

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИЗАЦИИ
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
ИМЕНИ В. М. МОЛОТОВА

Инженер М. С. ЛЕВИН

ВОПРОСЫ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
ПРОФЕССОР С. А. БУРГУЧЕВ

МОСКВА — 1950

Вопросы параллельной работы электрических станций для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

На современном этапе широкой электрификации сельского хозяйства Советского Союза, когда электрифицируются целые районы и группы районов, важное значение приобретает создание местных электрических систем. Целесообразность и возможность создания таких систем впервые подробно обоснована в ряде работ ЭНИН АН СССР доктором технических наук А. Г. ЗАХАРИНЫМ.

Организация местных электрических систем в значительной степени разрешает проблему рационального использования местных энергетических ресурсов, повышает обеспеченность и надежность электроснабжения потребителей, улучшает качество электроэнергии и уменьшает ее стоимость.

Сельские электрические системы должны на основе рационального использования местных энергетических ресурсов в ближайший период обеспечить надежное электроснабжение сельскохозяйственных потребителей большей части территории СССР. Поэтому всестороннее изучение местных систем и режимов их работы является неотложной задачей научно-исследовательских учреждений, работающих в области сельской электрификации. Результатом исследования местных систем, в первую очередь, должно явиться создание методов энергетических, экономических и технических расчетов, доступных широкому кругу инженеров и техников.

Целью настоящей работы явилась разработка методов энергетических и электрических расчетов местных систем на основе их теоретического и опытного исследования.

В первой части работы рассмотрена методика определения дополнительной выработки гидроэнергии, величина которой часто решает вопрос об экономической целесообразности создания местной электрической системы.

Во второй части рассмотрены вопросы устойчивости местных электрических систем, определяющие технические

102325

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. Киргизской ССР

предпосылки для их создания. Основное внимание при этом уделено исследованию пуска относительно мощных асинхронных двигателей в местных системах.

Работа выполнена автором во время пребывания в аспирантуре при кафедре «Производство и распределение электрической энергии в с.х.» МИМЭСХ и работы в лаборатории электрических сетей и систем ВИЭСХ в 1946—1950 гг.

Опытное исследование устойчивости систем электрических машин проведено в лаборатории кафедры «Электрические машины» МИМЭСХ, расчеты устойчивости выполнены в лаборатории электрических систем ЭНИН АН СССР с помощью расчетного стола переменного тока.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ВЫРАБОТКА ГИДРОЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ГИДРОСТАНЦИИ В МЕСТНОЙ СИСТЕМЕ.

При переходе ГЭС от изолированной работы на параллельную, за счет более полного использования энергии водотока, увеличивается выработка электроэнергии ГЭС. Это обстоятельство является одним из основных факторов, обуславливающих целесообразность объединения станции малой мощности. Возможность простого и вместе с тем достаточно точного подсчета величины дополнительной выработки гидроэнергии позволила бы значительно упростить анализ работы ГЭС в местной системе, а также решение многих технико-экономических задач.

Для систем с высоким гидроэлектрическим коэффициентом методика такого анализа, основанная на использовании интегральных кривых сезонного стока, была в свое время предложена в уже упоминавшихся работах ЭНИН АН СССР. Там же отмечалось, что, в связи с отсутствием для малых рек многолетних данных об их расходах, чрезвычайно желательным является построение для отдельных групп рек данной естественно-географической зоны ряда типовых характеристик, применение которых может значительно упростить энергетические и технико-экономические расчеты местных систем и, в первую очередь, расчеты по определению дополнительной выработки гидроэнергии.

В задачу настоящей работы входила проверка возможности построения типовых характеристик на примере 10 рек Окского бассейна. Расчеты по построению типовых характеристик целесообразно вести по отдельным сезонам, которые резко различаются друг от друга по режиму водотока и по характеру потребления электрической энергии. Такой

способ расчета дает незначительную ошибку по сравнению с расчетами по отдельным месяцам и, вместе с тем, позволяет вскрыть структуру энергоснабжения и энергопотребления в разрезе года. В качестве исходных данных для расчетов были приняты значения среднемесячных расходов рек, что является допустимым, учитывая цель работы.

Построение и сравнение интегральных кривых сезонного стока для рек Окского бассейна показало, что для створов с числом лет наблюдений 10 и более максимальные отклонения отдельных кривых от средней для зимнего сезона не превосходят 10%, а для летнего и осеннего сезона — 6,5%. Поэтому ошибка при пользовании средними кривыми для расчетов по створу, для которого имеются данные лишь за 3—5 лет, будет, как правило, меньше, чем при пользовании кривыми, построенными по данным за эти несколько лет. В связи с этим следует признать целесообразным построение типовых интегральных кривых сезонного стока и для других бассейнов.

При различных гидрологических и водохозяйственных расчетах широко пользуются кривыми распределения случайных величин. В работе рассмотрен вопрос о возможности интерпретации кривых обеспеченности месячных расходов для каждого сезона, как кривых распределения 3 типа.

Для решения этого вопроса были вычислены коэффициенты вариации рядов месячных расходов для отдельных сезонов. В предположении, что $C_v = 2C_o$, были построены кривые обеспеченности месячных расходов, которые затем интегрировались. Полученные кривые сравнивались с соответствующими интегральными кривыми сезонного стока, построенными по данным наблюдений. Сравнение показало, что только в двух случаях из рассмотренных 12 максимальное расхождение между соответствующими кривыми превышало 15%, оставаясь в остальных случаях значительно меньшим.

Таким образом, сезонные кривые обеспеченности месячных расходов для рек рассматриваемого бассейна с достаточной для практических целей точностью могут быть получены из кривых распределения 3 типа. Если это обстоятельство будет подтверждено расчетами и по другим бассейнам, представляется целесообразным построение карт изолиний коэффициентов вариации сезонных расходов малых и средних рек основных сельскохозяйственных районов СССР. Такие карты с успехом могли бы быть использованы при проектировании и анализе режимов местных систем.

В работах ЭНИН АН СССР было показано, что анализ работы ГЭС в системе с высоким гидроэлектрическим коэффициентом удобно производить с помощью так называемой

универсальной характеристики использования водотка, дающей зависимость между коэффициентами использования водотока и обеспеченностью энергопотребления и позволяющей достаточно обосновано подойти к выбору структуры системы. Построение и сравнение универсальных характеристик использования водотока для рек Окского бассейна показало, что для створов с числом лет наблюдений 10 и более может быть получена средняя универсальная характеристика, значения которой мало отклоняются от значений отдельных характеристик. Максимальные отклонения отдельных кривых от средней остаются, как правило, меньше 3—5%, достигая лишь в узкой области 6—12%. Использование типовых универсальных характеристик, построенных и для других бассейнов, должно значительно упростить технико-экономические расчеты местных систем.

Метод определения дополнительной выработки гидроэнергии в местной системе, изложенный в работе, непосредственно следует из общей методики построения универсальной характеристики и основан на использовании интегральных кривых сезонного стока с одновременным учетом характера потребления энергии (сезонных графиков нагрузки). С помощью этого метода были построены кривые дополнительной выработки гидроэнергии при различных расчетных расходах ГЭС и при различных соотношениях мощностей ГЭС и ТЭС в системе.

Сравнение кривых дополнительной выработки для створов с большим числом лет наблюдений показало, что отклонения отдельных кривых от средней колеблются в пределах от 8 до 20%. Поэтому средние кривые дополнительной выработки гидроэнергии могут быть использованы при различных ориентировочных расчетах.

На табл. 1 приведена типовая зависимость дополнительной выработки от структуры системы при расчетном расходе ГЭС, равном среднемуголетнему расходу.

Таблица 1

Дополнительная выработка гидроэнергии
(в долях среднегоголетнего внепаводкового стока)
при различных соотношениях мощностей ГЭС и ТЭС

Отношение мощностей ТЭС и ГЭС в системе	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Дополнительная выработка гидро- энергии	0,095	0,145	0,178	0,200	0,215	0,225

Рассмотрение кривых дополнительной выработки показало также, что дополнительная выработка гидроэнергии в системе незначительно меняется с изменением расчетного расхода и зависит главным образом от соотношения мощностей ГЭС и ТЭС.

УСТОЙЧИВОСТЬ МЕСТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПУСКЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Особенностью местных электрических систем является соизмеримость мощностей генераторов и отдельных потребителей (короткозамкнутых асинхронных двигателей). Это обстоятельство вносит определенное изменение в постановку вопроса при рассмотрении устойчивости местных систем. В то время, как в крупных электрических системах нарушения устойчивости, как правило, имеют место лишь в аварийных или послеаварийных режимах, устойчивость местных систем может быть нарушена при определенных условиях в режиме пуска мощных асинхронных двигателей, т. е. в режиме, являющемся нормальным с точки зрения эксплуатации. Поэтому первоочередным требованием, которому должны удовлетворять местные системы, является сохранение устойчивости в режимах пуска короткозамкнутых асинхронных двигателей, мощность которых соизмерима с мощностью генераторов системы.

В работе рассмотрены вопросы устойчивости местных систем при пуске короткозамкнутых двигателей. Главное внимание уделено получению простых и, вместе с тем, достаточно надежных методов расчета предельных мощностей двигателей, допустимых к включению по условиям сохранения устойчивости системы.

Нами принималось, что на генераторах отсутствует автоматическое регулирование напряжения. Это в основном соответствует существующим в настоящее время условиям. Влияние вынужденных колебаний, вызываемых неравномерным ходом первичных двигателей, не рассматривалось.

1. РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ МЕСТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ПОСТОЯННЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ НАГРУЗКИ.

Для случаев включения заторможенных двигателей в схемах генератор-шина бесконечной мощности и два генератора соизмеримой мощности А. Г. ЗАХАРИНЫМ были введены понятия о верхнем и нижнем пределах устойчивости.

Верхний предел устойчивости соответствует мощности заторможенного двигателя, включение которого на шинах

генератора приводит к нарушению статической устойчивости системы. Нижний предел устойчивости определяется по правилу площадей и соответствует мощности заторможенного двигателя, при включении которого на шинах генератора устойчивость системы сохраняется. Оба предела определяются при постоянстве ЭДС за синхронными реактивностями генераторов.

Методика, разработанная для определения пределов устойчивости, была нами приспособлена для расчетов на расчетном столе, что позволило с малой затратой времени находить значения этих пределов при различных параметрах расчетных схем.

Исследование схемы генератор-шины бесконечной мощности показало, что в этом случае пределы устойчивости достигают значительных величин. Так, например, если генератор, полностью загруженный при $\cos\varphi = 0,95$, отдает всю мощность в систему, то, в зависимости от возможной величины сопротивления связи, мощность двигателя, соответствующего нижнему пределу, составляет 30—80% от мощности генератора, а мощность двигателя, соответствующего верхнему пределу — 65—120% от мощности генератора.

Расчеты, проведенные методом последовательных интервалов с учетом переходных процессов в электромагнитной системе генератора показали, что в случае включения двигателя, мощность которого соответствует верхнему пределу, нарушение устойчивости при обычных соотношениях постоянных времени и инерции генератора происходит после целого ряда колебаний ротора. Нарушение устойчивости в этом случае определяется, прежде всего, затуханием ЭДС E_d , а качания ротора играют второстепенную роль. Таким образом, при включении заторможенных двигателей устойчивость генератора характеризуется величиной верхнего предела устойчивости. Определение его значения может представлять практический интерес.

Приближенный аналитический метод определения верхнего предела, предложенный ранее, требует громоздких расчетов с комплексными числами и, кроме того, связан с построением участка кривой, в то время, как нас интересует лишь одна ее точка. Для схемы генератор-шины бесконечной мощности в работе предложен другой приближенный метод, не обладающий указанными недостатками

Примем следующие обозначения:

$Z_2 = jx_d$ — синхронная реактивность генератора;

Z_c — сопротивление связи генератора с шинами бесконечной мощности;

E_d — ЭДС за синхронной реактивностью;

U — напряжение на шинах бесконечной мощности;

δ — угол сдвига ЭДС E_d относительно напряжения шин бесконечной мощности;

$Z_3 = \frac{Z_2 \cdot Z_c}{Z_2 + Z_c}$ — эквивалентное сопротивление схемы;

φ_3 — фазовый угол эквивалентного сопротивления;

$E_3 = \frac{U \cdot Z_2 + E_d \cdot Z_c}{Z_2 + Z_c}$ — эквивалентная ЭДС схемы;

$Z_{d.пр.}$ — сопротивление включаемого двигателя, соответствующего верхнему пределу устойчивости;

φ_d — фазовый угол сопротивления Z_d ;

$\delta_{\max} = 90 + \alpha_{12}$ — угол, при котором активная мощность генератора максимальна;

P_n — мощность первичного двигателя или активная мощность генератора до включения двигателя;

$U_{z.пр.} = \frac{P_n X_d}{E_d}$ — напряжение на зажимах генератора при

включении двигателя, мощность которого соответствует верхнему пределу.

Как показано в работе, при известном угле φ_d , сопротивление $Z_{d.пр.}$ может быть определено методом последовательных приближений с любой степенью точности из следующего уравнения:

$$\left[\left(\frac{E_3 (\delta = \delta_{\max})}{U_{z.пр.}} \right)^2 - 1 \right] Z_{d.пр.}^2 - 2 z_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_d) Z_{d.пр.} - Z_3^2 = 0 \quad (1)$$

Уравнение (1) также может быть использовано для анализа зависимостей верхнего предела устойчивости от параметров схемы: сопротивления связи, нагрузки генераторов, коэффициента мощности и т. д.

Расчеты, проведенные методом последовательных интервалов для случая пуска двигателей вхолостую, показали, что в этом случае устойчивость генератора сохраняется при пуске двигателей, мощность которых превышает величину верхнего предела примерно в 1,5 раза.

Определение пределов устойчивости и расчеты методом последовательных интервалов были также выполнены для схемы два генератора соизмеримой мощности. При этой схеме нарушения устойчивости при включении двигателей обуславливаются несимметрией схемы. Причинами несимметрии могут явиться различие мощностей, сопротивлений и постоянных инерции генераторов и неравномерная их нагрузка. Схема также может быть несимметрична относительно точки приложения нагрузки или точки включения двигателя. Влияние двух последних факторов сказывается незначительно из-за относительно небольшого значения сопротивления связи по сравнению с сопротивлениями генераторов.

В работе приводятся зависимости пределов устойчивости от ряда параметров схемы.

Переходные процессы при включении двигателей протекают таким же образом, как при включении двигателей в схеме генератор шины бесконечной мощности.

Результаты, полученные при исследовании схем с постоянными сопротивлениями нагрузки, полностью справедливы только в тех случаях, когда нагрузка питается от шин бесконечной мощности. Однако и в случае чисто осветительной нагрузки, приложенной в любой точке сети, методика расчетов может быть сохранена, если влияние изменения сопротивления нагрузки учитывать эмпирическими коэффициентами.

II. УСТОЙЧИВОСТЬ МЕСТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ УЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ

Широкая электрификация сельскохозяйственного производства требует массового применения асинхронных двигателей для привода различных сельскохозяйственных машин. В ближайшие годы, особенно с внедрением электропахоты, наличие значительной асинхронной нагрузки, соизмеримой с мощностью электростанции, станет обычным явлением в условиях сельской электрификации. Поэтому при исследовании устойчивости местных систем следует учитывать особенности асинхронной нагрузки.

А. Нижний предел мощности включаемого двигателя

Максимальный вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на его зажимах и зависит от соотношения мощностей двигателя и питающего его генератора. При соизмеримости мощностей асинхронной нагрузки и станций сравнительно небольшие понижения напряжения в сети вызывают затормаживание двигателей.

В дальнейшем в сети может возникнуть «лавина» напряжения, приводящая к нарушению устойчивости системы и к массовому отключению асинхронных двигателей.

При исследовании системы генератор — эквивалентная нагрузка произведем замену осветительной нагрузки постоянной активной проводимостью, а работающих двигателей — одним эквивалентным двигателем.

Для рассматриваемой системы может быть введено понятие нижнего предела мощности включаемого двигателя. Этому пределу соответствует мощность заторможенного двигателя, при включении которого максимальный электрический момент эквивалентного двигателя равен тормозному моменту нагрузки (при $E_d = const$). Очевидно, что при пуске двигателей, мощность которых меньше нижнего предела, устойчивость системы будет безусловно сохранена.

Примем следующие условные обозначения:

- x_c — реактивность сети;
- $x_b = x_d + x_c$ — общая внешняя реактивность;
- b_n — проводимость намагничивания эквивалентного двигателя, вынесенная на зажимы его схемы замещения;
- x_k — реактивность рассеяния эквивалентного двигателя;
- P_o — нагрузка эквивалентного двигателя;
- g_{oc} — проводимость осветительной нагрузки;
- $Y_n = g_n + jb_n$ — проводимость включаемого заторможенного двигателя.

Если известны параметры схемы, максимальная мощность эквивалентного двигателя при включенной проводимости пускаемого двигателя Y_n может быть вычислена по формуле:

$$P_{max} = \frac{E_d^2}{\frac{2x_{20}^2 \rho^2}{\mu x_b + \sqrt{(\mu x_b)^2 + (2\rho x_{20})^2}} + \frac{\mu x_b + \sqrt{(\mu x_b)^2 + (2\rho x_{20})^2}}{2} + 2\mu x_b} \quad (2),$$

где:

$$\lambda = 1 + x_b(b_n + b_n); \quad \mu = x_b(g_{oc} + g_n); \quad \rho^2 = \lambda^2 + \mu^2;$$

$$x_{20}^2 = x_{12}^2 + x_k^2 \mu^2; \quad x_{12} = x_b + x_k \lambda;$$

Величина E_d определяется электрическим расчетом системы до включения двигателя.

Для определения нижнего предела мощности включаемого двигателя при известной нагрузке эквивалентного двигателя задаемся рядом значений Y_n и по формуле (2) определяем максимальные мощности эквивалентного двигателя.

Построив кривую $P_{\max} = f(Y_n)$, находим значение нижнего предела как точку пересечения этой кривой с прямой $P = P_0$.

При чисто силовой нагрузке и при неучете активной составляющей в проводимости включаемого двигателя, т. е. при $g_{ac} = 0$ и $g_n = 0$, получим, что $\mu = 0$ и $\rho^2 = \lambda^2$, и формула (2) превратится в общеизвестное выражение:

$$P_{\max} = \frac{E_d^2}{2x_{12}\lambda} \quad (2')$$

В этом случае проводимость пускаемого двигателя, соответствующая нижнему пределу, может быть определена как

$$b_n = b_0 - b_n \quad (3)$$

где b_0 — положительный корень следующего квадратного уравнения;

$$x_b^2 x_k b_0^2 + x_b(x_b + 2x_k)b_0 - \frac{E_d^2}{2P_0} + x_b + x_k = 0 \quad (4)$$

На табл. 2 приведены значения нижнего предела для схемы генератор — эквивалентный двигатель в случае, когда мощность эквивалентного двигателя составляет 67% от мощности генератора.

Таблица 2

Зависимость нижнего предела мощности включаемого двигателя от загрузки эквивалентного двигателя

Загрузка эквивалентного двигателя в долях от номинальной	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Отношение мощности короткого замыкания включаемого двигателя, соответствующего нижнему пределу, к мощности генератора	0,46	0,32	0,2	0,11	0,06	0,03

Понятие нижнего предела мощности включаемого двигателя может быть введено и для более сложных схем при пренебрежении качаниями генераторов системы. Была разработана методика расчетов на расчетном столе, позволяющая определить значения нижнего предела при включении двигателей в любой точке сети и при учете активных сопротивлений схемы. Эта методика, использующая известный критерий $\frac{dp}{ds}$ основана на подборе такого сопротивления двига-

теля, при включении которого соблюдается равенство максимального электрического и тормозного моментов нагрузки. При заданных значениях асинхронной нагрузки величина нижнего предела зависит лишь от суммарной мощности генераторов системы.

В частном случае параллельной работы двух генераторов с отношением нагрузок 4:1, т. е. при явно неблагоприятных условиях расчета, значения нижнего предела оказались в 3—5 раз меньше значений верхнего предела устойчивости, определенных при постоянных сопротивлениях нагрузки. Поскольку величина верхнего предела устойчивости определенным образом характеризует предельные углы расхождения роторов, это обстоятельство подтверждает возможность пренебрежения качаниями генераторов при определении нижнего предела для систем с несколькими генераторами.

Б. Верхний предел мощности включаемого двигателя

Устойчивость электрической системы при пуске двигателей характеризуется не только максимально допустимым понижением напряжения, но и временем, в течение которого допустимое понижение напряжения той или иной величины.

Введем понятие о верхнем пределе мощности включаемого двигателя. Ему соответствует предельная мощность асинхронного двигателя, при пуске которого вхолостую устойчивость системы сохраняется.

Даже для простейших схем определение предельной мощности пускаемого двигателя требует рассмотрения сложной системы дифференциальных уравнений, решение которой в общем виде чрезвычайно трудно.

Условие сохранения устойчивости системы генератор-эквивалентный двигатель*) при пуске двигателя вхолостую может быть записано следующим образом:

$$\int_{S_0}^{S_{xx}} \frac{C_d}{M_d} ds \leq \int_{S_0}^{S_{np}} \frac{C_s}{M_m - M_s} ds \quad (5)$$

где:

C_d и C_s — постоянные инерции пускаемого и эквивалентного двигателей;
 M_m — тормозной момент ^{экв.} пускаемого двигателя, принимаемый постоянным;

*) Эквивалентным двигателем заменены работающие двигатели.

M_d и M_s — избыточный момент пускаемого двигателя и электрический момент эквивалентного двигателя являются сложной функцией времени и зависят от скольжения двигателей и от напряжения в узловой точке;

S_0 и S_{np} — значения скольжения, при которых пересекаются кривые электромагнитного и тормозного моментов эквивалентного двигателя.

Как показано в работе, параметры электрических машин в условиях сельской электрификации таковы, что в первый период пуска избыточный момент пускаемого двигателя может оставаться постоянным, а избыточный момент эквивалентного двигателя уменьшается.

Допустив, что в интересующем нас предельном случае избыточный момент пускаемого двигателя остается постоянным, равным пусковому моменту при напряжении, соответствующем $E' = Const$, а избыточный момент эквивалентного двигателя изменяется по гиперболе, получим из выражения (5) следующее уравнение для определения верхнего предела:

$$P = \frac{\sqrt{\alpha + \cos^2 \gamma} - \cos \gamma}{b} \quad (6)$$

где: P — мощность двигателя, соответствующая верхнему пределу, в относительных единицах;

$$\alpha = \frac{M_n}{M_m} \cdot \frac{C_s}{C_d} \cdot \frac{S_{np}^2 - S_0^2}{2S_0};$$

$$b = \frac{Z'K}{E'} \angle \gamma; \quad K = \frac{100 K_i}{\eta_n \cos \varphi_n} \angle \varphi_k; \quad Z' = J(x'_d + x_c);$$

x'_d — переходная реактивность генератора;

E' — ЭДС за переходной реактивностью;

M_n — пусковой момент пускаемого двигателя;

$K_i, \eta_n, \cos \varphi_n$ — кратность пускового тока и номинальные значения КПД и коэффициента мощности пускаемого двигателя;

$\cos \varphi_k$ — коэффициент мощности заторможенного двигателя. Значения E', S_0 и S_{np} определяются по формулам, приведенным в работе.

В работе показано, что величина верхнего предела может быть также найдена по формулам, аналогичным (3) и (4). Расчет следует вести как при включении заторможенного

двигателя, но считать постоянной ЭДС, не за синхронной реактивностью, а за некоторой фиктивной реактивностью, меньшей синхронной. Уравнение (4) в этом случае имеет вид:

$$(ax_d + x_c)^2 x_k b_0^2 + (ax_d + x_c)(ax_d + x_c + 2x_k)b_0 - \frac{E_\phi^2}{2P_0} + ax_d + x_c + x_k = 0 \quad (7)$$

где α — коэффициент, равный для условий сельской электрификации $\alpha = 0,3 \div 0,5$;

E_ϕ — ЭДС за фиктивной реактивностью αx_d

Остальные обозначения соответствуют принятым выше.

На табл. 3 представлены результаты определения верхнего предела для схемы генератор-эквивалентный двигатель в случае, когда мощность эквивалентного двигателя составляет 67% от мощности генератора. Значение коэффициента было принято $\alpha = 0,42$.

Таблица 3.

Зависимость верхнего предела мощности включаемого двигателя от загрузки эквивалентного двигателя при различных методах расчета.

Загрузка эквивалентного двигателя в долях от номинальной	Отношение мощности короткого замыкания пускаемого двигателя, соответствующего верхнему пределу, к мощности генератора при расчетах	
	методом последовательных интервалов	по уравнениям (3) и (7)
0,5	1,40	1,53
0,6	1,10	1,14
0,7	0,86	0,86
0,8	0,65	0,65
0,9	0,48	0,48
1,0	0,32	0,34

Результаты приближенных расчетов по формулам (6) и особенно (7) достаточно хорошо совпадают с результатами точных расчетов на расчетном столе, проведенных методом последовательных интервалов.

Таким образом, предложенные методы могут быть использованы для приближенных расчетов по определению предельной мощности пускаемых двигателей в системе генератор-эквивалентный двигатель.

С целью проверки описанных выше методов расчета было проведено опытное исследование устойчивости систем генератор — асинхронный двигатель и два генератора — асинхронный двигатель при включении заторможенных двигателей и при пуске их вхолостую.

От синхронных генераторов 4,5 и 3,6 ква, работавших изолированно или параллельно (через трансформатор связи 3 ква), питался асинхронный двигатель 5,8 квт, который нагружался через другой синхронный генератор.

В узловой точке системы включались заторможенными или пускались вхолостую асинхронные двигатели мощностью от 0,185 до 1,5 квт, причем осциллографирование токов, напряжения в узловой точке и углов расхождения роторов генераторов позволило выяснить характер переходных процессов в системе. Были проведены подробные испытания всех электрических машин, позволившие определить параметры схем замещения системы и произвести проверочные расчеты по формулам (3), (4) и (7).

На таблице 4 сравниваются результаты опыта с результатами определения нижнего предела по формулам (3) и (4).

Таблица 4
Сравнение расчетных данных с результатами опытов при включении заторможенных двигателей.

Общая мощность генераторов, ква	Загрузка двигателя 5, 8 квт, о/е	Нижний предел по уравнениям (3) и (4), квт	Мощность включаемого двигателя при опыте, квт	Результаты опыта
4,5	0,32	0,447	0,37	Режим устойчив
4,5	0,35	0,379	0,37	" не устойчив
4,5	0,475	0,267	0,185	" устойчив
4,5	0,525	0,149	0,185	" не устойчив
8,1	0,525	0,409	0,37	" устойчив
8,1	0,63	0,253	0,37	" не устойчив

Как это следует из таблицы, результаты расчетов по формулам (3) и (4) хорошо совпадают с опытными данными.

На табл. 5 сравниваются результаты опытов с результатами определения верхнего предела по уравнениям (3) и (7).

Сравнение расчетных данных с результатами опытов при пуске двигателей вхолостую.

Общая мощность генераторов, ква	Загрузка двигателя 5, 8 квт, о/е	Верхний предел по уравнениям (3) и (7), квт	Мощность двигателя, пускаемого при опыте, квт	Результаты опыта
3,6	0,39	1,9	1,87	Режим устойчив
3,6	0,46	1,5	"	" не устойчив
4,5	0,45	2,16	"	" устойчив
4,5	0,475	1,97	"	" не устойчив
8,1	0,86	1,89	"	" устойчив
8,1	0,925	1,61	"	" не устойчив

Как это следует из таблицы, в случае пуска двигателей вхолостую результаты расчета также достаточно наглядно подтверждаются результатами опытов.

Г. Расчеты устойчивости сложных местных электрических систем.

Местные системы являются, как правило, концентрированными системами, так как в них сопротивления линий связи малы по сравнению с реактивностями генераторов. При равномерной нагрузке отдельных агрегатов и станций местные системы, кроме того, являются симметричными системами.

Поэтому было сделано предположение, что методы расчета, предложенные выше для схемы генератор-эквивалентная нагрузка, могут быть применены и для расчетов сложных систем, если все генераторы и все нагрузки системы заменить эквивалентным генератором и эквивалентной нагрузкой.

На расчетном столе переменного тока был произведен расчет устойчивости местной системы, состоящей из 6 станций общей мощностью 1360 ква и 7 узлов с нагрузкой.

Значения нижнего и верхнего пределов мощности включаемого двигателя для эквивалентной схемы равны приблизительно 60 и 205 квт.

Расчеты устойчивости методом последовательных интервалов показали, что, при одновременном включении 2-х заторможенных двигателей мощностью по 30 квт каждый, устойчивость системы нарушается. При пуске этих двигателей вхолостую система сохраняет устойчивость.

При включении заторможенных двигателей максимальные углы расхождения роторов отдельных генераторов не превы-

шали 30° , а при пуске двигателей вхолостую эти углы составляли $5-7^\circ$, достигая лишь для одной пары станций 20° .

Таким образом, качания генераторов сложной системы при равномерной их нагрузке мало влияют на протекание процессов при пусках двигателей. Описанные выше приближенные методы расчета могут быть использованы при исследовании сложных местных систем и при их проектировании.

Мероприятия, повышающие устойчивость местных электрических систем при пуске асинхронных двигателей

К числу таких мероприятий относятся:

а) уменьшение пусковых токов двигателей (переключение со звезды на треугольник, применение двигателей с фазным ротором и пр.);

б) автоматическое изменение режима генераторов или приемников в момент пуска двигателей (автоматическая форсировка возбуждения, автоматическая разгрузка наиболее мощных из работающих двигателей, например, электротракторных);

в) автоматическое регулирование напряжения;

г) компаундирование генераторов.

Большое значение для повышения устойчивости имеет также правильная эксплуатация местных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На примере рек Окского бассейна в работе показана возможность построения ряда типовых характеристик, применение которых значительно упрощает анализ работы ГЭС в местной системе. Ошибка при пользовании типовыми характеристиками, как правило, меньше, чем при расчетах по данным наблюдений за малое число лет.

2. Изложенный в работе метод определения дополнительной выработки гидроэнергии дает возможность судить об экономической целесообразности создания местной электрической системы.

3. В работе приведена формула для подсчета предельной мощности короткозамкнутого асинхронного двигателя, допустимой к включению на шинах генератора, работающего параллельно с мощной системой. Для схемы два генератора параллельно с мощной системой получены зависимости предельно-допустимых мощностей включаемых двигателей от параметров схемы (в случае чисто осветительной нагрузки).

4. В работе показано, что при пуске короткозамкнутых двигателей в местной системе с преобладающей асинхронной

нагрузкой нарушения устойчивости системы происходят вследствие затормаживания и опрокидывания работающих двигателей.

5. На основе теоретического исследования предложены приближенные методы расчета предельных мощностей короткозамкнутых асинхронных двигателей, допустимых к включению в местной системе по условию сохранения ее устойчивости в случае преобладания асинхронной нагрузки.

6. Результаты расчета по приближенным формулам, предложенным в работе, хорошо совпадают с данными опытного исследования устойчивости и с результатами расчета на расчетном столе.

Л 126820 16 XI-50 г.

Объем 1,4 п. л.

Тираж 100

Заказ 1349

Московский Полиграфтехникум имени русского первопечатника Ивана Федорова
Дмитровский, 9