

Бунин А.А.<sup>1</sup>, Газизова О.В.<sup>2</sup>, Тарасов В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

## АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЧАСТОТЫ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ

Усовершенствование технологического процесса металлургических производств и повышенные требования к снижению себестоимости продукции в условиях рыночной конкуренции требуют применения более экономичных и гибких систем электропитания мощных двигателей. В связи с этим питание крупных синхронных двигателей осуществляется не напрямую от сети трехфазного переменного тока, а посредством преобразователей частоты, что приводит к изменению не только энергопотребления, но и устойчивости узла электрической нагрузки в целом. Такой переход, с одной стороны, существенно повышает энергетическую эффективность производства на счет снижения потребляемой электроэнергии. С другой стороны, синхронные двигатели прекращают быть источниками реактивной мощности, что может при большой электрической удаленности снизить устойчивость оставшихся в параллельной работе с энергосистемой двигателей. В данной статье рассмотрены вопросы анализа статической устойчивости синхронных двигателей в узле нагрузки, содержащем крупные синхронные двигатели, питающиеся как через преобразователи частоты, так и непосредственно от энергосистемы, а также источники распределенной генерации относительно небольшой мощности с помощью разработанного программного комплекса. Даны рекомендации по повышению статической устойчивости синхронных двигателей. Исследовано изменение энергопотребления нагнетателей как основных потребителей электрической энергии кислородно-конвертерного цеха при замене преобразователей частоты, предназначенных для пуска, на полностью регулируемый частотный преобразователь с одновременным перестроением технологической схемы их работы на примере системы электроснабжения ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». На основе полученных экспериментальных данных выполнен анализ изменения параметров работы нагнетателей при замене преобразователей частоты, предназначенных для пуска, на преобразователи частоты для постоянной работы. Произведено исследование выбранной циклограммы работы привода и пантографа. Разработаны мероприятия по повышению энергетической эффективности работы новых приводов в части изменения частоты и временных интервалов разгона - торможения. Полученные материалы могут служить основой для дальнейшего повышения энергоэффективности мощных синхронных двигателей с вентиляторным моментом сопротивления на валу в различных циклах производства.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, синхронный двигатель, статическая устойчивость, промышленное предприятие, установившийся режим, программное обеспечение, система электроснабжения, энергетическая эффективность, потребление электроэнергии, нагнетатель, преобразователь частоты.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время энергосбережение в России входит в пятерку приоритетных направлений развития экономики. До одной трети всех производимых в стране энергоресурсов расходуется нерационально. Энергоемкость ВВП России по оценкам экспертов в среднем в 4-5 раз выше, чем в странах Западной Европы [1]. Именно поэтому одним из главных приоритетов новой энергетической политики России является повышение эффективности использования энергетических ресурсов. Принятие закона «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» подчеркивает высокую актуальность решения задач по увеличению производительности, снижению энергопотребления и повышению энергоэффективности в промышленном секторе экономики Российской Федерации [1-3].

Одним из крупнейших потребителей электроэнергии в промышленном секторе является сталелитейное производство. Сталелитейный передел ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» включает два цеха: кислородно-конвертерный (далее ККЦ) и электросталеплавильный цех. В данной статье рассматривается кислородно-конвертерный цех, который является самым мощным производственным подразделением

и основным производителем стали ОАО «ММК», его доля в общем производстве стали достигает 90 %, или 950 тыс. тонн продукции в натуральном выражении (по данным ЦЭСТ ОАО «ММК»). Ежесуточное потребление электроэнергии ККЦ составляет 1200-1500 тыс. кВт·ч (по данным ЦЭСТ ОАО «ММК»). Суточное электропотребление ККЦ (без электропечных установок) составляет 800-900 тыс. кВт·ч из них 280-320 тыс. кВт·ч приходится на нагнетатели конвертерного отделения, это порядка 30 %.

В связи с этим перспективной является разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности работы нагнетателей. К таким мероприятиям относится использование частотных преобразователей при управлении режимами синхронных двигателей.

Однако при постоянной работе двигателя через преобразователь он перестает выдавать в сеть реактивную мощность, что при существенной электрической удаленности от энергосистемы может привести к снижению устойчивости синхронных и асинхронных двигателей, работающих в параллель с энергосистемой. В случае применения источников распределенной генерации, они также должны будут принимать участие в выработке реактивной мощности. В таких условиях для повышения устойчивой работы двигательной нагрузки может быть повышена пропускная способность ЛЭП, использованы возможности источников местной

генерации по выработки реактивной мощности или возможности РПН.

Исследованию статической и динамической устойчивости синхронных генераторов, линий электропередачи и нагрузки посвящено большое число работ [4-7]. Особый интерес представляет режим выхода источников распределенной генерации с нагрузкой на отдельную с энергосистемой работу [8-11]. Исследованию динамической устойчивости двигателей посвящены работы [12-14]. Большая часть существующих работ ориентирована на крупные энергосистемы и не учитывает особенности промышленных [15-19]. В условиях усложнения конфигураций промышленных систем электроснабжения и изменения схем питания электроприемников актуальным, особенно при наличии источников распределенной генерации, является исследование статической устойчивости промышленных генераторов и нагрузки [20, 21], работы двигателей в условиях местной несимметрии [22-24], а также планирование оптимальных режимов [25-27]. С другой стороны, постоянное усложнение систем электроснабжения с целью повышения экономических и технических характеристик требует постоянного анализа надежности [28-31].

Разработанный на кафедре ЭПШ МГТУ им. Носова программный комплекс КАТРАН позволяет исследовать статическую устойчивость двигателей в узле сложной конфигурации при наличии электрически близких собственных источников распределенной генерации.

#### МЕТОДИКИ

В качестве объекта исследования выступали нагнетатели конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха ОАО «ММК». Упрощенная однолинейная схема электроснабжения ПС №29, распределительное устройство дымососного отделения и блока очистных сооружений приведены на **рис. 1**.

При выплавке стали в конвертерном производстве основным продуктом является технический кислород. В результате химических реакции в конвертере основным побочным продуктом при производстве стали является СО – монооксид углерода. Для удаления газа из рабочей зоны конвертера применяются нагнетатели. До завершения реконструкции в качестве привода нагнетателя используется синхронный двигатель напряжением 10 кВ типа СДЗ-5600 в паре с преобразователем частоты типа ПЧВС. Основной функцией морально устаревшего ПЧВС является плавный разгон двигателя до частоты 50 Гц, синхронизация его с сетью и перевод двигателя на номинальный режим работы параллельно с сетью. В номинальном режиме работы основным устройством, регулирующим мощность двигателя, является пантограф – задвижка, регулирующая разрежение газа на выходе газоотводящего тракта.

Если рассмотреть циклограмму работы пантографа (**рис. 2**) в течение плавки, очевидно, что наибольшее разрежение газа и соответственно максимальная мощность двигателя необходима на двух этапах плавки: заливка чугуна (состояние 26) и непосредственно продувка кислородом (состояние 5). В других циклах работы мощность двигателя снижается до минимально возможной по условиям механической стойкости газо-

отводящего тракта за счет закрытия пантографа. Изменение мощности нагнетателя в течение цикла плавки (см. **рис. 2**). По результатам статистического анализа мощность во время заливки чугуна изменяется в пределах 4,9-5,6 МВт, во время продувки 4,2-4,9 МВт.

Рассматривая настоящую технологическую карту работы нагнетателя с учетом всех параметров, экологических и производственных рисков. Следует обратить внимание, что работа нагнетателя в режимах, отличных от заливки чугуна и продувки кислородом, требуется с мощностью не более 0,5 МВт.

Реализовать работу двигателя нагнетателя на мощности 0,5-0,6 МВт на действующем электрооборудовании не представлялось возможным. В настоящее время произведена замена устаревшего ПЧВС на современный преобразователь частоты ATV1200, выполненный по технологии многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с выходными инверторами на IGBT-транзисторах и предназначенный для управления асинхронными и синхронными высоковольтными двигателями напряжением 10000 В и максимальным выходным током до 480 А [32]. С помощью современного электрооборудования на практике, изменяя алгоритм работы, реализуем новый номинальный режим работы двигателя нагнетателя непосредственно от преобразователя частоты. Режим работы двигателя параллельно с сетью рассматривается как ремонтный (для вывода в ремонт ПЧ без остановки конвертера), либо аварийный (при аварии основного контроллера).

Питание двигателя осуществляется через преобразователь частоты по закону управления ( $U/f=const$ ). Управление возбуждением в режиме работы от ПЧ берет на себя преобразователь частоты. Управление осуществляется с помощью регулятора косинуса с законом  $\cos\varphi=1$ , выдающим задание на вход возбудителя. В новой схеме регулирование мощности двигателя осуществляется совокупным управлением: частотой преобразователя частоты и степенью открытия пантографа.

В настоящее время в обобщенной форме циклограмма представляет собой вид, представленный на **рис. 3**:

1. Межпродувочный интервал: работа двигателя на частоте 30 Гц с минимальным открытием пантографа.
2. Завалка металлолома: разгон двигателя и работа на частоте 50 Гц.
3. Заливка чугуна: работа двигателя на частоте 50 Гц с максимальным открытием пантографа.
4. Продувка шихты кислородом: работа двигателя на частоте 50 Гц с требуемым по технологии плавки регулированием мощности с помощью пантографа.
5. Слив стали – торможение двигателя и работа на частоте 30 Гц с минимальным открытием пантографа.

В данной циклограмме снижение энергопотребления осуществляется на следующих циклах плавки: межпродувочный интервал и слив стали (далее – режим экономии). Также снижение энергопотребления достигается в ремонтные периоды конвертера, когда работа нагнетателя необходима с мощностью не более 1 МВт. В настоящее время отлажена работа двигателя со снижением частоты до 30 Гц в заданных ранее циклах. Потребляемая активная мощность двигателя на частоте 30 Гц составляет не более 1200 кВт.

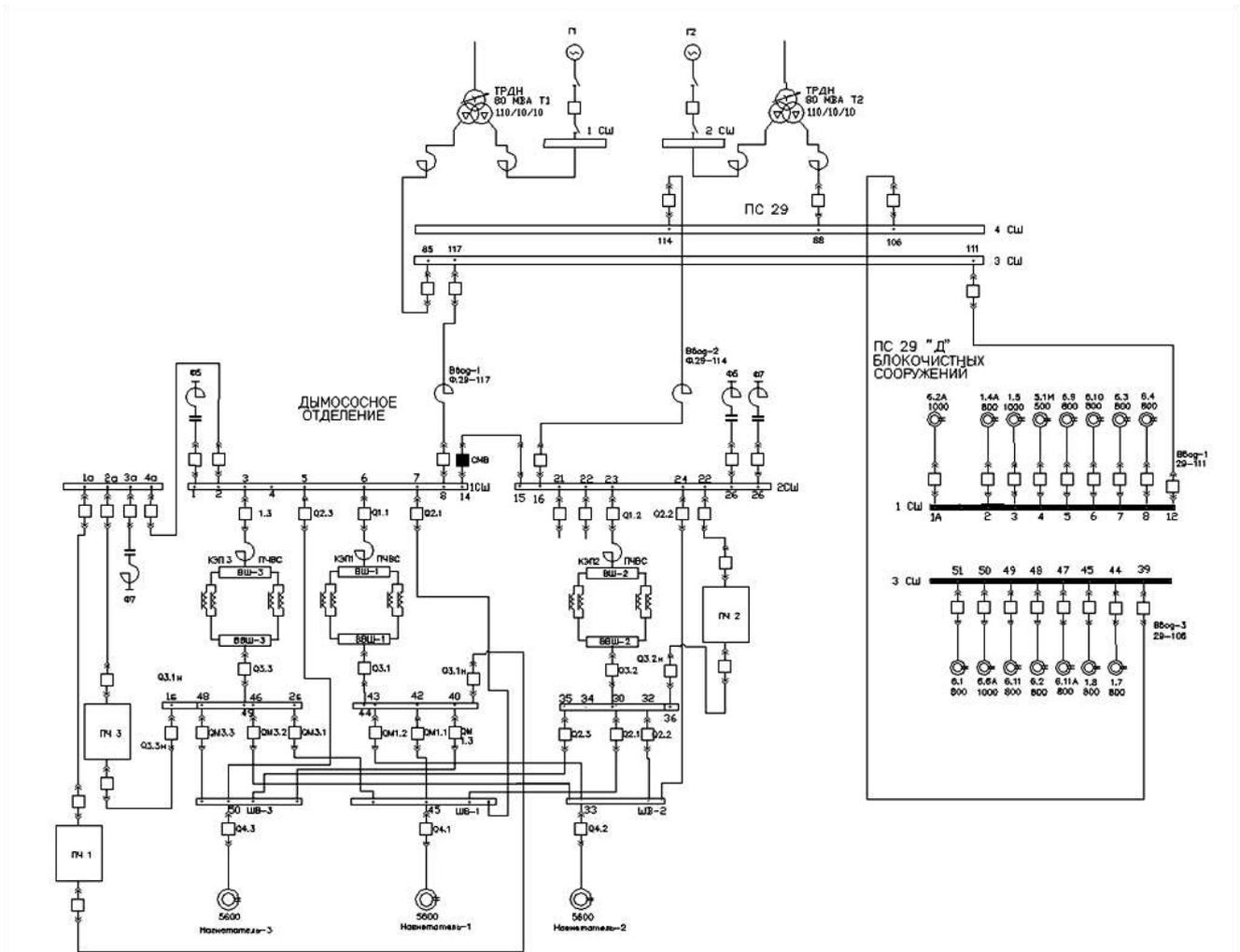


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема электроснабжения подстанций ПС №29, ПС №29Г, ПС №29

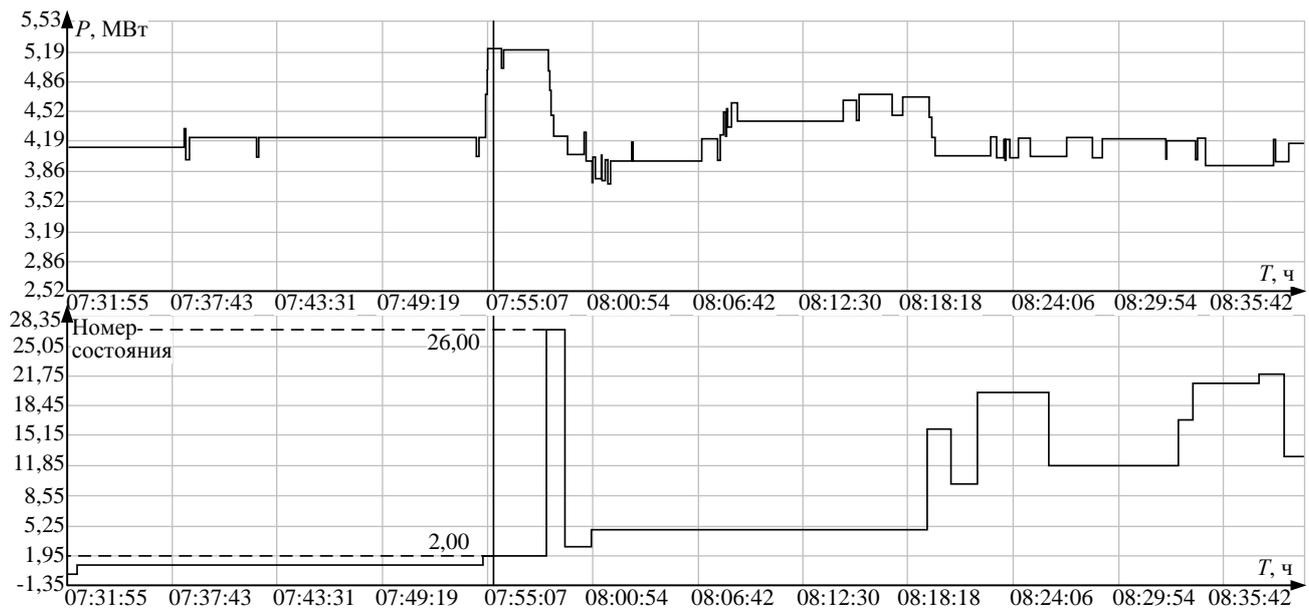


Рис. 2. График изменения мощности двигателя в течение одного цикла плавки

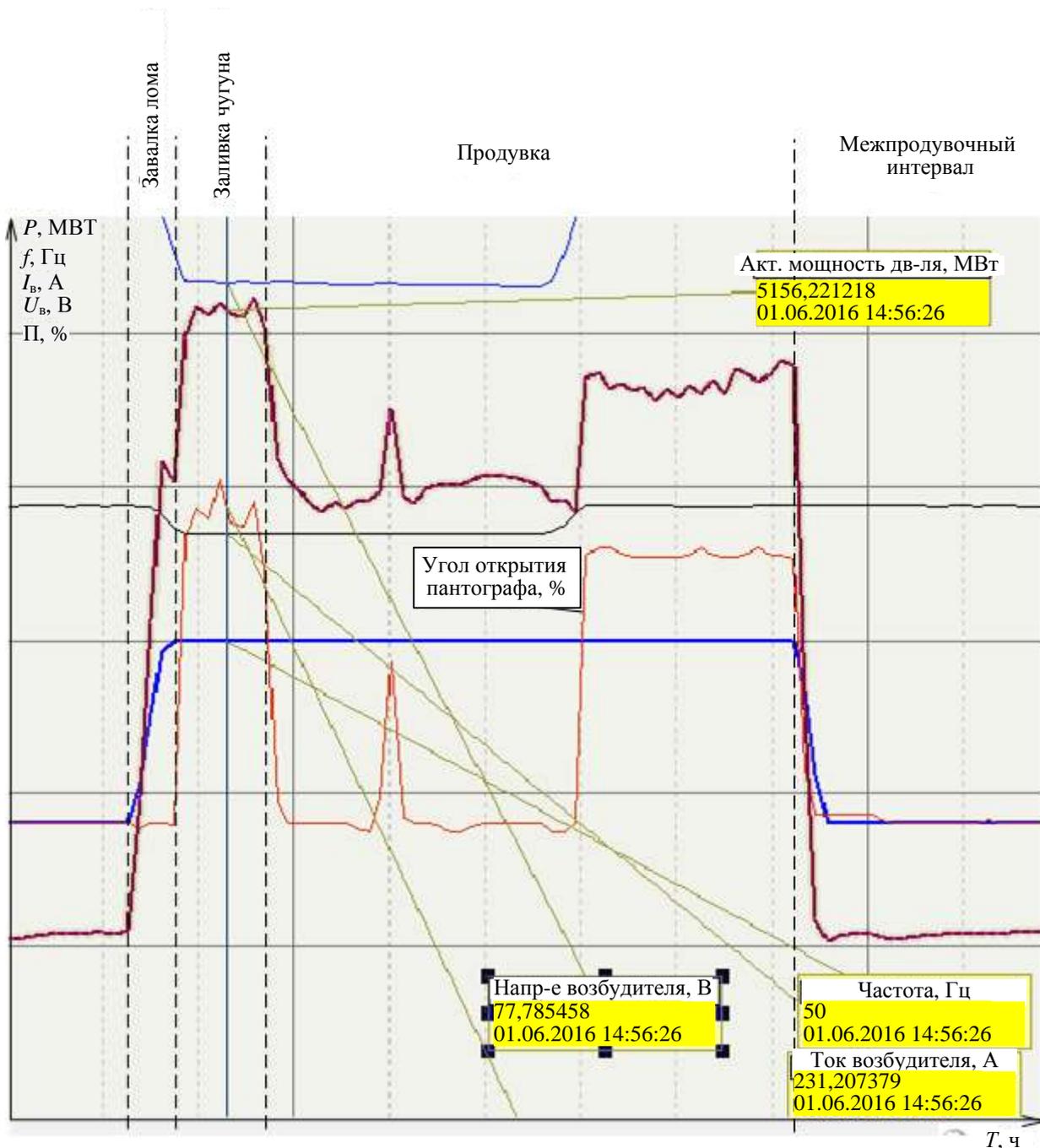


Рис. 3. График изменения мощности двигателя, частоты, угла открытия пантографа

В представленном исследовании расчеты экономии электроэнергии делались с учетом объемов производства стали по методике, предлагаемой в трудах [33, 34].

На первоначальном этапе был произведен сбор архивных данных по месячной выплавке стали и энергопотреблению дымососного отделения за тот же период. Полученные данные ранжируются по возрастанию значений объема выплавленного жидкого металла в ККЦ. Формируется ряд значений объема выплавленного жидкого металла от 700 000 до 900 000 т с шагом  $k=9\ 999$  т. Значения потребления электроэнергии отделением ККЦ и объема выплавленного жидкого металла за базовый период группируются по принятым интервалам. Значения потребления электроэнергии дымо-

сосным отделением ККЦ и объема выплавленного металла в каждом интервале усредняются по формулам:

$$E_m = \frac{\sum_l^{l+k} E\delta_m}{i}; \tag{1}$$

$$\Pi_m = \frac{\sum_l^{l+k} \Pi\delta_m}{i}, \tag{2}$$

где  $i$  – количество значений базового удельного расхода электроэнергии на тонну выплавленного жидкого металла, соответствующего рассматриваемому интервалу, шт.;  $m$  – номер интервала (табл. 1);  $l$  – значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ, соответствующее нижней границе интервала, т;  $k$  – значе-

ние шага изменения интервала выплавленного жидкого металла в ККЦ (принят равным 9 999 т);  $E_{б_m}$  – значения потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ за базовый период, попавшие в рассматриваемый интервал  $m$ , кВтч;  $П_{б_m}$  – значения объема выплавленного жидкого металла в ККЦ за базовый период, попавшие в рассматриваемый интервал  $m$ , т;  $E_m$  – среднее значение  $E_{б_m}$ , попавшее в рассматриваемый интервал  $m$ , кВтч;  $П_m$  – среднее значение  $П_{б_m}$ , попавшее в рассматриваемый интервал  $m$ , т.

Чтобы охватить все возможные режимы производительности ККЦ, для тех интервалов выплавки металла, данные по которым в архиве отсутствуют, значения  $E_m$  и  $П_m$  определяются как среднее значение из предыдущего и следующего интервала:

$$E_m = \frac{E_{m-k} + E_{m+k}}{2}; \tag{3}$$

$$П_m = \frac{П_{m-k} + П_{m+k}}{2}, \tag{4}$$

где  $E_{m-k}$  – среднее значение потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ в предыдущем интервале, кВтч;  $E_{m+k}$  – среднее значение потребления электроэнергии дымососным отделением ККЦ в последующем интервале, кВтч;  $П_{m-k}$  – среднее значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ в предыдущем интервале, т;  $П_{m+k}$  – среднее значение объема выплавленного жидкого металла в ККЦ в последующем интервале, т.

На основании данных **табл. 1** рассчитывается базовый удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла, соответствующий каждому интервалу (режиму производства ККЦ):

$$W_m = \frac{E_m}{П_m}. \tag{5}$$

Значения  $W_m$ , соответствующие значениям объема выплавленного жидкого металла ниже 720 000 т, принимаются равными значению  $W_m$  в интервале 720 000 – 729 999 т. Значения  $W_m$ , соответствующие значениям объема выплавленного жидкого металла выше 879 999 т, принимаются равными значению  $W_m$  в интервале 870 000 – 879 999 т.

В расчетный период значение  $W_m$  для сравнения с фактическим удельным расходом на тонну выплавленного жидкого металла ККЦ принимается из того интервала  $m$ , которому соответствует фактический объем выплавленного жидкого металла ККЦ в расчетный период  $Пф_m$ . Предполагается, что значение  $Пф_m$  попадает в заданный интервал, если оно больше нижней границы интервала и меньше верхней, т.е. соответствует условию:  $1 \leq Пф_n \leq 1+k$ .

Далее сравнивается фактический удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла за расчетный месяц с базовым удельным расходом электроэнергии на тонну выплавленного металла из **табл. 1**.

$$W_{ф_n} = \frac{E_{ф_n}}{П_{ф_n}}, \tag{6}$$

где  $E_{ф_n}$  – фактический расход электроэнергии на нужды дымососного отделения ККЦ в расчетный период, кВтч;  $П_{ф_n}$  – фактический объем выплавленного жидкого металла ККЦ в расчетный период, т.

Расчет величины экономии электрической энергии в расчетном периоде

$$\Delta W = \frac{W_m - W_{ф_n}}{W_m} \cdot 100\%. \tag{7}$$

В настоящее время от новых преобразователей частоты работают два двигателя из трех.

Потребление электроэнергии синхронными двигателями за май месяц получаем двумя способами: по приборам учета электроэнергии; статистическим методом с использованием среднеквадратичной мощности за каждый период. Второй способ целесообразно использовать для расчета размера экономического эффекта отдельно по нагнетателю №1 и 3, так как прибор учета используется один на 2 нагнетателя. Результаты расчетов сведем в **табл. 2**.

Различие в значениях экономического эффекта нагнетателей №1 и 2 связано в большей степени с разным количеством простоев технологического оборудования и длительностью плановых ремонтов. В июне 2016 г. наблюдается выравнивание размера экономии в пределах 24-27 % относительно базового значения.

При анализе режимов работы двигателей нагнетателей от преобразователей частоты со снижением частоты в режимах экономии, а также изучении технологических режимов плавки нами был выдвинут ряд мероприятий по оптимизации использования частотного регулирования и дальнейшему повышению энергоэффективности.

Мероприятие №1 по дальнейшему снижению энергопотребления синхронных двигателей нагнетателей является их работа в режимах экономии на частоте 25 Гц. В настоящее время при апробации данных режимов работы проявляются недостатки маслостанции системы смазки подшипников двигателей, проявляющиеся в отсутствии регулирования мощности двигателей маслонасосов.

В результате на частоте 25 Гц избыточная мощность маслонасоса приводит к увеличению давления в системе смазки до критического. После установки частотного преобразователя и реализации управления двигателями маслонасосов будет произведен перевод двигателей нагнетателей с частоты 30 на 25 Гц в режимах экономии. Расчетное значение потребляемой мощности двигателя при снижении частоты с 30 до 25 Гц при минимальном значении открытия пантографа снижается соответственно с 1100 до уровня 560 кВт·ч. Данный расчет был доказан эмпирически.

Данное мероприятие способно довести уровень экономического эффекта до 30-32 % по результатам статистического анализа суточного расхода при работе с данной нагрузкой.

Мероприятие №2 заключается в оптимизации исходных данных – временных точек, определяющих начало разгона двигателя.

Для эффективного использования регулирования мощности двигателя в различных режимах необходимо рассчитать допустимые временные характеристики разгона двигателя с частоты 25 до 50 Гц.

Таблица 1

Значения удельного расхода электроэнергии на выплавку тонны металла в зависимости от объема выплавки металла (выборка)

№ интервала ( <i>m</i> )	Нижняя граница интервала ( <i>l</i> ), т.	Верхняя граница интервала ( <i>l+k</i> ), т.	Значения электропотребления за базовый период в заданном интервале ( <i>E<sub>b<sub>m</sub></sub></i> ), кВт·ч	Значения объема выплавленного жидкого металла за базовый период в заданном интервале ( <i>П<sub>b<sub>m</sub></sub></i> ), т.	Среднее значение электропотребления за базовый период в интервале ( <i>E<sub>m</sub></i> ), кВт·ч	Среднее значение выплавленного жидкого железа за базовый период ( <i>П<sub>m</sub></i> ), т.	<i>W<sub>m</sub></i> , кВт·ч/т.
1	850 000	859 999	8830284,00	852328,00	8830284,00	852328,00	10,36
2	860 000	869 999	9221365,00 8810704,00 9299104,00	865002,00 866143,00 867920,00	9110391,00	866355,00	10,52
3	870 000	879 999	9167119,00 9179642,00	870907,00 877370,00	9173380,50	874138,50	10,49

Таблица 2

Значения удельного расхода электроэнергии на выплавку тонны металла в зависимости от объема выплавки металла

Параметр	Нагнетатель №1 на новых ПЧ	Нагнетатель №3 на новых ПЧ	Нагнетатель №2 на старых ПЧВС (по приборам) за май	Базовый из табл. 1 для соответствующего объема производства за период
Удельный расход электроэнергии на тонну выплавленного металла в мае 2016 г., кВт/т	8,15 (расчетный)	7,62 (расчетный)	10,25 (по приборам учета)	10,49
Расчетное значение размера экономии электропотребления в мае 2016 г., %	20,51	25,61	-	-

Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5600}{157} = 35669 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (8)$$

где угловая скорость

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = 157 \text{ рад/с}. \quad (9)$$

Момент, развиваемый двигателем, определяется статическим сопротивлением на валу двигателя и динамическими нагрузками

$$M = M_c + M_{дин}. \quad (10)$$

Примем, что в установившемся режиме  $M_c$  и  $I_c$  связаны линейной зависимостью. В этом случае

$$I_{c.max} = \frac{I_{c.n} M_{c.max}}{M_n} = \frac{370 \cdot 14715}{35669} = 153 \text{ А}. \quad (11)$$

Зададим условие, что в режиме разгона ток статора не должен превышать номинального значения. Отсюда следует, что величина динамического тока статора будет составлять

$$I_{дин} = I_{c.n} - I_{c.max} = 370 - 153 = 217 \text{ А}. \quad (12)$$

При неизменном темпе разгона

$$M_{дин} = M_c I_d \cdot I_c^{-1} = 20870 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (13)$$

Отсюда следует, что время разгона не должно быть меньше чем 2,8 мин.

$$T_{разг} = \frac{J_{сум.прив} \omega_n}{M_{дин}} = \frac{22640 \cdot 157}{20870} = 170 \text{ с}. \quad (14)$$

В настоящее время исходным параметром, определяющим время начала разгона двигателя, является изменение веса на подвеске главного подъема грузочных кранов при завалке металлолома. Но в реальных условиях интервал времени от начала завалки металлолома до начала заливки чугуна значительно больше 3 мин, необходимых для вывода нагнетателя на номинальную мощность.

Также в условиях производства наблюдаются режимы, когда заливка чугуна происходит через длительный промежуток времени, который определяется: отсутствием чугуна, десульфурацией чугуна, технологическими особенностями работы кранов и т.д. Тем

самым время начала разгона в ряде случаев выбирается с ошибкой, достаточно сильно влияющей на энергоэффективность предложенных инноваций. Данный режим раннего старта отражен на **рис. 4**.

Время выхода двигателя на работу с частоты 25 до 50 Гц равно 2 мин и совпадает с временем торможения до 25 Гц. Тем самым необходимо определить либо синтезировать в АСУ исходное условие для начала разгона двигателя, с учетом постоянной времени разгона 2 мин. Таким параметром может выступать сигнал из АСУ о изменении веса на подвесе главного подъема заливочных кранов в сочетании с назначением ковша на конкретный конвертер. Данное мероприятие способно повысить энергоэффективность на 1-2 %.

В заключение с помощью программного комплекса КАТРАН был произведен анализ статической устойчивости синхронных двигателей, оставшихся на параллельной работе с энергосистемой, с учетом снижения выработки реактивной мощности синхронными двигателями, приводящими нагнетатели, возможности от-

ключения источников распределенной генерации, изменения положения РПН и собственной реактивной мощности двигателей. Полученный алгоритм приведен на **рис. 5**.

Исследования проводились применительно к синхронному двигателю подстанции 29 Д номинальной мощностью 0,8 МВт, работающему с коэффициентом загрузки 0,85 и выдающему реактивную мощность 0,07 МВАр. Результаты расчета сведены в **табл. 3**.

Как видно из **табл. 3**, наибольшее влияние на устойчивость двигателя оказывает положение РПН питающего трансформатора и собственная выдаваемая реактивная мощность. Если двигатель не выдает реактивную мощность в сеть, то статическая устойчивость по мощности снижается до нормативных значений. Выдача мощности нагнетателями и генераторами не оказывает определяющего влияния. Однако при повышении сопротивления связи с энергосистемой эти факторы также начинают играть роль.

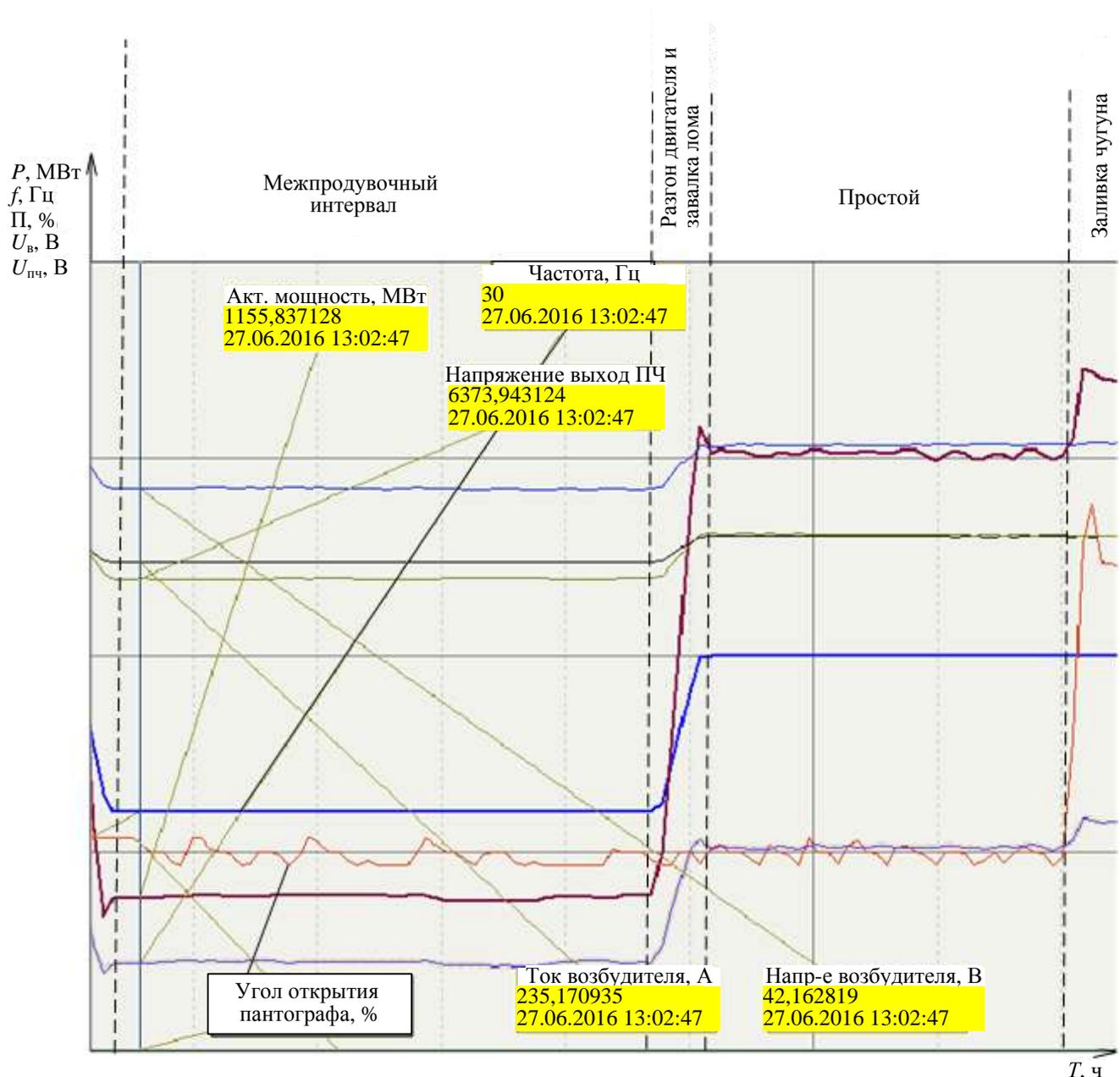


Рис. 4. Несоответствие точки начала разгона и реальной заливки чугуна

Таблица 3

Значения коэффициента запаса статической устойчивости синхронного двигателя, %, подключенного к ПС 29 Д при изменении режимов сети

Реактивная мощность двигателя, МВАр	Коэффициенты запаса устойчивости по напряжению и активной мощности	Генераторы в работе				Генераторы отключены			
		Нагнетатели подключены напрямую к сети ( $Q=2,44$ МВАр)		Нагнетатели включены в сеть через преобразователи ( $Q=0$ МВАр)		Нагнетатели подключены напрямую к сети ( $Q=2,44$ МВАр)		Нагнетатели включены в сеть через преобразователи ( $Q=0$ МВАр)	
		РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении	РПН в максимальном положении	РПН в минимальном положении
0	$k_U$	56	64	55	64	55	64	55	64
	$k_P$	13	39	12	38	13	39	12	38
0,1	$k_U$	59	67	58	66	58	67	58	66
	$k_P$	20	50	19	48	20	49	19	48
0,2	$k_U$	61	69	61	69	61	69	61	69
	$k_P$	29	60	28	59	29	60	28	59

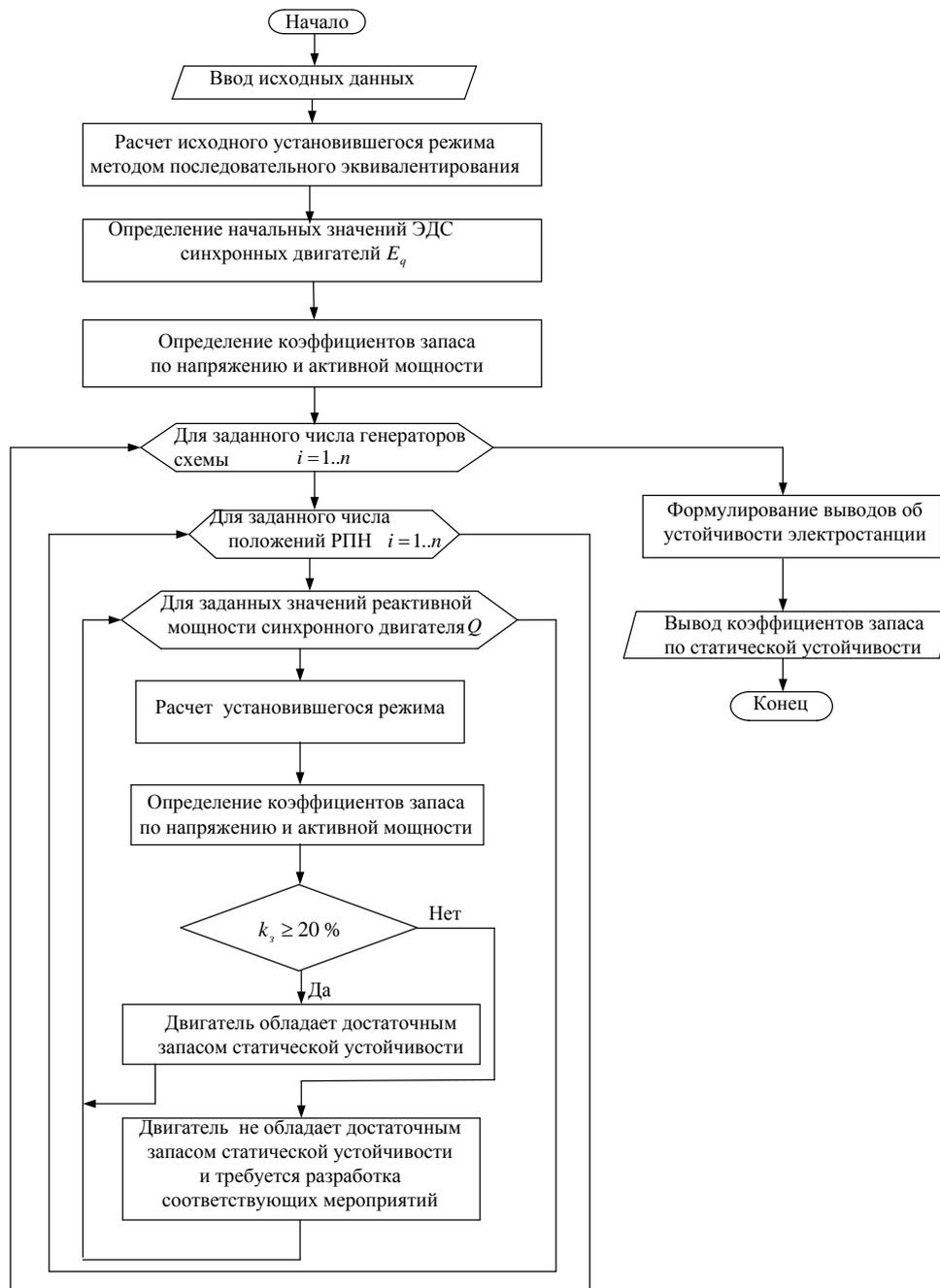


Рис. 5. Алгоритм анализа статической устойчивости синхронных двигателей в узле нагрузки, содержащем источники собственной генерации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация такого комплекса мероприятий по замене устаревших ПЧВС на полнорегулируемые частотные преобразователи, выполненные по технологии многоуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ), повысит энергоэффективность таких мощных электрических приемников, как нагнетатели конвертерного на 25-27 %. При выполнении дополнительных мероприятий по оптимизации использования частотного регулирования, исходных данных для разгона и торможения двигателя возможно достичь снижения электропотребления рассматриваемым комплексом до 33-35 %.

Существует широкий технический потенциал повышения энергетической эффективности кислородно-конвертерного производства ОАО «ММК» за счет использования частотных преобразователей для регулирования мощности двигателей газоочистных сооружений и согласования их работы и нагрузки в зависимости от технологического процесса выплавки и обработки стали. Однако при использовании частотных преобразователей на мощных двигателях необходимо осуществлять проверку узла по статической устойчивости и при необходимости разрабатывать мероприятия по ее повышению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н. Управление энергопотреблением и энергосбережение: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
2. Мещеряков В.Н., Туркин М.А. Энергосбережение при рациональном режиме работы синхронного двигателя при частотном регулировании // Системы управления и информационные технологии. 2007. Т. 27. № 1.1. С. 180-183.
3. Лисицин А.С., Эрнст А.В. Перспективы управления и частотного регулирования синхронных электрических двигателей // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 302-303.
4. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
5. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.:Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
6. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials, Vol. 742, 2015, pp. 648-652.
7. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. IET Generation, Transmission & Distribution. Oct 2012, Vol. 6, Issue 10, pp. 977-985.
8. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. № 17 (117). С. 72-74.
9. Влияние высоковольтных двигателей собственных нужд на надежность системы электроснабжения собственных нужд ТЭЦ ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, О.В. Буланова // Электротехнические системы и комплексы. 2009. № 17. С. 96-104.
10. Исследование сходимости метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения при работе раздельно с энергосистемой / О.В. Буланова, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова // Электротехнические системы и комплексы. 2005. № 10. С. 129-134.
11. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, В.М. Тарасов, М.А. Извольский // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 12-17.
12. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 71.-75.
13. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. Electrical Engineering in Japan, Vol. 133, no. 1, 2000.
14. Xu Y., Dong Zh. Y., Zhao J., Xue Y., Hill D. J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib., 2015, Vol. 9, Iss. 3, pp. 276-286.
15. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th March 2013. Vol. 49, Iss. 1, pp. 38-47.
16. Boudour M., Hellal A. Mismatched Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 30, no. 1B.
17. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. TELKOMNIKA. Vol.10, No.1, March 2012, pp. 9-16.
18. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 10th May 2014. Vol. 63, Iss. 1, pp. 85-91.
19. Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I. B., Abdallah H. H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. J. Electrical Systems, 2014, 10-3, pp. 276-291.
20. Анализ статической устойчивости генераторов / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // Главный энергетик. 2013. № 7. С. 17-25.
21. Исследование влияния ввода в работу перспективной воздушной линии на режимы промышленного энергетического узла / Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова, М.М. Гладышева, И.М. Галлиулин // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 4-2 (23). С. 35-37.
22. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. 2010. № 3. С. 26-31.
23. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Н.А. Николаев, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // Электрика. 2010. № 8. С. 24-26.
24. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110-220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Игуменцев В.А., Заславец Б.И., Николаев Н.А., Малафеев

- ев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 141 с.
25. Малафеев А.В., Хламова А.В., Краснов М.И. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей задачи // Главный энергетик. 2011. № 3. С. 54-57.
  26. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. Collection of scientific papers: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
  27. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. Procedia Engineering, 2015, Vol. 129, pp. 951-955.
  28. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 2. С. 68-79.
  29. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / К.Э. Одинцов, Ю.Н. Ротанова, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, П.В. Шилев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-1. С. 192-198.
  30. Разработка методики прогнозирования отказов сложных электротехнических систем на примере электрических систем / Ю.Н. Кондрашова, М.М. Гладышева, Арт.А. Николаев, А.А. Николаев // Технические науки: от теории к практике. Новосибирск: НП «СибАК», 2014. №33. С. 101-108.
  31. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Collection of scientific papers: Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. pp. 1-6.
  32. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 220 с.
  33. Emadi A. Energy-efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded, (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
  34. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учеб. пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 80 с.

Поступила в редакцию 15 июня 2016 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ANALYSIS OF STATIC STABILITY AND ENERGY CONSUMPTION OF SYNCHRONOUS MOTORS WHEN THEY ARE CONNECTED TO FREQUENCY CONVERTERS WITH CHANGING TECHNOLOGICAL AND ELECTRICAL OPERATING PARAMETERS

Aleksandr A. Bunin

Electrician, Joint Service Company LLC, Magnitogorsk, Russia.

Ol'ga V. Gazizova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vladimir M. Tarasov

Ph.D. (Eng.), Electric Equipment Service Chief Foreman, Magnitogorsk Iron and Steel Works OJSC, Magnitogorsk, Russia.

Improvement of the technological process of steelmaking and higher requirements to reduce production costs in the competitive market conditions require the use of more economical and flexible systems of power supply for powerful motors. That is why large synchronous motors are not supplied directly from the network of the three-phase alternating current, but through frequency converters, which leads to a change in not only energy, but also to sustainability of electrical load as a whole. Such a transition, on the one hand, increases the energy efficiency of production at the expense of reducing electricity consumption. On the other hand, synchronous motors are no longer reactive power sources that can at the big electrical distance reduce resistance of motors operating in parallel with the grid. This article deals with analysis of static stability of synchronous motors in the load node containing large synchronous motors powered both through frequency converters, and directly from the power grid, as well as distributed generation sources of relatively small power using the developed software complex. Some recommendations are given aimed at improving of static stability of synchronous motors. The research group investigated variation of energy consumption of blowers as major consumers of electric

energy at the oxygen converter shop when inverters designed for start-up are replaced with fully adjustable frequency converter and simultaneous rebuilding of the technological scheme of their operation using power-supply system of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" as an example. On the basis of the experimental data, the authors carried out analyses of changes in parameters of the blowers when inverters designed for start-up were replaced with frequency converters for permanent operation. The selected cyclograms of the drive and pantograph operation were studied. The authors developed activities to increase the energy efficiency of new actuators in terms of frequency and time intervals of acceleration-braking. The obtained data can serve as a basis for further improving the energy efficiency of powerful synchronous motors with fan moment on the shaft resistance in different production cycles.

**Keywords:** Synchronous generator, synchronous motor, static stability, industrial enterprise, load software, power supply system, energy efficiency, energy consumption, supercharger, frequency converter.

## REFERENCES

1. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Upravlenie energopotrebleniem i energosberezhenie: monografiya* [Energy Management and Energy Saving: a monograph]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 422 p.
2. Meshcheryakov V.N., Turkin M.A. Energy Saving at Rational Operation of Synchronous Motor with Frequency Regulation. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technology], 2007, vol. 27, no. 1.1, pp. 180-183. (In Russian)
3. Lisitsyn A.S., Ernst A.V. Prospects of Control and Frequency Control of Synchronous Electric Motors. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines], 2014, no.1, pp.302-303. (In Russian)
4. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
5. Kimbark E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 392 p.
6. Xiufeng S., Shiguang M. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 742, 2015, pp. 648-652.
7. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Oct 2012, Vol. 6, Issue 10, pp. 977-985.
8. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of Dynamic Stability of Industrial Power Systems with Internal Power Stations at Separation from Electric System as a Result of Short-circuit Failure. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2008, no. 17 (117), pp. 72-74. (In Russian)
9. Malafeev A.V., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N., Bulanova O.V. Influence of High-Voltage Motors of own Needs on Reliability of System of Electrical Power Supply of Own Needs of CHPP JSC MMK. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2009, no. 17, pp. 96-104. (In Russian)
10. Bulanova O.V., Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N. Investigation of Convergence of Method of Calculation of Set Modes of Systems of Electrical Power Supply Operating Separately from Power Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2005, no. 10, pp. 129-134. (In Russian)
11. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvolsky M.A. Research of Overall Performance of Dividing Automatic Equipment in System of Electrical Power Supply of Industrial Enterprise of Ferrous Metallurgy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2012, no. 10, pp. 12-17. (In Russian)
12. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Calculation of Response Characteristics of Synchronous and Asynchronous Motors of Industrial Enterprises for Purpose of Analysis of Stability of Systems of Electrical Power Supply. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2, pp. 71.-75. (In Russian)
13. Akagi H., Takahashi K., Kobayashi T., Sugihara H., Kai T. Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 133, no. 1, 2000.
14. Xu Y., Dong Zh. Y., Zhao J., Xue Y., Hill D. J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, Vol. 9, Iss. 3, pp. 276-286.
15. Sathesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013. Vol. 49, Iss. 1, pp. 38-47.
16. Boudour M., Hellal A. Mohamed Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 30, no. 1B.
17. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*. Vol.10, No.1, March 2012, pp. 9-16.
18. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th May 2014. Vol. 63, Iss. 1, pp. 85-91.
19. Welhazi Y., Guesmi T., Jaoued I. B., Abdallah H. H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, 10-3, pp. 276-291.
20. Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. Analiz staticheskoy ustoychivosti generatorov [Analysis of Static Stability of Synchronous Generators. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2013, no. 7, pp. 17-25. (In Russian)
21. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva M.M., Gallulin I.M. Research of Influence of Implementation of Perspective Overhead Line on Modes of Industrial Energetic Hub. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2014, no. 4-2 (23), pp. 35-37. (In Russian)
22. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigoryeva M.V. Analysis of Modes of Asymmetrical Short Circuits in Complex Systems of Electrical Power Supply with Auxiliary Power Stations. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 3, pp. 26-31. (In Russian)
23. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nikolayev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Determination of Asynchronous Power of Synchronous Generators in Calculations of Electromechanical Transient Processes in case of Asymmetrical Modes. *Elektrika* [Electrician], 2010, no. 8, pp. 24-26. (In Russian)
24. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., N.A. Nikolayev, A.V. Malafeev, O.V. Bulanova, Yu.N. Kondrashova, E.A. Panova *Otsenka effektivnosti releynoy zashchity v setyakh 110-220 kV slozhnykh sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluating the Effectiveness of Relaying Networks in Complex Systems of 110-220 kV Power Supply of Industrial Enterprises with Auxiliary Power Plants], Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ. House, 2011, p. 141.
25. Malafeev A.V., Khlamova A.V., Krasnov M.I. Optimization of Loading of Generators of Auxiliary Power Stations of JSC MMK Taking into Account Losses of Active Power on Distributive Network by Decomposition of General Task. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2011, no. 3, pp. 54-57. (In Russian)
26. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization. *Collection of scientific papers: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.

27. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 129, pp. 951-955.
28. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. Fault Rate Analysis of Variable-FREQUENCY Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, Vol. 14, no. 2, – pp. 68-79. (In Russian)
29. Odintsov K., Rotanova Yu., Karandayeva O., Mostovoy S., Shilyaev P. Technique to Predict Electrical Equipment Operational Remaining Life. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical science], 2010, no. 3-1, pp. 192-198. (In Russian)
30. Kondrashova Yu.N., Gladysheva M.M., Nikolaev Art.A., Nikolaev A.A. Development of Technique of Failure Prediction of Complex Electrotechnical Systems Using Electrical Networks as an Example. *Tekhnicheskie nauki: ot teorii k praktike* [Technical science: from the theory to practice], 2014, no. 33, pp. 101-108. (In Russian)
31. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. Collection of scientific papers: Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. pp. 1-6.
32. Polyakov V.N. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemih elektroprivodov peremennogo toka* [Energy saving operating modes of controlled AC electric drives]. Under the editorship of R.T. Shreiner. Yekaterinburg, FSAEI HPE Russian State Vocational Pedagogical University, 2012. 220 p.
33. Emadi A. *Energy-efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded*, (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
34. Osipov O.I. *Chastotno-reguliruemiy asinkhronnyy elektroprivod* [Variable-frequency induction motor drive]. Moiscow, MPEI Publ., 2004. 80 p.

Бунин А.А., Газизова О.В., Тарасов В.М. Анализ статической устойчивости и энергопотребления синхронных двигателей при их подключении к преобразователям частоты с изменением технологических и электрических параметров режима работы // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.49-60. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60

Bunin A.A., Gazizova O.V., Tarasov V.M. Analysis of static stability and energy consumption of synchronous motors when they are connected to frequency converters with changing technological and electrical operating parameters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 49-60. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60