

УДК 621.313.333

**В.А. Трефилов, Е.А. Рыбникова, Д.С. Крыласов**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 1250 кВт  
ПРИ МАЛЫХ ТОКАХ В ПИТАЮЩЕЙ ЛИНИИ**

Рассмотрен пуск асинхронного двигателя мощностью 1250 кВт. Применение поперечной компенсации реактивной мощности на время пуска двигателя позволяет снизить токи в питающей линии.

**Ключевые слова:** мощный асинхронный двигатель, малые токи в питающей линии, активная и реактивная мощность.

**V.A. Trefilov, E.A. Rybnikova, D.S. Krylasov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**START ASYNCHRONOUS MOTOR WITH A CAPACITY  
OF 1250 kW AT SMALL CURRENTS IN THE POWER LINE**

This article describes the start asynchronous motor with a capacity of 1250 kW. The use of reactive power compensation at the time of start of the engine reduces the current in the supply lines.

**Keywords:** powerful induction motor, small current in the supply lines, active and reactive power.

На газокompрессорной станции «Чашкино» применяется асинхронный электропривод мощностью 1250 кВт. При эксплуатации электропривода выявлено, что при пуске асинхронного двигателя значительно снижается напряжение на шинах РУ 6 кВ, что неблагоприятно сказывается на потребителях собственных нужд и на смежных потребителях. Схема электроснабжения ГКС «Чашкино» представлена на рис. 1. В схему электроснабжения входят: сеть внешнего электроснабжения – подстанция Чашкино 110 кВ; трехобмоточный трансформатор ТДТН – 10000/110; линия электропередачи – кабель марки СИП-3-150 протяженностью 4,5 км; распределительное устройство РУ 6кВ, к которому подключены прочая нагрузка (206+j 106) кВА, 2 рабочих двигателя мощностью 1250 кВт и конденсаторная установка КУ мощностью 600 кВАр.

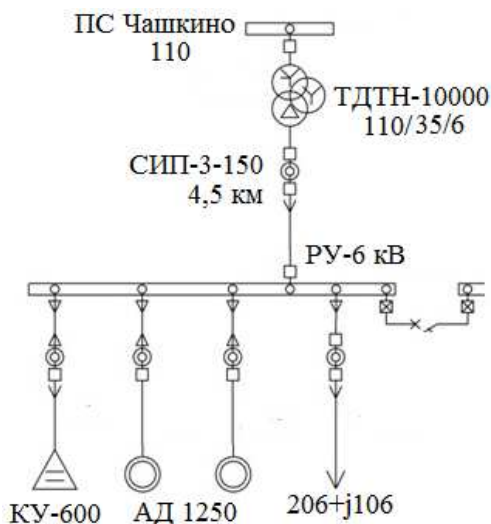


Рис. 1. Схема электроснабжения ГКС «Чашкино»

Анализ процессов пуска асинхронного двигателя проводился на составленной в среде Simulink [1] математической модели в фазных координатах. Уравнения, описывающие процессы пуска асинхронного двигателя в представленной схеме электроснабжения, в данной статье не приводятся.

На рис. 2 приведена осциллограмма пуска двигателя на холостом ходу. Момент сопротивления компрессора при пуске составляет 0,1 от его номинального момента ( $M_{c0} = 383,1$  Нм), а после разгона увеличивается до номинального значения  $M_{сн} = 3831$  Нм.

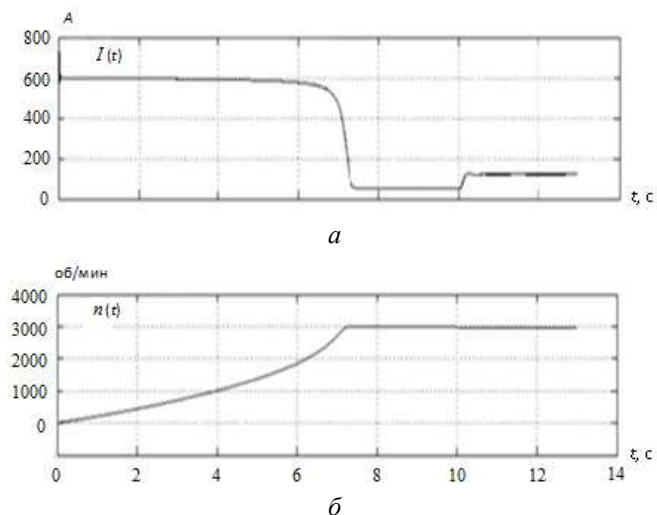


Рис. 2. Осциллограммы тока (а) и скорости (б) двигателя

Из осциллограмм видно, что пуск двигателя осуществляется при токе  $I = 600$  А, который почти не изменяется с течением времени; время пуска  $t = 7,3$  с. Значительный пусковой ток двигателя приводит к существенному падению напряжения в сети.

На рис. 3 приведены кривые изменения напряжения в начале и в конце линии электропередачи. При пуске напряжение на зажимах трансформатора равно 3175 В (92 %  $U_{ф.н}$ ), а напряжение в узле нагрузки – 2304 В, что составляет 66 % от номинального напряжения двигателя ( $U_{ф.н} = 3464$  В). После запуска двигателя напряжение в узле нагрузки в установившемся режиме работы составляет  $U = 3454$  В.

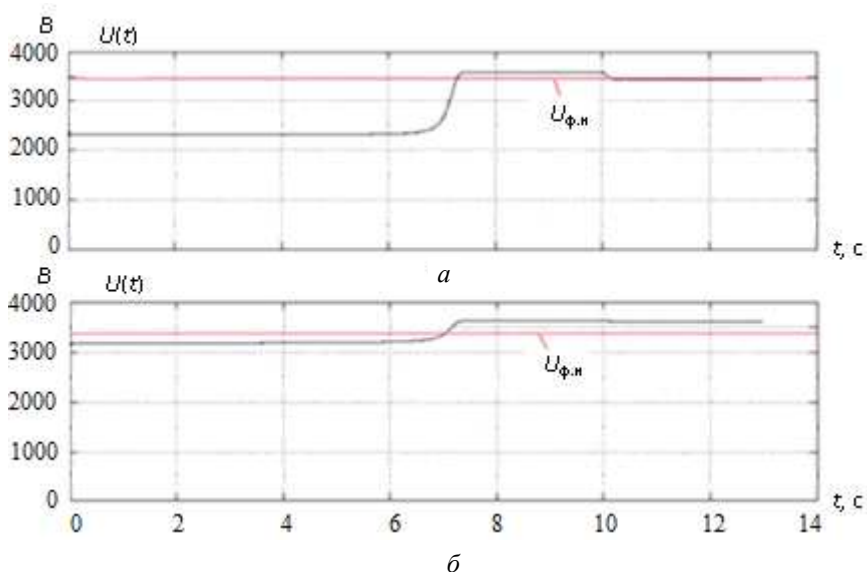


Рис. 3. Осциллограммы напряжения в узле нагрузки (а) и в начале линии (б)

В ГОСТ 13109–97 на качество электроэнергии установлены нормально и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения на зажимах приемников электрической энергии в пределах соответственно  $\delta U_{у_{норм}} = \pm 5\%$  и  $\delta U_{у_{пред}} = \pm 10\%$  номинального напряжения сети. В установившемся режиме работы, как видно из диаграммы, отклонение напряжения  $\delta U_y = 0,3\%$ , что удовлетворяет ГОСТу.

На рис. 4 приведены кривые изменения активной и реактивной мощностей в конце линии в узле нагрузки и в начале линии на зажимах трансформатора в процессе пуска двигателя. Из графиков видно, что

двигатель за время пуска потребляет значительную реактивную мощность (порядка  $3,85 \cdot 10^6$  ВАр, которая почти не изменяется с течением времени. Это ведет к увеличению тока в питающей линии и, как следствие, к значительному снижению напряжения при пуске. После разгона двигателя происходит существенное снижение потребления реактивной мощности, чем и объясняется уменьшение тока в линии и отклонения напряжения в узле нагрузки  $\delta U_y$ .

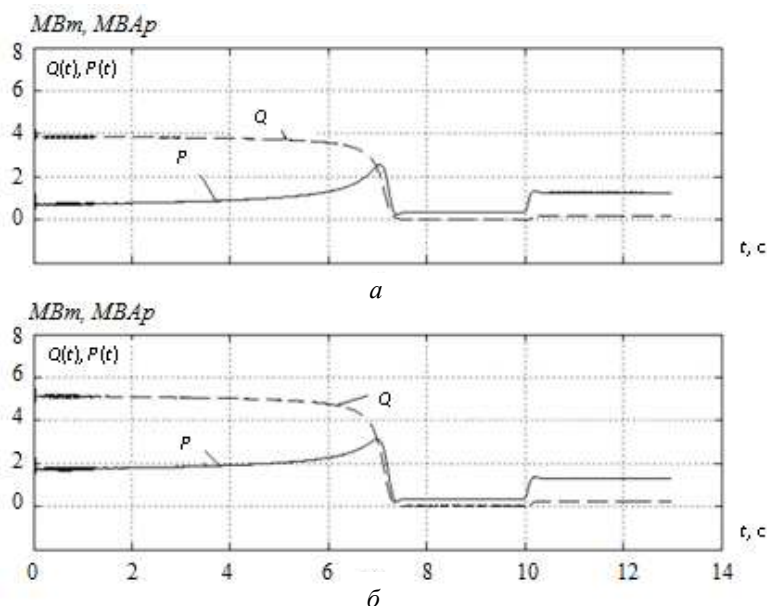


Рис. 4. Кривые изменения активной и реактивной мощностей в узле нагрузки (а) и в начале линии (б)

Величина отклонения напряжения  $\delta U_y$  в установившемся режиме работы двигателя находится в пределах нормы, это свидетельствует о том, что установленной конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности в узле нагрузки при работе одного асинхронного двигателя достаточно.

Технологический процесс на ГКС «Чашкино» предусматривает одновременную работу двух асинхронных двигателей. На рис. 5 приведены осциллограммы процессов при пуске второго двигателя с уже работающим первым двигателем.

Пуск второго двигателя произведен в момент времени  $t = 12$  с. Разгон двигателя происходит за время  $t = 9,3$  с. Ток двигателя при пус-

ке  $I = 580$  А. Увеличение времени разгона и одновременно уменьшение тока при пуске второго двигателя объясняются большим, чем в случае запуска одного двигателя, снижением напряжения в узле нагрузки. Как следует из рис. 6, напряжение в узле нагрузки при запуске второго двигателя составляет 2050 В (59 %  $U_{ф.н}$ ), а напряжение на трансформаторе равно 2130 В (61 %  $U_{ф.н}$ ).

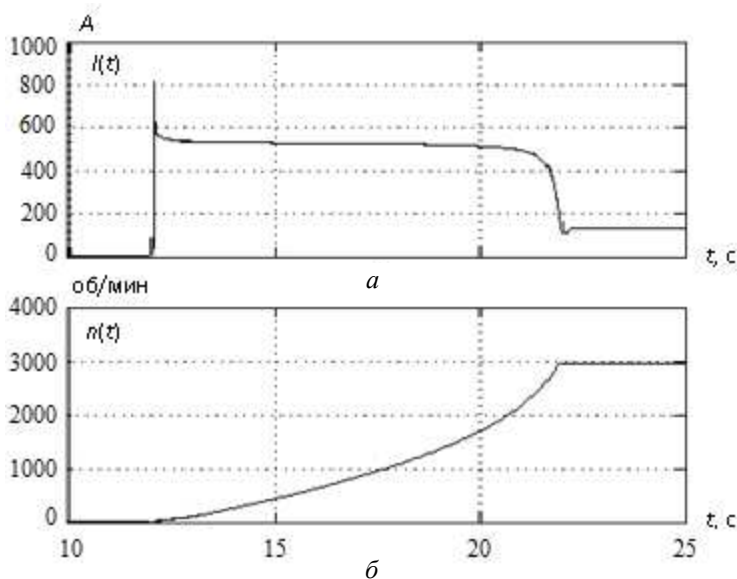


Рис. 5. Осциллограммы тока (а) и скорости (б) 2-го А

Напряжение в узле нагрузки в установившемся режиме работы после запуска второго двигателя равно 3156 В ( $\delta U_y = 8,9$  %), что не удовлетворяет ГОСТ 13109–97. Рост величины отклонения напряжения объясняется увеличенным током линии после пуска второго двигателя ( $I = 258$  А, рис. 6, в). Таким образом, установленной мощности конденсаторной батареи не достаточно для нормальной работы двигателей. Необходимо увеличить мощность батареи конденсаторов для того, чтобы скомпенсировать большую часть индуктивной составляющей тока нагрузки и обеспечить нормальное отклонение напряжения в установившемся режиме при работе двух двигателей. Подбором установлено, что для этого необходимо увеличить мощность конденсаторной батареи с 600 до 1300 кВАр. При такой мощности конденсаторной установки отклонение напряжения составит  $\delta U_y = 4,73$  %.

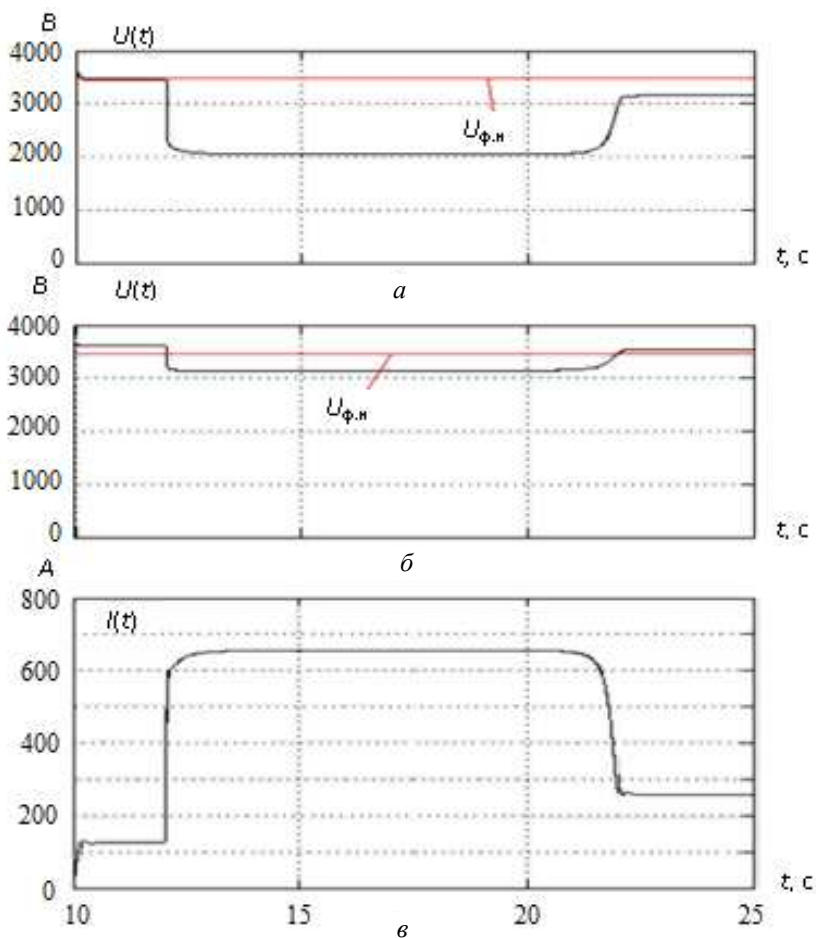


Рис. 6. Осциллограммы напряжения узла нагрузки (а), напряжения в начале линии (б) и тока линии (в)

Проведенные исследования показывают, что пуски двигателей мощностью 1250 кВт на газокompрессорной станции «Чашкино» снижают качество электроэнергии на шинах РУ 6 кВ, что может неблагоприятно отразиться на потребителях собственных нужд и на смежных потребителях [2].

Снижение напряжения на шинах РУ 6 кВ обусловлено значительными перетоками реактивной мощности, которую потребляет двигатель при пуске. На рис. 7 представлена зависимость реактивной мощности двигателя, рассчитанная [3] для разных питающих напряжений при изменении скольжения от 1 до 0. Из зависимостей видно, что асинхронный двигатель при пуске потребляет значительную реактивную

мощность, которая при скольжениях от 1 до 0,3 изменяется весьма незначительно и только в диапазоне скольжения от 0,3 до 0 начинает резко уменьшаться.

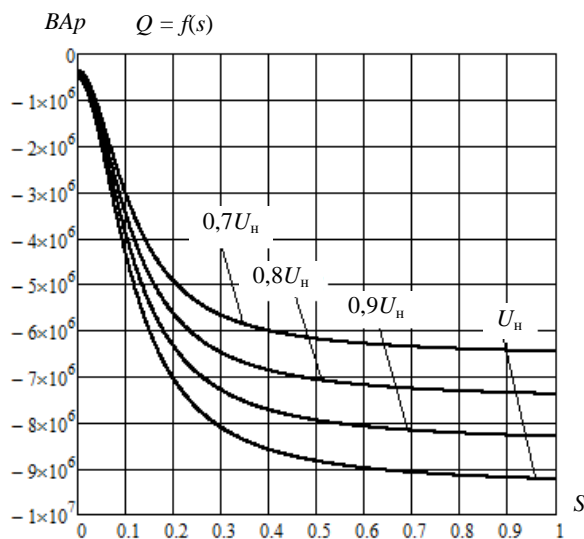


Рис. 7. Зависимость реактивной мощности двигателя при пуске от напряжения питания

Для снижения величины посадки напряжения во время пуска двигателя необходимо уменьшить переток реактивной мощности от источника энергии до узла нагрузки.

Этого можно добиться применением на период пуска двигателя поперечной компенсации реактивной мощности. В качестве источника реактивной (емкостной) мощности можно использовать батарею конденсаторов путем ее установки в узел нагрузки.

В схемах электроснабжения используется защита минимального напряжения, которая, как правило, отстраивается на величину  $0,8U_{ф.н.}$ . В ходе исследования установлено, что посадка напряжения в узле нагрузки величиной не более  $20\% U_{ф.н.}$  при запуске асинхронного двигателя обеспечивается при мощности конденсаторной батареи 5100 кВАр.

Поскольку реактивная мощность асинхронного двигателя при пуске изменяется, то для ее компенсации необходимо применить регулируемый источник реактивной мощности. При исследовании пускового режима батарея конденсаторов была представлена четырьмя ступенями, подобранными при исследовании опытным путем. Мощность ступеней батареи и время их отключения приведены ниже.

Время отключения ступеней, с	Мощность ступеней КБ, кВАр
$t = 3,90$	200
$t = 4,28$	900
$t = 4,36$	1000
$t = 4,43$	3000
	$\Sigma Q5100$

На рис. 8 приведены кривые изменения напряжения в начале и в конце линии, во время пуска одного двигателя при применении поперечной компенсации

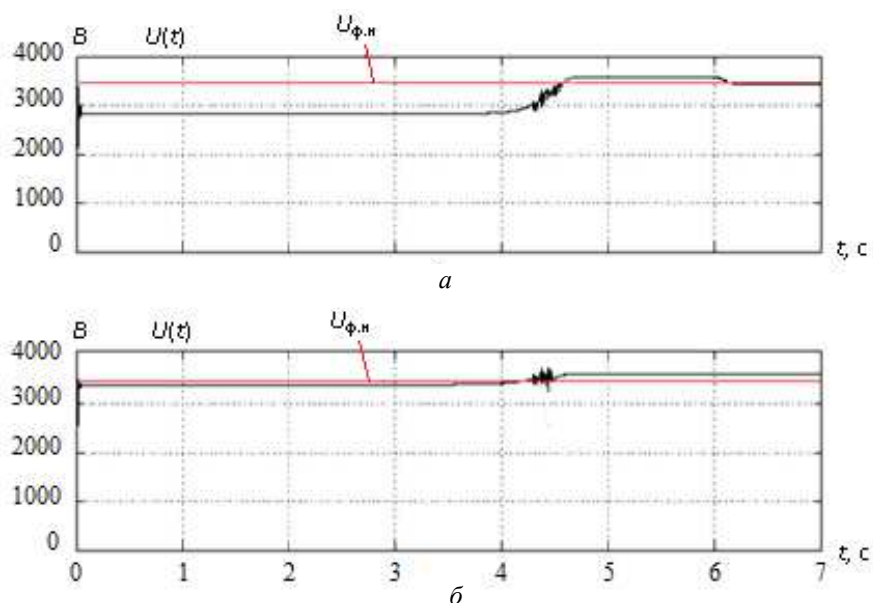


Рис. 8. Осциллограммы напряжения в узле нагрузки (а) и в начале линии (б)

На рис. 9 приведены осциллограммы тока двигателя и питающей линии. Асинхронный двигатель запускается за время 4,5 с. Ток двигателя при пуске равен 760 А, а ток в питающей линии составляет величину 316,5 А. Таким образом, величина тока в питающей линии значительно меньше пускового тока двигателя и на 45 % меньше тока линии без компенсации реактивной мощности.

На рис. 10 приведены осциллограммы активной и реактивной мощности, измеренные в конце и начале питающей линии. Реактивная мощность узла нагрузки при пуске уменьшается на 36 % по сравнению с мощностью, потребляемой при отсутствии компенсации. Одновременно при компенсации снижается реактивная мощность источника, отдаваемая в линию.



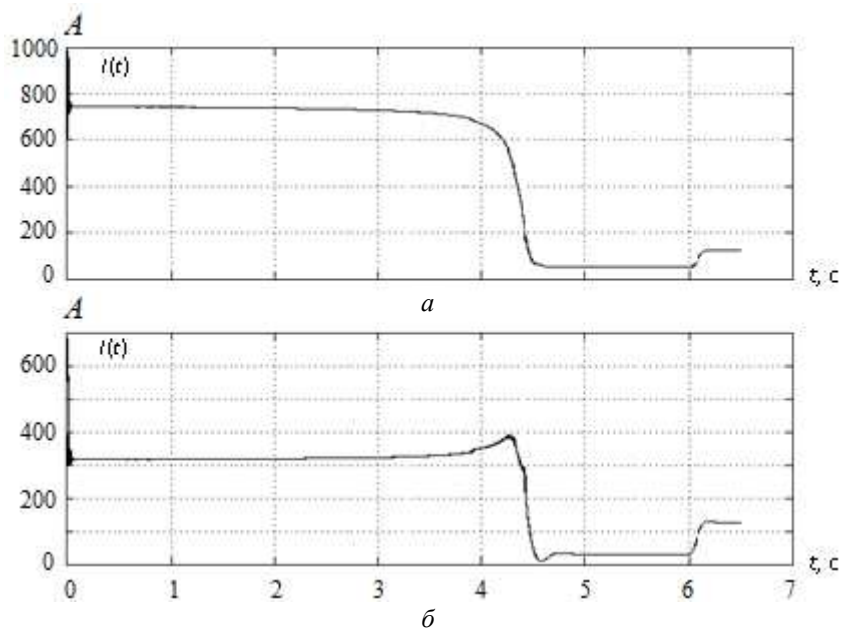


Рис. 9. Осциллограммы пускового тока двигателя (а) и питающей линии (б)

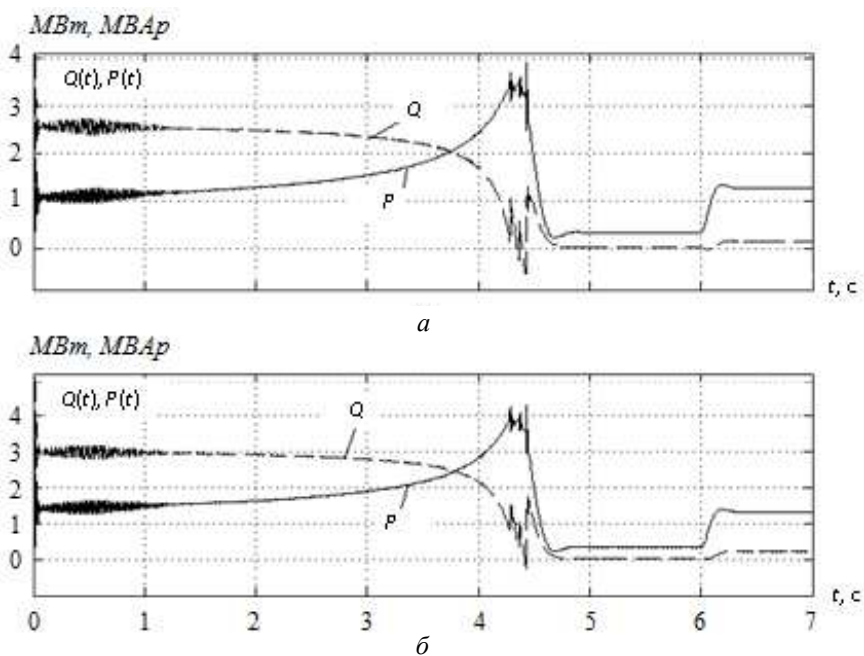


Рис. 10. Осциллограммы активной и реактивной мощностей в узле нагрузки (а) и в начале линии (б)

Ниже приведены определенные подбором мощности ступеней конденсаторной батареи и времена их отключения при запуске второго двигателя при уже работающем первом двигателе.

Время отключения ступеней, с	Мощность ступеней КБ, кВАр
$t = 4,50$	200
$t = 4,72$	900
$t = 4,80$	1000
$t = 4,89$	3500
	$\Sigma Q5600$

По результатам исследования пускового режима второго двигателя можно отметить следующие моменты. Пуск второго асинхронного двигателя осуществляется при токе 740 А за время 4,9 с. Незначительное уменьшение пускового тока и небольшое увеличение времени пуска второго двигателя по сравнению с первым двигателем объясняются снижением напряжения в узле нагрузки до значения  $U = 2790$  В (80,5 %  $U_{ф.н}$ ). Ток в питающей линии при запуске второго двигателя равен 360 А, что также меньше тока линии без применения компенсации.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– пуск асинхронных двигателей на ГКС «Чашкино» сопровождается протеканием в питающей линии токов величиной 600–660 А, значительным снижением питающего напряжения на шинах РУ – 6 кВ: при запуске одного двигателя оно уменьшается до величины 66 %  $U_{ф.н}$ , а при запуске второго – до величины 59 %  $U_{ф.н}$ ;

– применение поперечной компенсации реактивной мощности на время пуска асинхронных двигателей мощностью 1250 кВт позволит уменьшить протекающий ток в питающей линии до величины 315–360 А, снизить посадку напряжения в узле нагрузки до величины не более 20 %  $U_{ф.н}$  и сократить продолжительность времени пуска двигателей.

### Библиографический список

1. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – 288 с.
2. Суднова В.В. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников / ЗАО «Энергосервис». – М., 2000. – 80 с.
3. Гамазин С.И., Понаровкин Д.Б., Цырук С.А. Переходные процессы в электродвигательной нагрузке систем промышленного электроснабжения. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 352 с.

## References

1. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrotechnical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Saint Petersburg: Piter, 2007. 288 p.
2. Sudnova V.V. Vliianie kachestva elektroenergii na rabotu elektropriemnikov [Influence of quality of the electric power on operation of electroreceivers]. Moscow: ZAO «Energoservis», 2000. 80 p.
3. Gamazin S.I., Ponarovkin D.B., Tsyruk S.A. Perekhodnye protsessy v elektrodvigatel'noi nagruzke sistem promyshlennogo elektrosnabzheniia [Transient phenomena in electromotive loading of systems of industrial electrical power supply]. Izdatel'stvovo Moskovskogo ekonomicheskogo instituta, 1991. 352 p.

## Сведения об авторах

**Трефилов Владимир Алексеевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trefilov@pstu.ru).

**Рыбникова Евгения Андреевна** (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29).

**Крыласов Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29).

## About the authors

**Trefilov Vladimir Alekseevich** (Perm, Russian Federation) – is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: trefilov@pstu.ru).

**Rybnikova Evgenia Andreevna** (Perm, Russian Federation) – is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.).

**Krylasov Dmitry Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.).

Получено 12.12.2014