюсные катушки электрических машин с совмещёнными обмотками. Вот тут-то и кроется интрига. Впервые «скрестить» звезду с треугольником попытались ещё в 1916 году, но из-за несовершенства электромагнитной системы существенного эффекта не добились и идею забросили. Затем эти попытки предпринимались регулярно, с периодичностью в несколько десятков лет, вплоть до конца прошлого века. И то же без существенных результатов. Мы изучили патенты тех лет и выяснили следующее:

1. Катушки «звезды» и «треугольника» соответственно распределялись по всем пазам, и обмотки выполнялись минимум двухслойными. При этом один слой занимала «звезда», а второй «треугольник».
2. Предпочтение отдавалось последовательному соединению «звезды» с «треугольником».
3. Совмещённые обмотки исследовались со «стандартными» пакетами железа.
4. Основное внимание уделялось исследованию характеристик в режимах работы с номинальной нагрузкой.
5. Сдвиг между выводами начал и концов одноименных фаз «звезды» и «треугольника» составляет 30 электрических градусов.

На первый взгляд всё правильно и логично. Но это только на первый взгляд.

Для начала проанализируем пункт 5. Рассмотрим утверждение для случая $z=24$ и $2p=2$. На один паз у нас приходится $360 \cdot 1/24=15$ электрических градусов. Следовательно, начала и концы фаз «звезды» и «треугольника» между собой должны быть сдвинуты на $30/15=2$ паза. Всё сходится. Теперь рассмотрим утверждение для $z=36$ и $2p=4$. Имеем – на один паз приходится $360 \cdot 2/36=20$ электрических градусов, а сдвиг должен составлять $30/20=1,5$ паза. Не сходится. Получается, что по «ранним» патентам совмещение обмоток имеет существенные ограничения. Но и это ещё не всё.

На Рис.8 приведены два варианта схемы совмещённых обмоток Славянка для $z=24$; $2p=2$; $a=1$; $\gamma=1-12$. Согласно «ранним» патентам выводы одноименных фаз должны располагаться со сдвигом на 2 паза. А у нас получается для фазы U_1 в одном случае Рис. 8а выводы «звезды» катушка 1 и выводы «треугольника» катушка 2 сдвинуты на 1 паз. Во втором случае Рис. 8б они сдвинуты на 3 паза. Не стыкуется, однако схема работает и дает хорошие результаты. Точно такие же нестыковки возникают и при равно секционной намотке с одним шагом $\gamma=1-13$. А если принять во внимание, что в этом случае в одних катушках вывода могут располагаться снаружи катушек, а в других внутри?

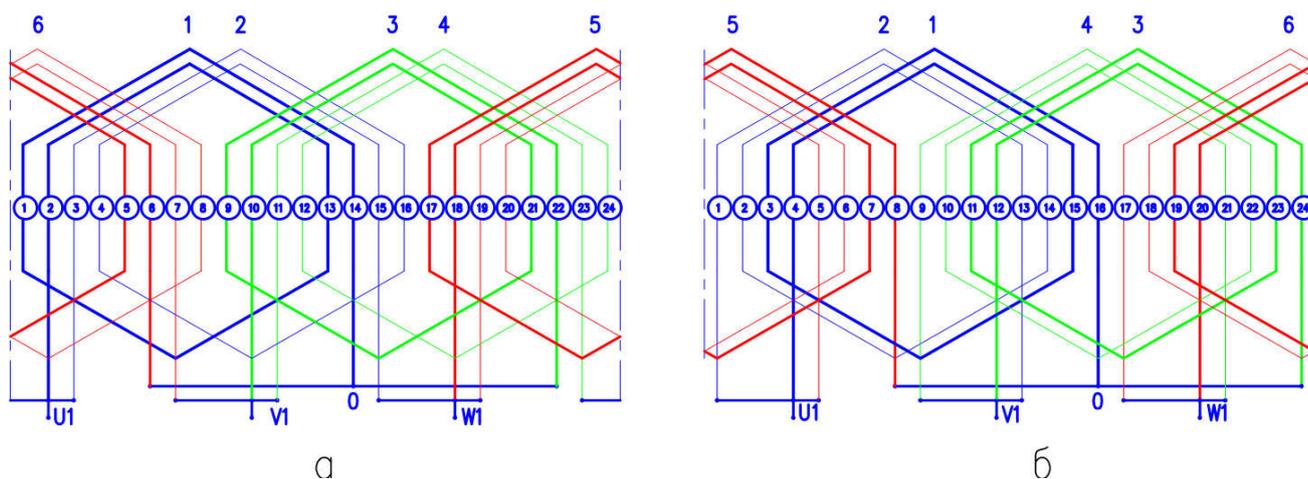


Рис. 8 Схемы совмещённых обмоток $z=24$, $2p=2$, $a=1$, $\gamma=1-14$; $2-13$.

Из этого можно сделать вывод, что требование по расположению выводных концов в «ранних» патентах не только существенно ограничивает возможность реализации совмещённых обмоток, но и является абсурдным, противоречащим здравому смыслу.

Но тем не менее. Если через полюсные катушки провести магнитные оси Рис. 9, (для данных схем они совпадают с геометрическими осями полюсных катушек), через центры которых проходят результирующие вектора магнитной индукции то можно констатировать следующее:

1. Оси катушек одноименных фаз «звезды» и «треугольника» отстоят друг от друга на два паза (30 электрических градусов).
2. Оси катушек «звезды», равно как и «треугольника», располагаются через восемь пазов (120 электрических градусов).
3. Взаимное расположение осей не зависит от расположения выводных концов и способа намотки катушек (равносекционные или концентрические).
4. Сдвиг между катушками в 30 электрических градусов сохраняется независимо от порядка укладки и подключения катушек «звезды» и «треугольника».

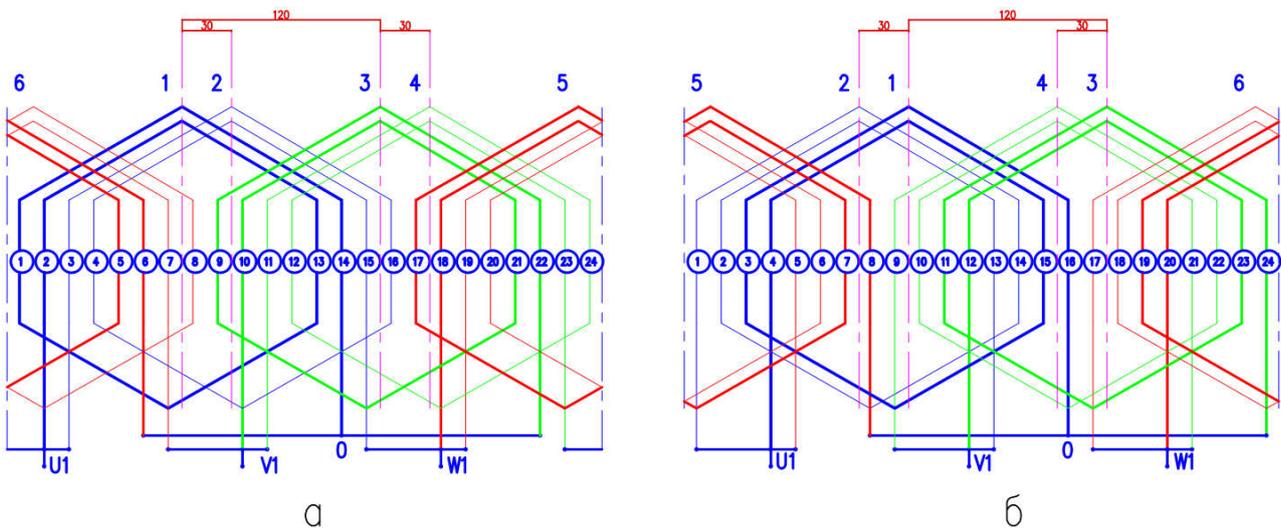


Рис. 9 Смещение осей полюсных катушек для $z=24$, $2p=2$, $a=1$, $\gamma=1-14$; $2-13$.

Получается, что для построения схем совмещённых обмоток нужно руководствоваться не взаимным расположением выводных концов, а взаимным расположением результирующих векторов магнитной индукции (взаимным расположением магнитных осей) полюсных катушек. Естественно задаться вопросом – а как быть если сдвиг составляет, например, полтора или два с половиной паза? И в этом случае правило работает Рис. 10.

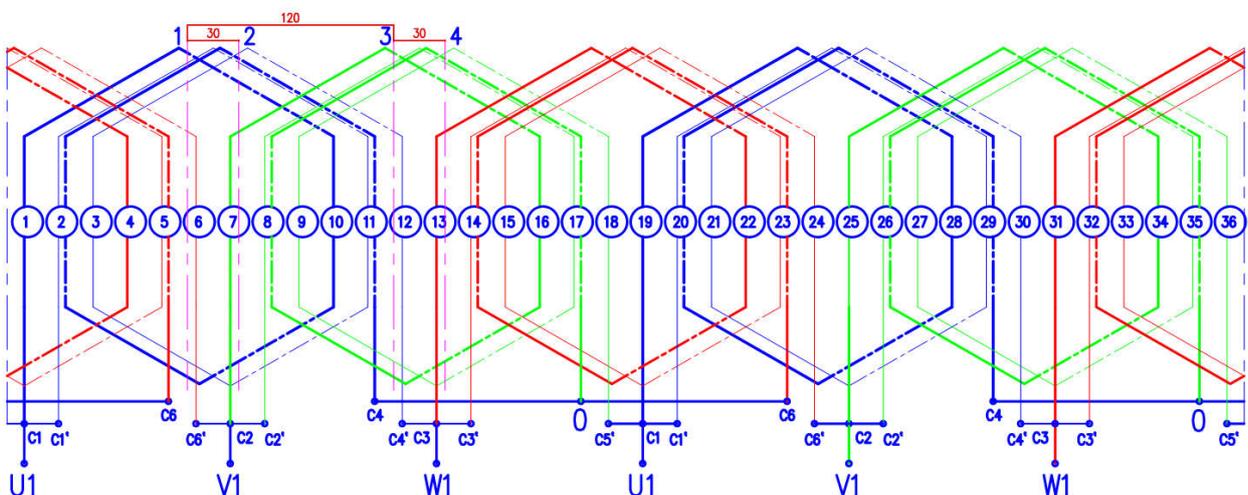


Рис. 10 Схема со смещением осей полюсных катушек на 1,5 паза для $z=36$, $2p=4$, $a=2$, $\gamma=1-10$.

Для данной схемы сдвиг составляет 1,5 пазы. Как он формируется рассмотрим на примере полюсных катушек 1-2-3-4. Катушка 1 состоит из двух секций. Первая секция занимает первый и десятый пазы, а вторая секция занимает половину второго пазы и половину одиннадцатого пазы. Во второй секции витков в два раза меньше, чем в первой секции. За счёт этого магнитная ось первой катушки смещена на 0,25 пазы вправо от оси первой секции (Если бы секции имели равное число витков ось была бы смещена вправо на 0,5 пазы). Для второй катушки по аналогии ось смещена на 0,25 пазы влево от оси секции занимающей третий и двенадцатые пазы. За счёт этого и формируется сдвиг на 1,5 пазы между магнитными осями катушек «звезды» и «треугольника» одноименных фаз ($2 \cdot 0,25 - 0,25 = 1,5$ пазы). При этом сдвиг в 120 электрических градусов между фазными катушками сохраняется. При таком подходе к проектированию схем совмещённых обмоток их распределение по пазам полностью соответствует векторным диаграммам (Рис. 4г и Рис. 5г) и не зависит от мест расположения выводных концов.

В зависимости от порядка чередования полюсных катушек «звезды» и «треугольника» возможны два варианта их согласованного соединения. Если первой идёт полюсная катушка «звезды» (схема Рис. 9а, соответствующая ей векторная диаграмма Рис. 4г) совмещённые обмотки между собой соединяем:

$$\langle U1 \rangle - (C1 + C1' + C5'); \quad \langle V1 \rangle - (C2 + C2' + C6'); \quad \langle W1 \rangle - (C3 + C3' + C4'); \quad \langle 0 \rangle - (C4 + C5 + C6).$$

Если первой идёт полюсная катушка «треугольника» (схема Рис. 9б, соответствующая ей векторная диаграмма Рис. 5г) совмещённые обмотки между собой соединяем:

$$\langle U1 \rangle - (C1 + C1' + C6'); \quad \langle V1 \rangle - (C2 + C2' + C4'); \quad \langle W1 \rangle - (C3 + C3' + C5'); \quad \langle 0 \rangle - (C4 + C5 + C6).$$

Порядок соединения не зависит от числа пазов, пар полюсов и параллельных ветвей, он зависит только от порядка чередования катушек «звезды» и «треугольника».

Теперь по пункту 1. Приведенные схемы Рис. 8 и 9 однослойные, а Рис. 10 одно-двухслойная и выполнены как шестифазные. С той лишь разницей, что в чётных катушках в $\sqrt{3}$ раз больше витков, чем в нечётных. Вполне очевидно, что они намного проще в исполнении чем двухслойные (ниже трудоёмкость) и для их реализации требуется меньше изоляционных материалов.

По пункту 2. При последовательном соединении «звезды» с «треугольником» (Рис. 2, Рис. 3) несмотря на то, что все катушки охвачены общим результирующим магнитным потоком, катушки «звезды» неизбежно вносят определённый дополнительный сдвиг напряжения по фазе. И этот сдвиг в значительной мере зависит от режима работы электрической машины. Не факт, что это положительно сказывается на её характеристиках.

По пункту 3. Совершенно не понятно, почему на заре развития электрических машин, когда их парк был ещё незначительным, совмещённые обмотки пытались приспособить к сердечникам, рассчитанным на стандартные обмотки. Ведь абсолютно очевидно, что совмещённые обмотки создают совершенно иное распределение полей и для них необходимо специально проектировать электромагнитные системы.

По пункту 4. Совмещённые обмотки позволяют улучшить форму поля в рабочем зазоре электрической машины и как следствие существенно улучшить её основные характеристики. Поле в рабочем зазоре стандартной машины лишь условно можно назвать синусоидальным. На самом деле оно ступенчатое. В результате этого в двигателе возникают гармоники, вибрации и тормозящие моменты, которые оказывают отрицательное воздействие на двигатель и ухудшают его характеристики. Поэтому стандартный асинхронный двигатель обладает приемлемыми характеристиками только в режиме номинальной нагрузки. При нагрузке, отличной от номинальной, характеристики стандартного двигателя резко снижаются, снижается коэффициент мощности и КПД. Совмещённые обмотки так же позволяют уменьшить уровень индукции полей от нечётных гармоник, что приводит к существенному снижению общих потерь в элементах магнитопровода электрической машины и повышению его перегрузочной способности, повышению удельной мощности. Это так же позволяет выполнять двигатели для работы на более высокие частоты питающего напряжения при использовании сталей, рассчитанных для работы на частоте 50 Гц. Двигатели с совмещёнными

обмотками обладают меньшей кратностью пусковых токов при более высоких пусковых моментах. Это имеет существенное значение для оборудования, работающего с частыми и затяжными пусками, а также для оборудования, подключённого к протяженным и высоконагруженным сетям с высоким уровнем падения напряжения. Они генерируют меньше помех в сеть, и меньше искажают форму питающего напряжения, что имеет существенное значение для целого ряда объектов, оснащённых сложной электроникой и вычислительными системами. КПД двигателя с совмещёнными обмотками имеет значение близкое к номинальному в широком диапазоне нагрузок (от 0,3 до 1,4 номинальной).

Конечно, любой специалист может сказать, что всё это не более, чем красивые слова. Что всё это бездоказательно. Что примитивная замена обмоток, без замены основных электротехнических материалов на современные, не позволяет улучшить основные энергетические характеристики электрических машин. Постараемся опровергнуть эти предубеждения.

Почти столетие из одного печатного источника в другие кочует утверждение: - поле в рабочем воздушном зазоре асинхронной электрической машины по форме близко к синусоидальному. Интересно было бы узнать, каким прибором сто лет тому назад его измеряли? И почему в наши дни это утверждение никто не опровергает? Ведь современные методы исследования позволяют визуализировать реальную картину поля.

На Рис. 11 показана форма мгновенных абсолютных значений индукции поля в половине рабочего воздушного зазора (180 градусов по среднему диаметру) асинхронного двигателя АД100S2 со стандартной однослойной обмоткой (5,5 кВт; $2p=2$; $Z_1=24$) в установившемся режиме при номинальной нагрузке. Эта картинка более походит на фрагмент скелета грудной клетки птеродактиля, чем на синусоиду. Естественно, что в другие моменты времени поле несколько отличается от представленного на рисунке. Но это отличие не носит принципиального характера.

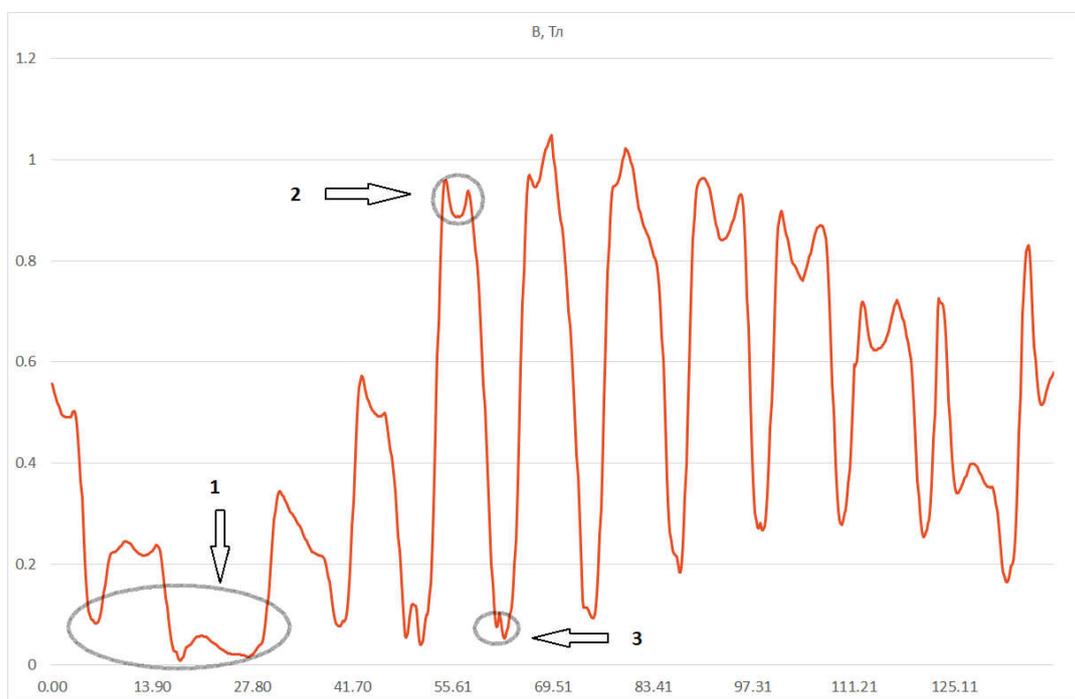


Рис. 11 Форма индукции поля в половине рабочего зазора асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе с номинальной нагрузкой.

По оси «Y» откладывается абсолютная величина индукции в [Тл], а по оси «X» длина дуги среднего диаметра рабочего воздушного зазора в [мм]. Какую полезную информацию мы можем почерпнуть из этого «скелета»:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,46 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 1,05 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,009 Тл.
4. Интегральное значение поля 63,51
5. За часть кривой, обозначенной на рисунке цифрой 1, ответственна конструкция обмотки. Рядом расположенные четыре секции двух полюсных катушек (Рис. 12) одной фазы практически не создают магнитного поля в зубцах между этими секциями. Например, в зубцах между пазами 11-12-13-14 ток, протекающий по фазе U1, индукции не создаёт. В следствии этого, результирующий магнитный поток (от всех трёх фаз) протекает в основном через восемнадцать зубцов, а в остальных шести зубцах индукция имеет ничтожно малое значение.
6. За зону 2 ответственность несут зубцы статора. «Рога» в этой зоне формируются на краях зубцов, вблизи раскрытия паза. Индукция на краях зубцов имеет максимальное значение.
7. За зону 3 отвечает открытый паз (щель через которую обмотчики укладывают проводники в паз).

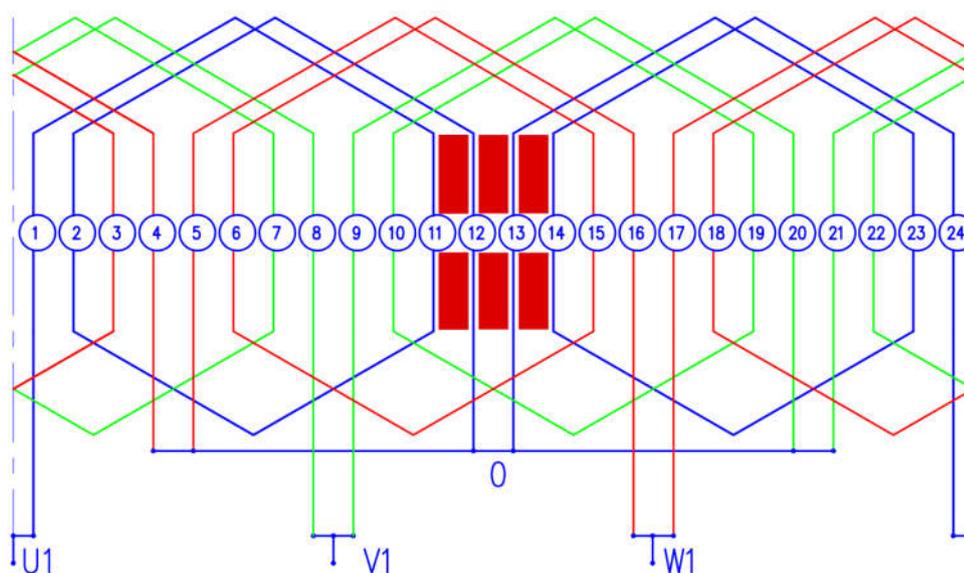


Рис. 12 Схема стандартной обмотки асинхронной машины $z=24$; $2p=2$.

Вот такая она у нас «синусоида» получается. Теперь рассмотрим «скелет» который мы получаем при замене в этом же двигателе стандартных обмоток на совмещённые (Рис. 13).

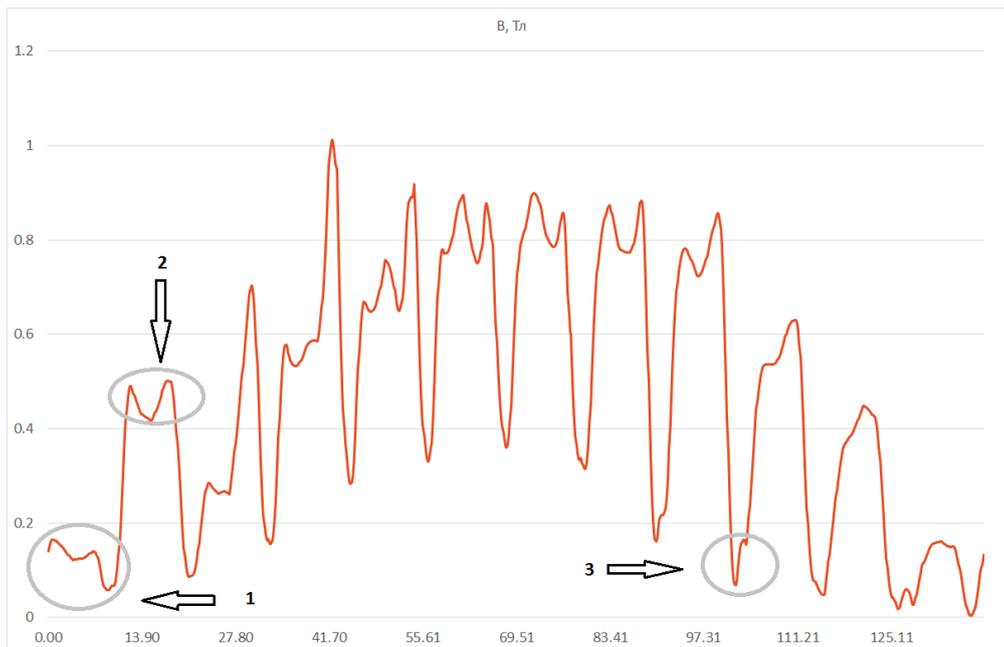


Рис. 13 Форма индукции поля в половине рабочего зазора асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе с номинальной нагрузкой.

Что мы имеем при тех же равных условиях:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,457 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 1,01 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,003 Тл.
4. Интегральное значение поля то же, что и при стандартной обмотке 63,52

На первый взгляд практически ничего. За исключением некоторого улучшения формы поля в зоне 1 (Рис. 13). Это объясняется тем, что при использовании совмещённых обмоток, уменьшается число зубцов с низким уровнем индукции. На Рис. 14 для наглядности показан зубец с низким уровнем индукции основной обмотки (звезды), расположенный между 13 и 14 пазом.

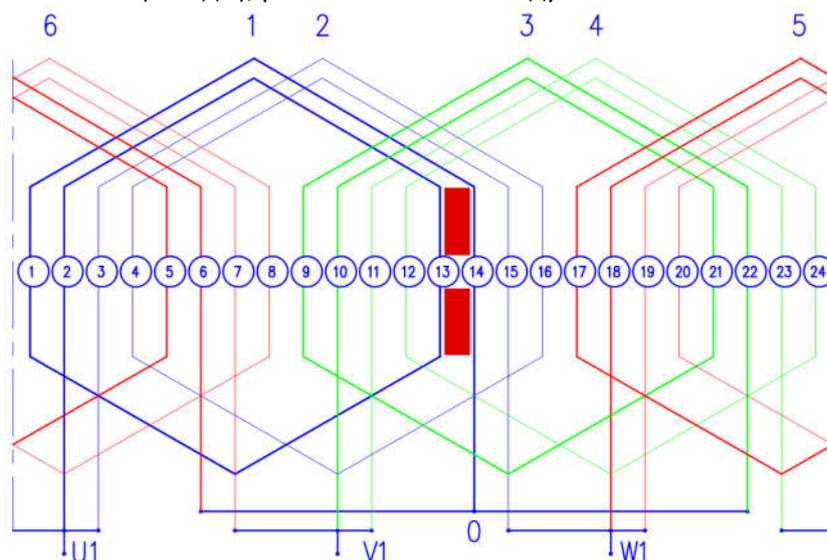


Рис. 14 Схема совмещённой обмотки асинхронной машины $z=24$; $2p=2$.

Из этого можно сделать вывод, что при работе двигателя в номинальном режиме замена обмотки практически не влияет на основные параметры поля (в пределах погрешности) в рабочем воздушном зазоре. Может именно это обстоятельство и сыграло «злую шутку» с совмещёнными обмотками на предыдущих этапах. Ведь подавляющее большинство исследователей основное внимание уделяло

изучению характеристик двигателей именно в номинальных режимах. Но и в этих режимах есть одно обстоятельство на которое следовало обратить внимание. Проиллюстрируем индукцию в спинках зубцов и пазах двигателя со стандартной и совмещённой обмотками (Рис. 15 и Рис. 16). На рисунках цифрой 1 обозначены зубцы, а цифрой 2 пазы. Разница очевидна и особых комментариев не требует.

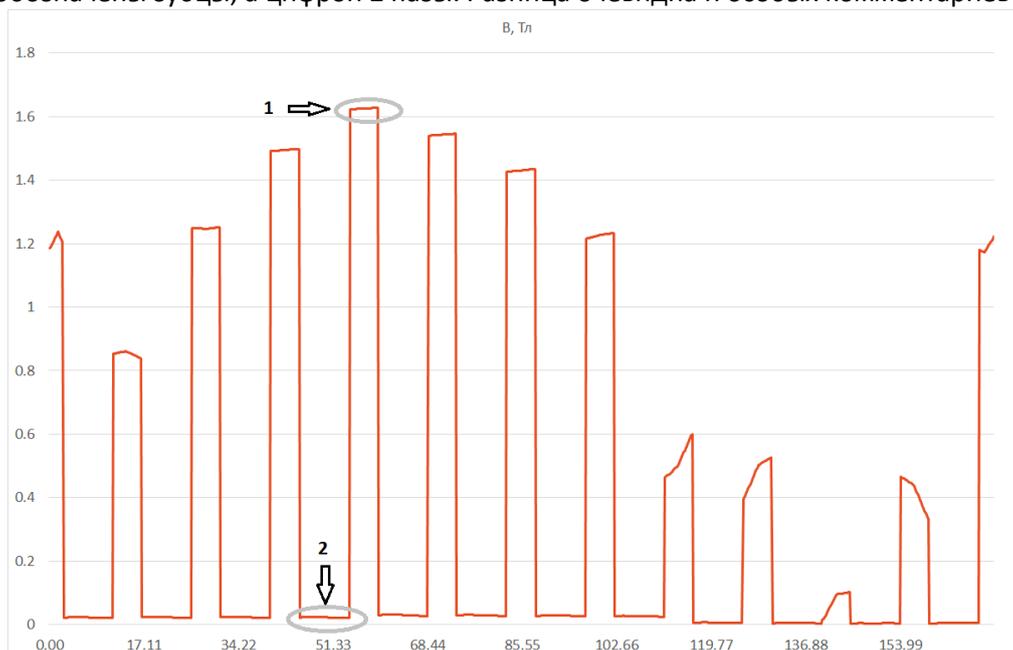


Рис. 15 Поле в спинках зубцов (1) и пазах (2) статора асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе с номинальной нагрузкой.

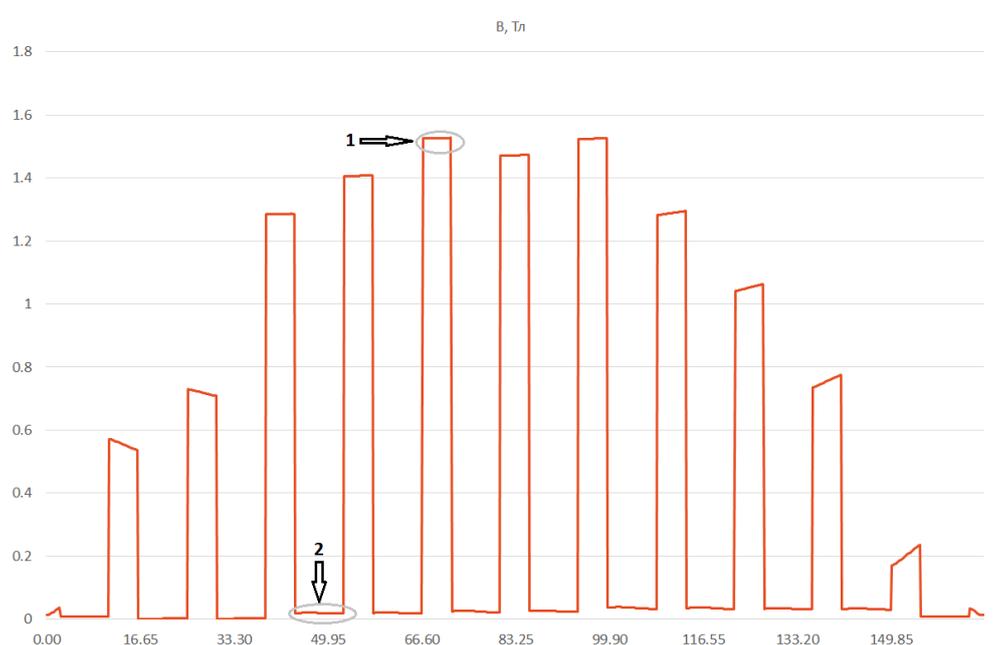


Рис. 16 Поле в спинках зубцов (1) и пазах (2) статора асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе с номинальной нагрузкой.

Как было показано выше, на схемах (Рис. 12 и Рис. 14), совмещённые обмотки позволяют увеличить площадь поверхности с «рабочим» уровнем индукции, следовательно, увеличивается рабочий магнитный поток. В итоге повышается нагрузочная способность двигателя. Так же в 2,8-3 раза снижаются потери в стали. А это уже не так мало. Но и это далеко не всё.

Теперь рассмотрим поле двигателя в режиме пуска. Для стандартных обмоток форма поля представлена на Рис. 17, и она даже отдалённо не напоминает синусоиду.

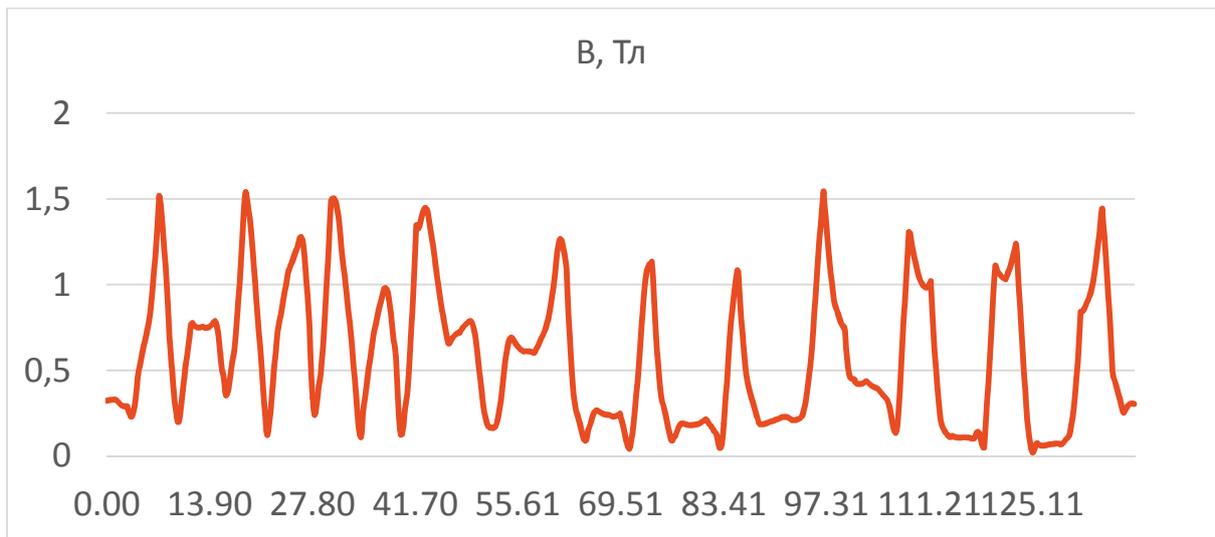


Рис. 17 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме пуска.

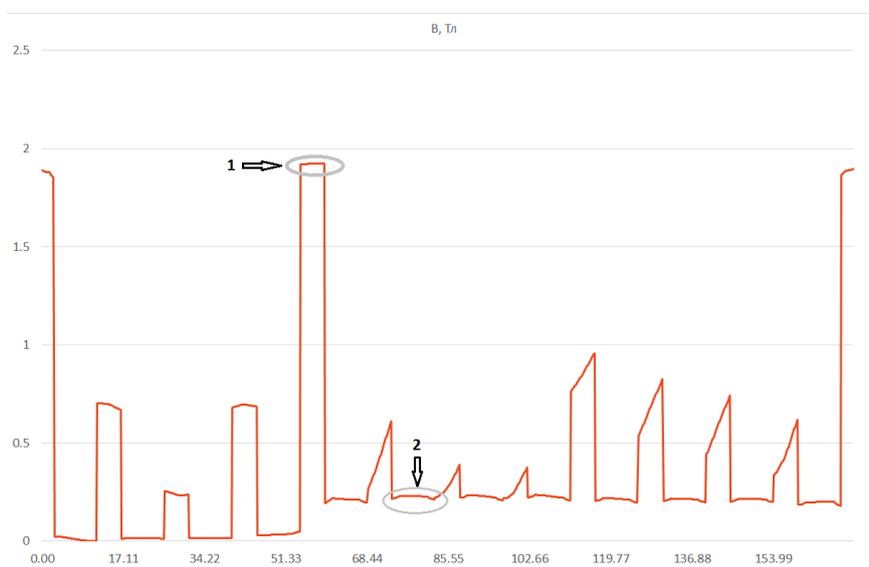


Рис. 18 Поле в спинках зубцов (1) и пазах (2) статора асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме пуска.

Основные характеристики поля для стандартных обмоток в режиме пуска:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,584 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 1,54 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,02 Тл.
4. Интегральное значение поля 81,2

Теперь посмотрим картинку для совмещённых обмоток Рис. 19

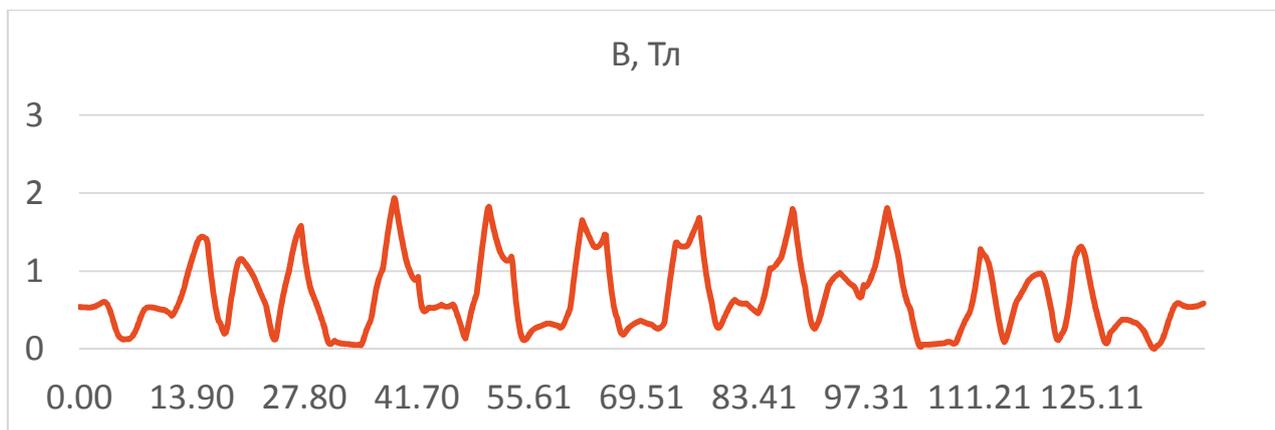


Рис. 19 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме пуска.

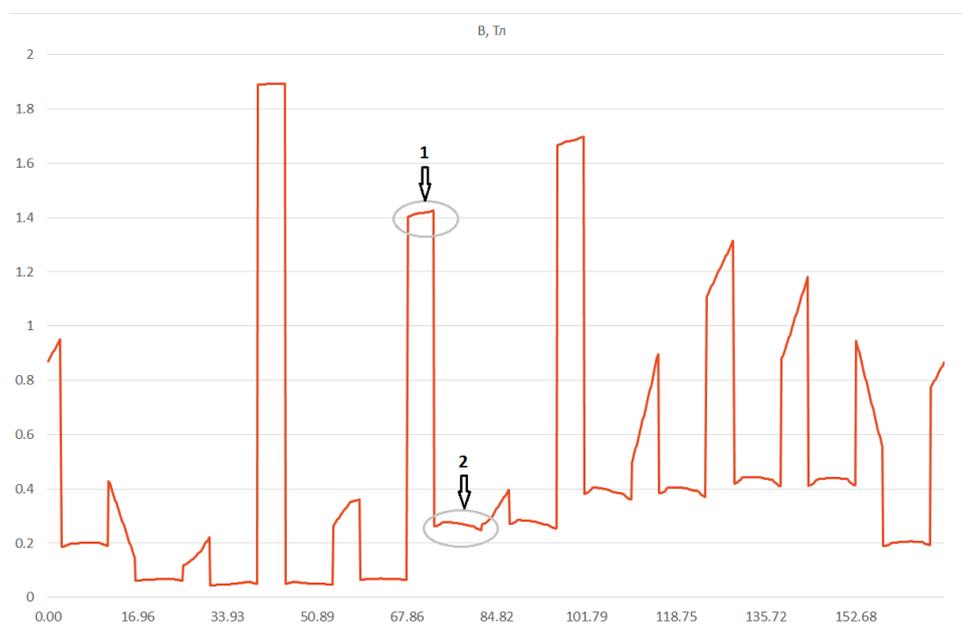


Рис. 20 Поле в спинках зубцов (1) и пазах (2) статора асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме пуска.

Основные характеристики поля для совмещённых обмоток в режиме пуска:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,671 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 1,94 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,0 Тл.
4. Интегральное значение поля 93,34

Основные характеристики поля в пусковом режиме явно отличаются. Для совмещённых обмоток они заметно выше. Это неизбежно должно сказаться на кратности пусковых моментов и токов. Теперь рассмотрим режим 30% нагрузки. Вначале стандартные обмотки.

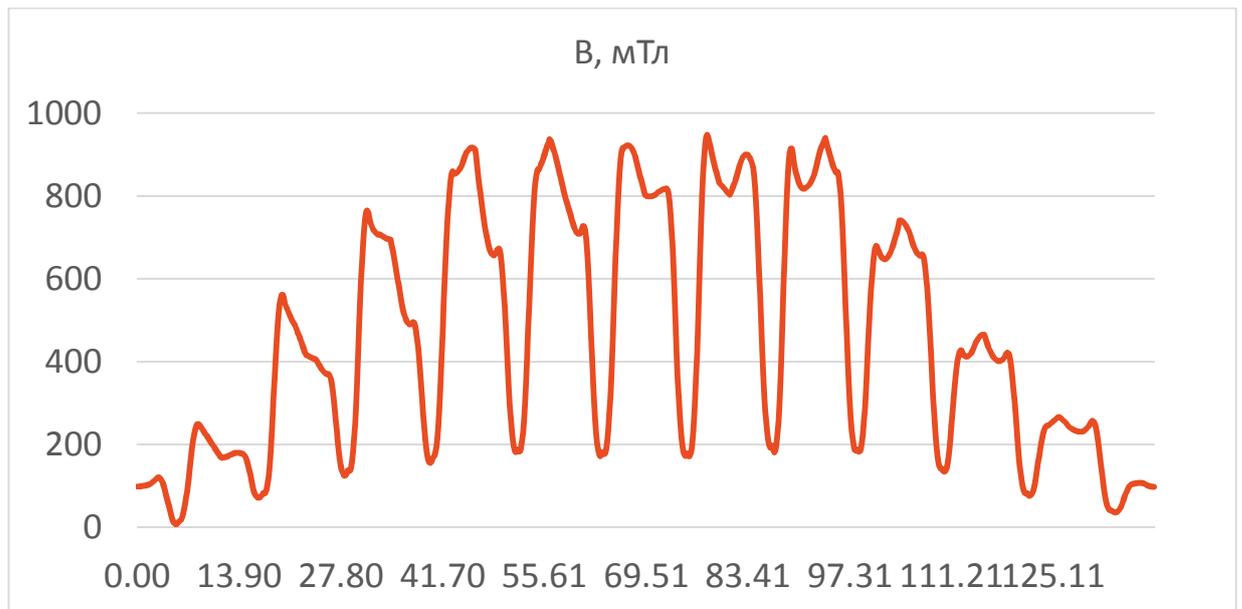


Рис. 21 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя со стандартной обмоткой для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме 30% нагрузки.

Основные характеристики поля для стандартных обмоток в режиме 30% нагрузки:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,462 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,948 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,0 Тл.
4. Интегральное значение поля 64,273

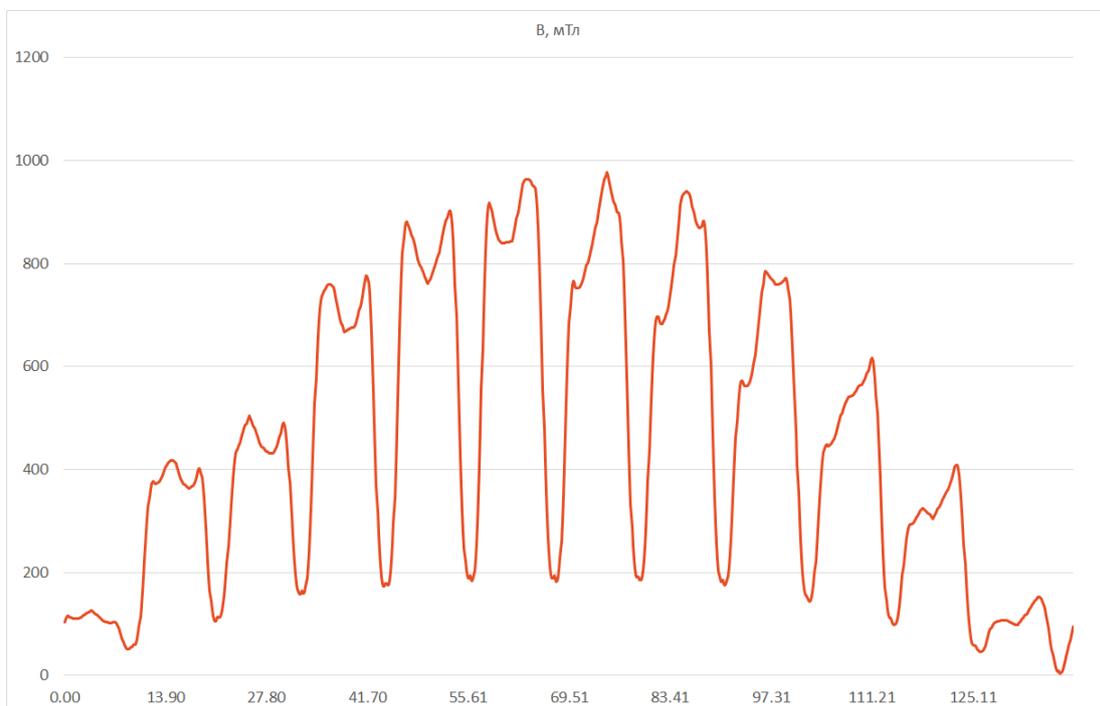


Рис. 22 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя с совмещённой обмоткой для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме 30% нагрузки.

Основные характеристики поля для совмещённых обмоток в режиме 30% нагрузки:

1. Среднее значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,452 Тл.
2. Максимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,992 Тл.
3. Минимальное значение индукции поля в воздушном зазоре составляет 0,0 Тл.

4. Интегральное значение поля 62,98

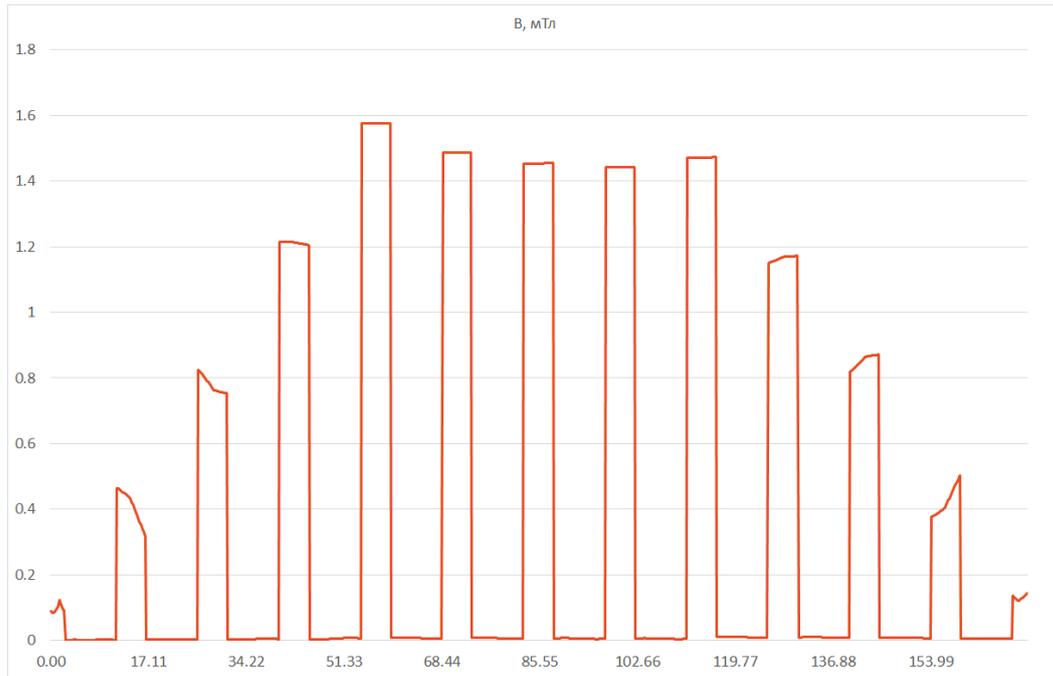


Рис. 23 Поле в спинках зубцов и пазах статора асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при 30%.

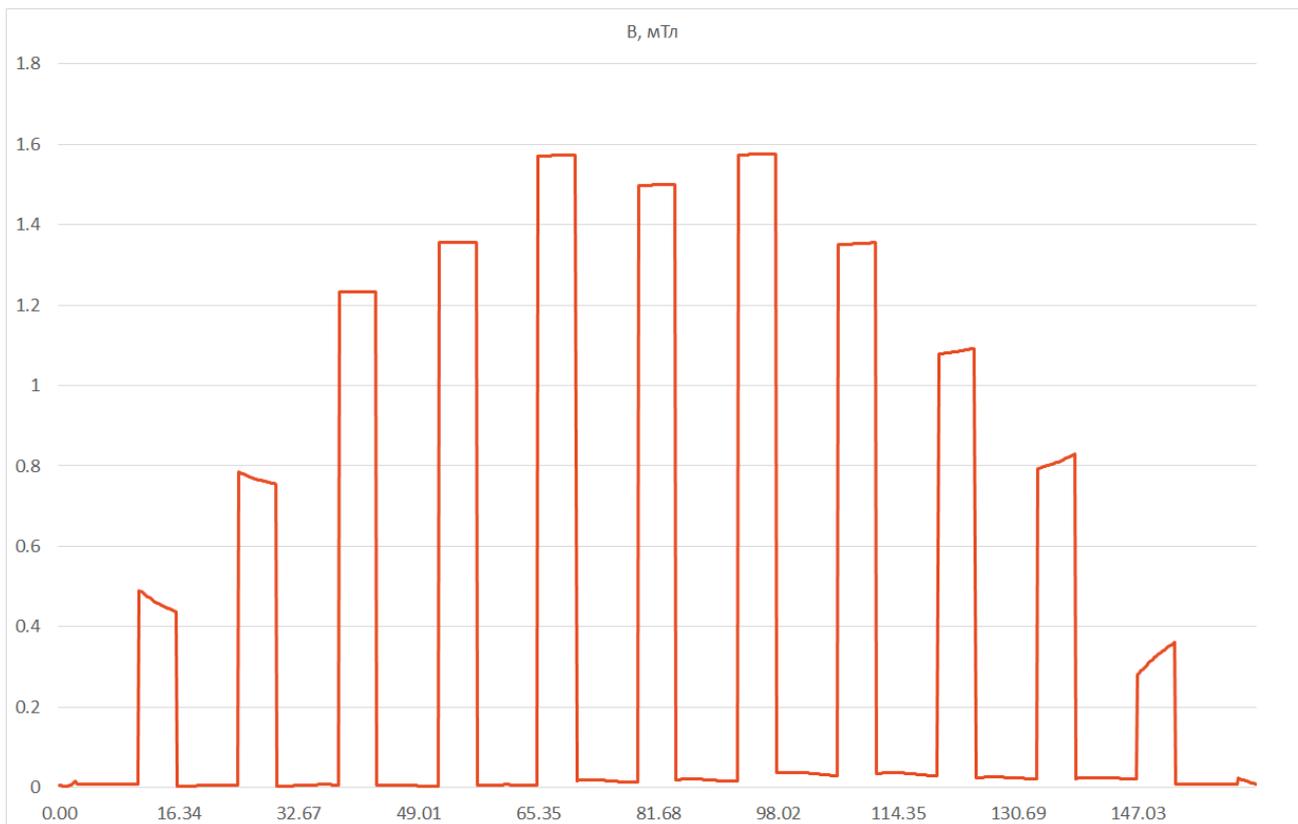


Рис. 24 Поле в спинках зубцов и пазах статора асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при 30%.

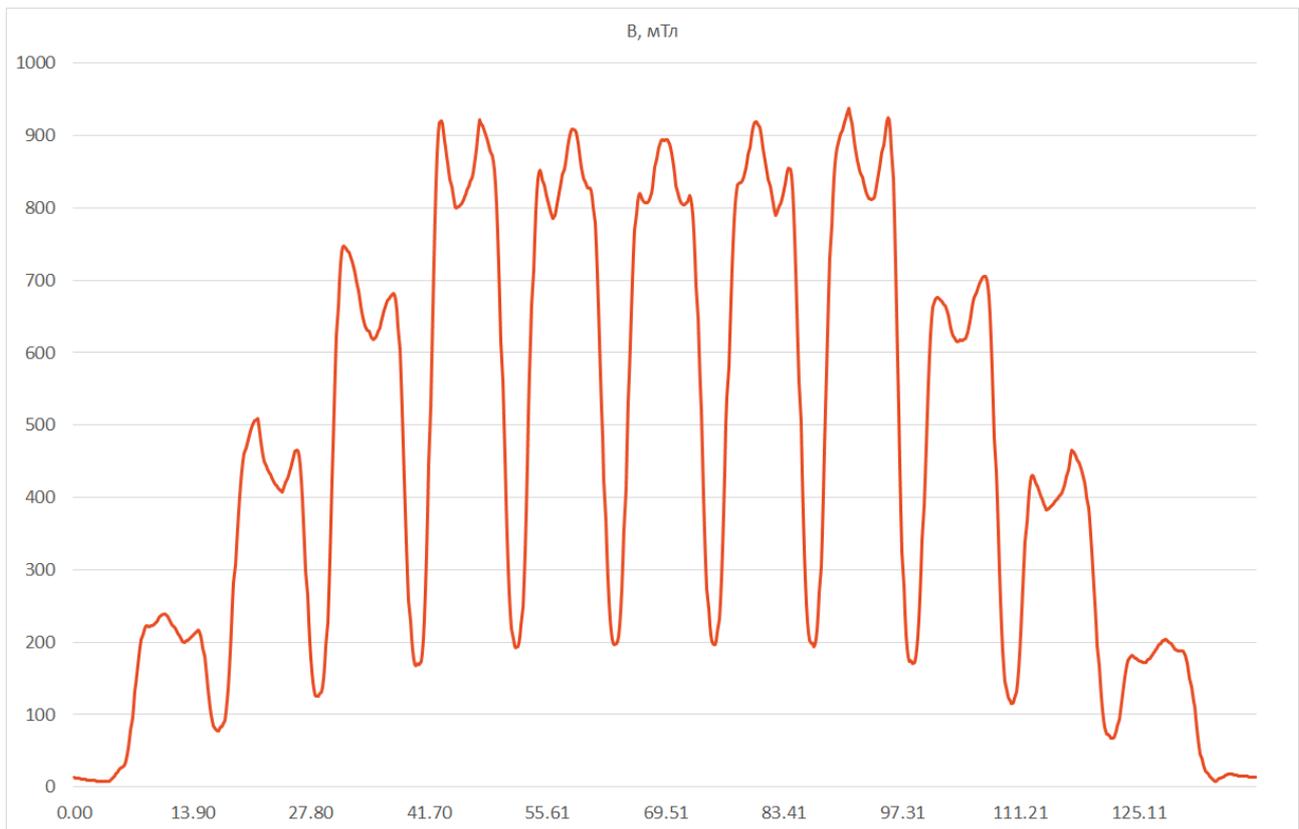


Рис. 25 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме холостого хода.

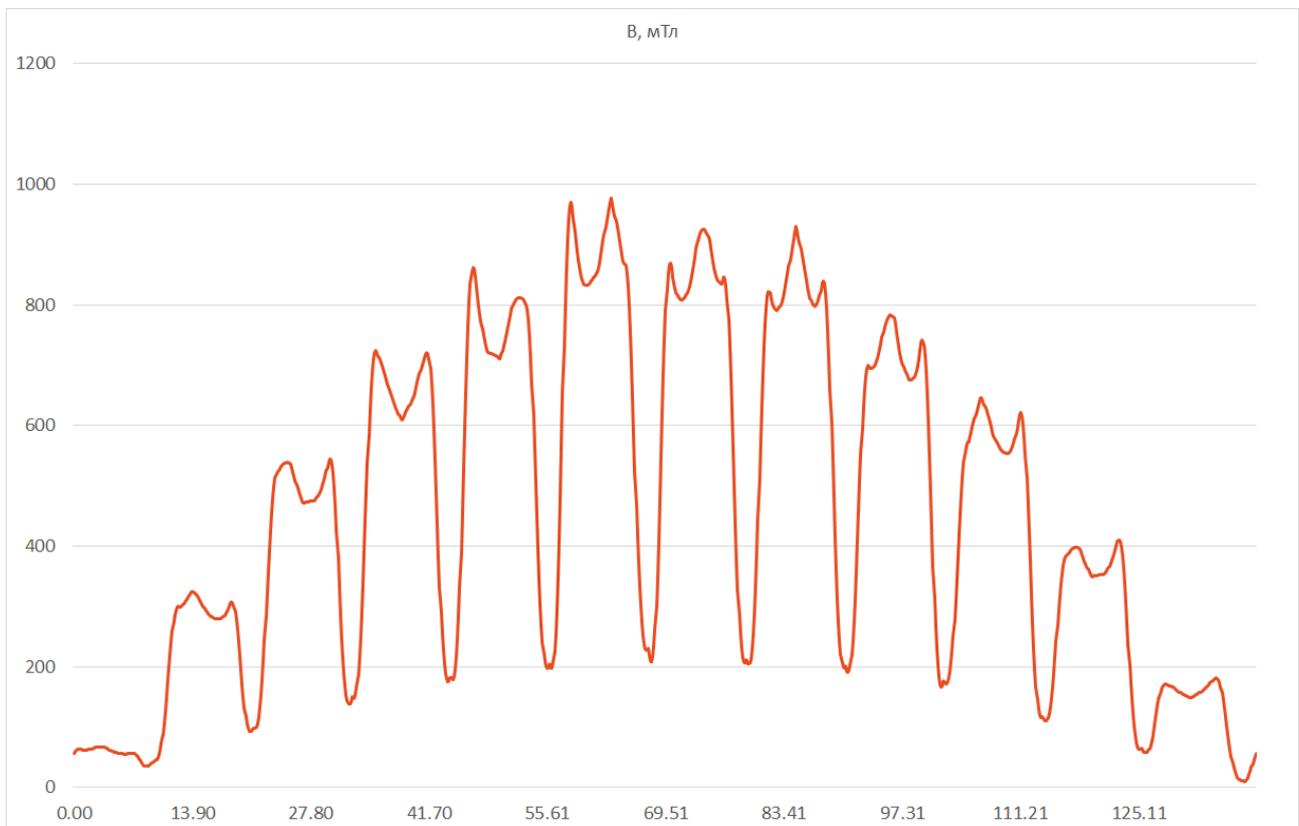


Рис. 26 Форма индукции поля в рабочем зазоре асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме холостого хода.

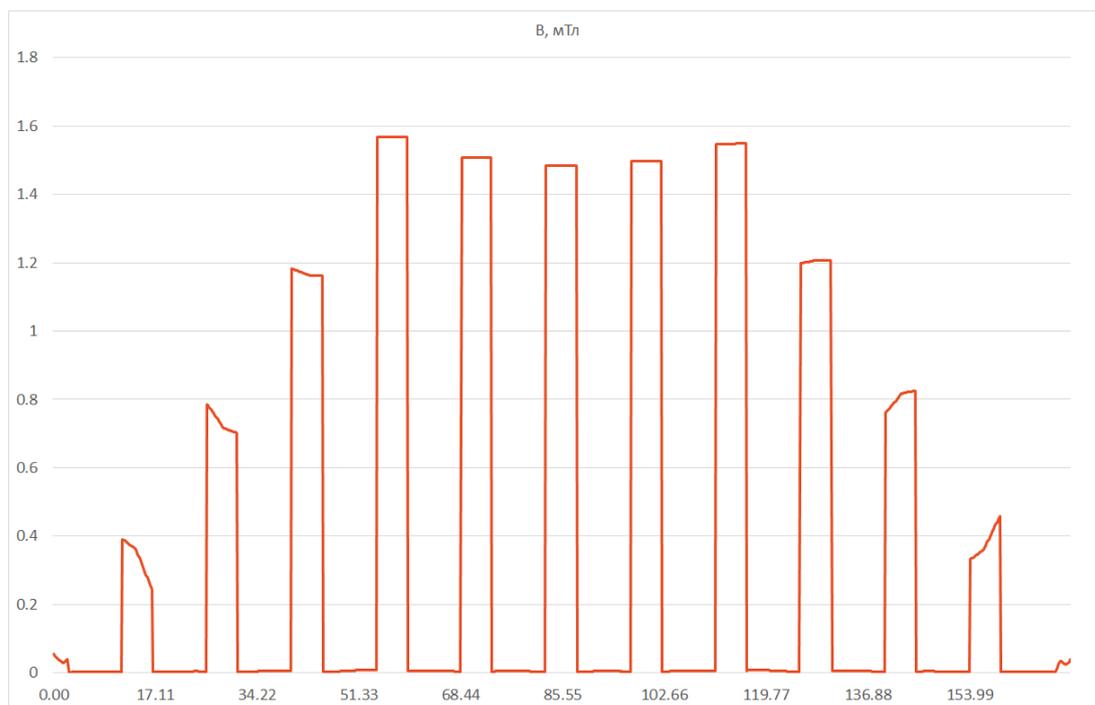


Рис. 27 Поле в спинках зубцов и пазах статора асинхронного двигателя со стандартными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме холостого хода.

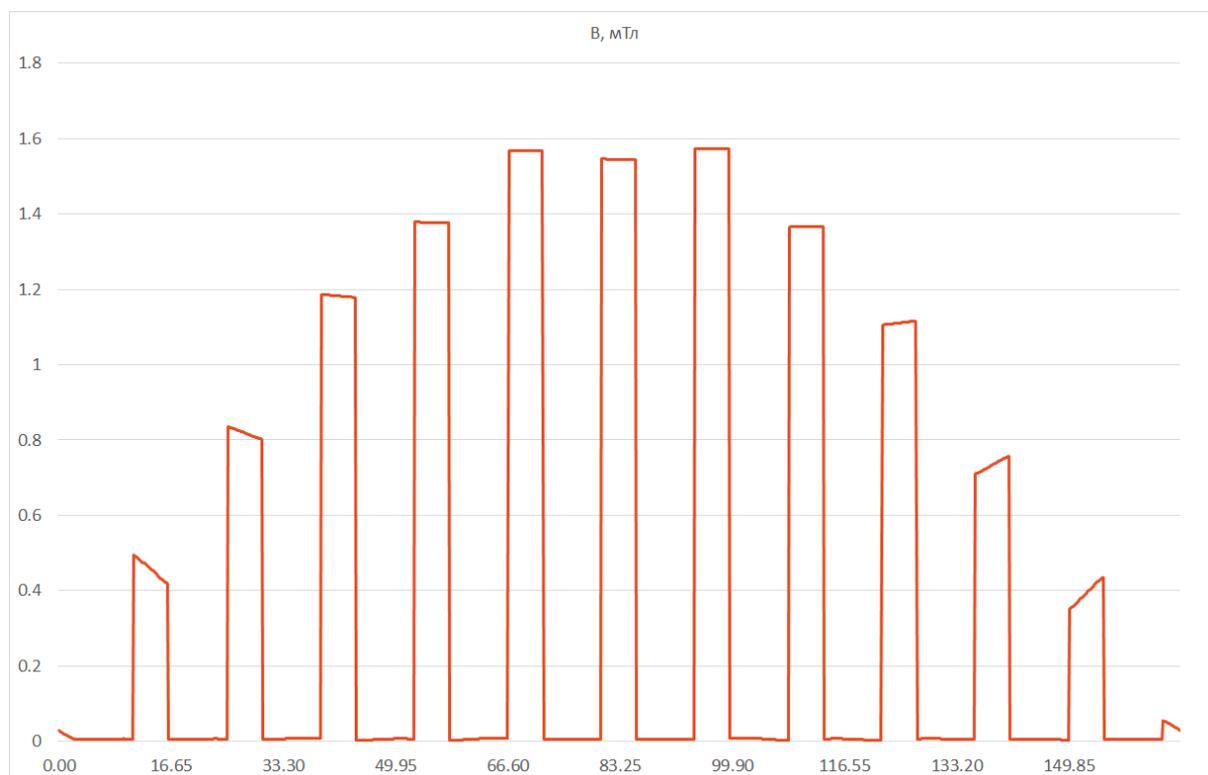


Рис. 27 Поле в спинках зубцов и пазах статора асинхронного двигателя с совмещёнными обмотками для $z=24$; $2p=2$ при работе в режиме холостого хода.

Из приведённых графиков видно, что форма поля двигателя с совмещёнными обмотками во всех режимах работы более «гармонична», чем у стандартного двигателя. Это естественным образом не могло не отразиться на механической характеристике двигателя. На Рис.28 представлены

механические характеристики двигателя со стандартной и совмещённой обмотками, полученные при проведении стендовых испытаний.

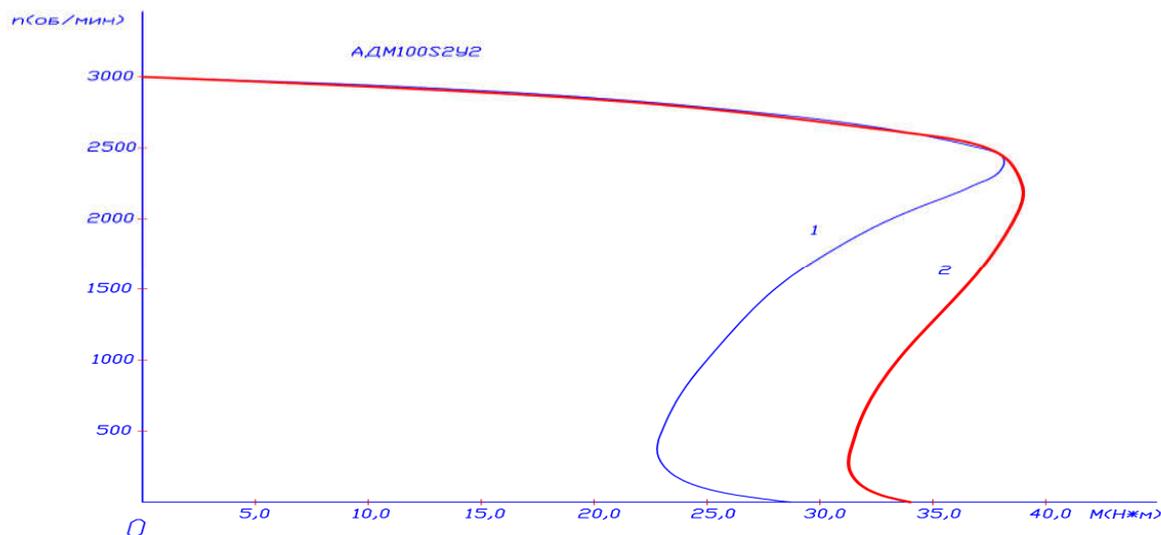


Рис. 28 Механическая характеристика асинхронного двигателя АДМ100S2Y2 (1 – со стандартными обмотками, 2 – с совмещёнными обмотками)

Представленные механические характеристики хорошо коррелируются с результатами исследований поля. Так, что в совмещённых обмотках нет никакой мистики и проявлений тёмной материи. Всё в строгом соответствии с законами физики. Что это даёт нам на практике?

В результате, без увеличения трудоёмкости, при меньшей материалоемкости, без изменения существующих технологий, при равных прочих условиях, получаем двигатели по своим характеристикам существенно превосходящие стандартные. В отличие от известных методов повышения энергоэффективности, предлагаемое решение наименее затратное и реализуемо не только при производстве новых двигателей, но и при капитальном ремонте и модернизации существующего парка. На рисунке 3 показано, как изменилась механическая характеристика от замены стандартной обмотки на совмещённую при капитальном ремонте двигателя.

Ни одним другим известным способом невозможно столь радикально и эффективно улучшить механические характеристики существующего парка двигателей. Результаты стендовых испытаний, проведенных Центральной заводской лабораторией ЗАО «УралЭлектро-К» г. Медногорск, подтверждают заявленные параметры. Полученные данные подтверждают и результаты, полученные при проведении испытаний в НИПТИЭМ г. Владимир.

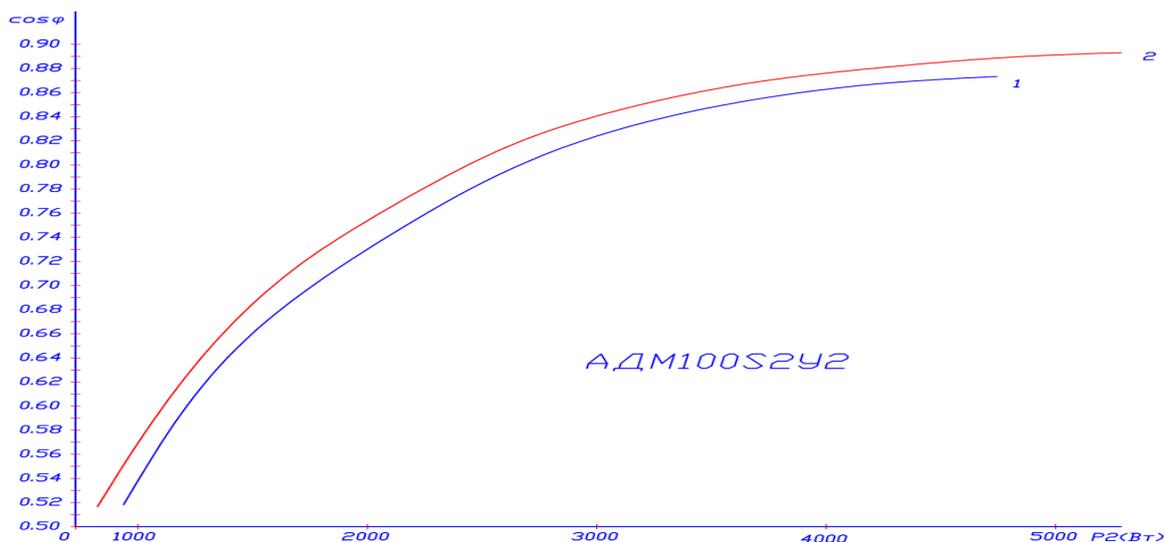


Рис. 29 График коэффициента мощности двигателя АДМ100S2У2
(1 – со стандартными обмотками, 2 – с совмещёнными обмотками)

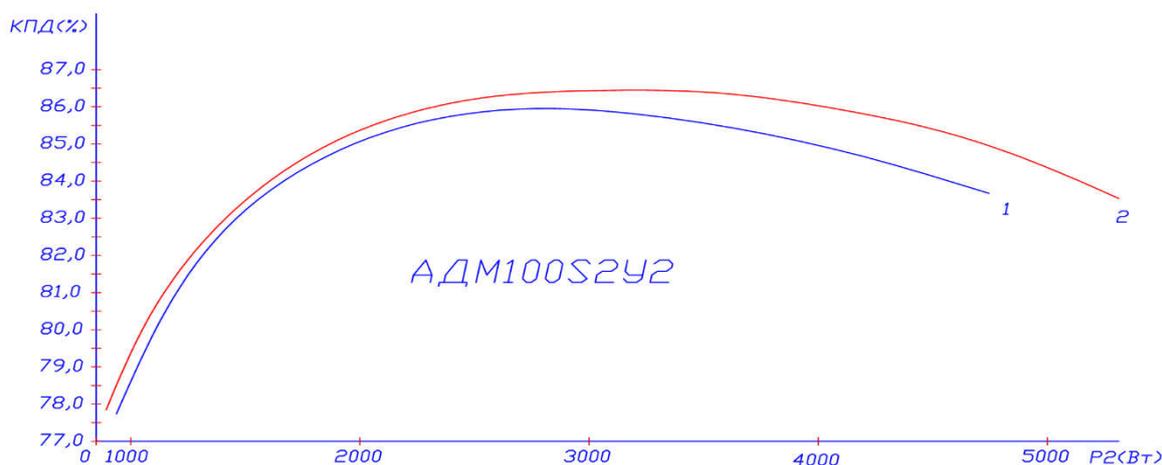


Рис. 30 График КПД двигателя АДМ100S2У2
(1 – со стандартными обмотками, 2 – с совмещёнными обмотками)

Среднестатистические данные основных энергетических показателей КПД и $\cos \varphi$, полученные при испытании партии модернизированных двигателей, превышают каталожные данные стандартных двигателей. В комплексе, все вышеприведенные показатели, обеспечивают двигателям с совмещёнными обмотками характеристики, превосходящие лучшие аналоги. Это было подтверждено даже на первых опытных образцах модернизированных двигателей. Ниже приведена выдержка из протокола испытания асинхронных двигателей АДМ112М2-У2 (совмещённые обмотки) от 07.03.12 г.