УДК 621.311

**Двойненков Михаил Валерьевич**

АО «РАДИУС Автоматика», инженер; ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: [dmv@rza.ru](mailto:dmv@rza.ru)

**Шуин Владимир Александрович**

ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: [rza@rza.ispu.ru](mailto:stu@rza.ispu.ru)

**Исследование на имитационной модели параметров режима   
самозапуска электродвигателей комплексной нагрузки, учитываемых при выборе уставок релейной защиты линий высокого напряжения**

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.**При выборе уставок резервных ступеней дистанционных защит ЛЭП высокого напряжения должны учитываться параметры режима самозапуска электродвигателей нагрузки, характеризуемые коэффициентом увеличения тока в защищаемой линии Kзап и углом φзап полного сопротивления нагрузки. В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП, как правило, приводятся только ориентировочные значения коэффициента Kзап, а угол φзап часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме φраб без учета самозапуска электродвигателей потребителей. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров Kзап и φзап, могут быть причиной снижения селективности и чувствительности резервных ступеней ДЗ, т.е. эффективности дальнего резервирования. Для уточнения существующих методик выбора уставок резервных ступеней ДЗ актуальной задачей является исследование зависимостей параметров режима самозапуска Kзап и φзап от доли и типа двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки.

**Материалы и методы**. Для исследования зависимостей параметров режима самозапуска Kзап и φзап от доли и состава двигательной нагрузки в комплексной нагрузке в работе используется программный комплекс MATLAB с входящим в него пакетом SimPowerSystems, предназначенным для моделирования электротехнических устройств и систем. Модель исследуемого объекта включает источник питания напряжением 110 (220) кВ, ЛЭП 110 (220) кВ с понижающим трансформатором 110(220)/6(10) кВ в конце линии, участок сети 6(10) кВ с кабельными линиями для питания группы высоковольтных асинхронных электродвигателей (АДВ) и понижающим трансформатором 6(10)/0,4 кВ для питания группы низковольтных асинхронных электродвигателей (АДН). Параметрирование модели производилось с учётом реальных характеристик её элементов и методик расчёта параметров схем замещения.

**Результаты**. Предложен подход к приближенному расчёту параметров самозапуска на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки с делением нагрузки на три категории: АДВ, АДН и статическая нагрузка. Показано, что основными факторами, влияющими на параметры режима самозапуска Kзап и φзап на ЛЭП 110-220 кВ, являются доли АДВ КАДВ, АДН КАДН и их соотношение в составе комплексной нагрузки. Получены зависимости параметров режима самозапуска Kзап и φзап от доли двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки, а также зависимость φзап = f(Kзап).

**Выводы.** Полученные зависимости Kзап = f(КАДВ, КАДН), φзап = f(КАДВ, КАДН) и φзап = f(Кзап) могут быть использованы для уточнения методик расчёта уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110-220 кВ, что повысит эффективность дальнего резервирования в электрических сетях высокого напряжения.

**Ключевые слова:** ЛЭП высокого напряжения, релейная защита, дальнее резервирование, дистанционная защита, комплексная нагрузка, режим самозапуска, электродвигатель

**Dvoynenkov Mikhail Valeryevich**

JSC “RADIUS Avtomatika”, engineer; Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, post graduate student at the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: [dmv@rza.ru](mailto:dmv@rza.ru)

**Shuin Vladimir Alexandrovich**

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: [rza@rza.ispu.ru](mailto:stu@rza.ispu.ru)

**The study of self-starting mode parameters of complex load electric motors on a simulation model taken into account when selecting   
relay protection settings of high-voltage transmission lines**

**Abstract**

**Background.** When selecting the settings for the backup stages of the line distance protection, the parameters of the self-starting mode of load electric motors, characterized by the Kstr coefficient of increase in current in the protected line of the and the φstr angle of the total load impedance, must be taken into account. In the existing methods for selecting the settings of the backup stages of the line distance protection, as a rule, only the approximate values of the Kstr coefficient are given, and the φstr angle is often assumed to be equal to the φoper angle of impedance at the "terminals" of protection in the maximum operating mode without taking into account the self-starting of the load motors. Errors caused by the inaccuracy of determining the parameters Kstr and φstr may be the reason for a decrease in the selectivity and sensitivity of the backup stages of the line distance protection, i.e. the effectiveness of remote backup. To clarify the existing methods for selecting the settings of the line distance protection, an urgent task is to study the dependencies of the parameters of the self-starting mode Kstr and φstr on the proportion and type of motor load as part of the complex load.

**Materials and methods.** To study the dependencies of the parameters Kstr and φstr of the self-starting mode on the proportion and composition of the motor load in the complex load the MATLAB software package is used with the SimPowerSystems package included in it, designed for modeling electrical devices and systems. The model of the object under study includes a 110(220) kV power supply, a 110(220) kV line with a 110(220)/6(10) kV step-down transformer at the end of the line, a 6(10) kV network section with cable lines for supplying a group of high-voltage asynchronous electric motors (AMHV) and a 6(10) kV step-down transformer 6(10)/0.4 kV for supplying a group of low voltage asynchronous electric motors (AMLV). The parameterization of the model was carried out taking into account the real characteristics of its elements and methods for calculating the parameters of equivalent circuits.

**Results.** An approach to approximate calculation of self-starting parameters based on data on the typical composition of consumers of a complex load node with load division into three categories is proposed: AMHV, AMLV and static load. It is shown that the main factors influencing the parameters Kstr and φstr of the self-starting mode on 110-220 kV transmission lines are the proportions of AMHV KAMHV, AMLV KAMLV and their ratio in the complex load. The dependences of the parameters Kstr and φstr of the self-starting mode on the proportion of the motor load in the complex load, as well as the dependence φstr = f(Kstr), are obtained.

**Conclusions.** The obtained dependences Kstr = f(KAMHV, KAMLV), φstr = f(KAMHV, KAMLV) and φstr = f(Кstr) can be used to clarify the methods for calculating the settings of backup stages of 110-220 kV line distance protection, which will increase the efficiency of remote backup in high-voltage electric networks.

**Key words:** high-voltage transmission lines, relay protection, remote backup, distance protection, complex load, self-starting mode, electric motor

**Введение.** Дистанционные защиты (ДЗ) со ступенчато-зависимыми характеристиками времени срабатывания получили широкое применение в качестве защит дальнего резервирования (ДР) при междуфазных коротких замыканиях (КЗ) на ЛЭП напряжением 110-220 кВ с двусторонним и односторонним питанием [1, 2 и др.]. Одним из основных факторов, ограничивающих селективность несрабатываний в нагрузочных режимах без КЗ и чувствительность при внутренних КЗ резервных ступеней ДЗ (т.е. и эффективность ДР), являются режимы, связанные с самозапуском электродвигателей (ЭД) в составе комплексной нагрузки.

Режимы самозапуска ЭД сопровождаются значительным увеличением модулей и аргументов тока в защищаемой линии по сравнению с нормальными нагрузочными режимами, что приводит к утяжелению условий выбора параметров срабатывания резервных защит ЛЭП. Характер протекания режима самозапуска зависит от длительности перерыва питания, типа двигательной нагрузки (высоковольтные асинхронные, низковольтные асинхронные, синхронные ЭД), доли двигательной нагрузки того или иного типа в составе комплексной нагрузки [3, 4]. Основными параметрами, характеризующими режимы самозапуска ЭД, при выборе уставок резервных ступеней ДЗ являются:

– коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске ЭД (коэффициент самозапуска):

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

где Iзап.макс – максимальный ток в режиме самозапуска ЭД; Iраб.макс – максимальный рабочий ток в защищаемой линии;

– расчётное минимальное сопротивление на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2) |

где Uмин – минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты в условиях самозапуска ЭД; Uраб.мин – минимальное рабочее напряжение на шинах источника питания;

– угол расчётного сопротивления на «зажимах» ДЗ в режиме самозапуска ЭД:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (3) |

Наиболее эффективное решение в части повышения отстроенности от режимов самозапуска ЭД и чувствительности резервных защит при внутренних КЗ в зоне ДР обеспечивает применение современных микропроцессорных исполнений ДЗ с полигональными характеристиками срабатывания.

На рис. 1 в качестве примера приведены формы полигональных характеристик срабатывания резервных ступеней ДЗ НПП «ЭКРА», применяемых в шкафах релейной защиты и автоматики (РЗА) серии ШЭ2607 для ЛЭП 110-220 кВ, и реализуемые при их использовании способы отстройки от режимов самозапуска ЭД.

Отстройка от режимов самозапуска ЭД по углу наклона правой нижней стороны 0D характеристики срабатывания ϕ2 > ϕзап.1 (рис. 1, а) может применяться при небольшой доле двигательной нагрузки в составе комплексной нагрузки и, соответственно, небольших значениях угла ϕзап.1 < ~45°. Преимуществами указанных характеристик срабатывания по сравнению с характеристикой по рис. 1, в является возможность обеспечения высокой чувствительности при КЗ в зоне ДР через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания с применением «выреза» активной нагрузки (рис. 1, б) обеспечивает также фиксацию близких к месту установки защиты КЗ через переходное сопротивление. Характеристика срабатывания по рис. 1, в и реализуемые при её применении способы отстройки от режимов самозапуска ЭД применяются при больших значениях угла ϕзап.2(3), превышающих 45°. Отстройка от замеров ДЗ в режимах самозапуска ЭД, характеризуемых значениями угла ϕзап.2 > ~45°, когда вектор Zзап.2 пересекает правую боковую сторону СD характеристики срабатывания, обеспечивается соответствующим выбором уставки Rс.з и угла наклона правой боковой стороны ϕ1. При больших значениях угла ϕзап.3 в режимах самозапуска со значительным перетоком реактивной мощности по защищаемой ЛЭП, когда вектор Zзап.3 пересекает верхнюю границу ВС характеристики срабатывания, обеспечивается выбором уставки Хс.з.

Из рис. 1 можно видеть, что для выбора формы полигональной характеристики срабатывания резервных ступеней ДЗ и параметров её настройки должны быть определены значения Кзап и ϕзап в расчётном наиболее тяжёлом режиме самозапуска двигательной нагрузки (минимальное значение первичного сопротивления в месте установки защиты Zзап при известном значении Кзап определяется по (2)).

В существующих методиках выбора уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП, как правило,

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а) | б) | в) |

Рис. 1. Формы характеристик срабатывания и способы отстройки от режимов самозапуска ЭД резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110-220 кВ: Хс.з, Rс.з, Rнагр,ϕ1 – ϕ3, ϕнагр – параметры настройки характеристик срабатывания (уставки),   
ϕл – угол сопротивления защищаемой линии, Zзап – сопротивление на «зажимах» защиты в режиме самозапуска ЭД, ϕзап – угол сопротивления Zзап: а – отстройка по углу наклона правой нижней стороны 0D характеристики срабатывания (выбором уставки ϕ2 > ϕзап.1);б – отстройка с применением «выреза» активной нагрузки (выбором уставок Rнагр и ϕнагр > ϕзап.1); в – отстройка с применением правой боковой стороны CD характеристики срабатывания   
(выбором уставок Rс.з, ϕ1 и ϕ2) или верхней стороны ВС характеристики срабатывания (выбором уставки Хс.з)

приводятся только ориентировочные значения коэффициента Kзап, а угол φзап часто принимается равным углу сопротивления на «зажимах» защиты в максимальном рабочем режиме   
φраб = 25-35° без учета самозапуска ЭД. Например, в широко применяемых методиках [5, 6] указано, что Kзап ориентировочно принимается равным 1,5-2,0 (также при определённых условиях в некоторых методиках Kзап может быть увеличен до 2,5 или уменьшен до 1,2-1,3) и должен уточняться расчётами для конкретных условий, что не всегда возможно на стадии разработки проектной документации. Погрешности, обусловленные неточностью определения параметров Kзап и φзап, могут быть причиной уменьшения эффективности ДР.

При отсутствии специальных расчётных программ практически невозможно для каждой ЛЭП определить точно параметры режима самозапуска Кзап и ϕзап, так как их значения, как уже отмечалось выше, зависят от многих факторов (состава и режимов работы комплексной нагрузки питаемых по защищаемой линии подстанций, доли и состава двигательной нагрузки, длительности и степени снижения напряжения при перерыве питания и др.). Поэтому при расчётах указанных параметров в целях выбора уставок РЗА, как правило, применяются упрощенные методы, основанные на использовании ряда допущений. Наиболее широкое применение получил метод приближенного расчёта параметров режима самозапуска ЭД, предложенный в [7] и подробно описанный (с примерами расчётов) в работах Шабада М.А. [8, 9], основанный на использовании следующих допущений:

1) все двигатели, участвующие в самозапуске, к моменту восстановления напряжения питания на зажимах ЭД практически полностью заторможены (что справедливо при перерыве питания на несколько секунд);

2) подключенная комплексная нагрузка разделяется на три условные категории:

– бытовая нагрузка, имеющая в своем составе незначительную долю асинхронных двигателей низкого напряжения менее 1 кВ (АДН), коэффициент самозапуска для которой по опытным данным принимается равным Кзап ≈ 1,2-1,3;

– обобщённая (комплексная, как правило, промышленная) нагрузка, имеющая в своем составе значительную долю (более 50%) АДН, учитываемая в расчётах обобщённым сопротивлением Х\*нагр = 0,35 (Кзап ≈ 2,9);

– асинхронные двигатели высокого напряжения 3-10 кВ (АДВ), учитываемые параметрами обобщённого (эквивалентного) двигателя, определёнными по индивидуальным параметрам всех АДВ;

3) все АДН в составе бытовой и обобщённой промышленной нагрузки остаются подключенными к сети при перерывах питания и вместе с АДВ участвуют в самозапуске.

В то же время известно, что самозапуск низковольтных двигателей большинства механизмов промышленных предприятий недопустим по условиям безопасности обслуживающего персонала, из-за опасности поломки механизма или брака продукции и других причин, поэтому при значительном снижении напряжения в сети или его исчезновении АДН, как правило, должны автоматически отключаться [4]. Для этого значительная часть АДН включается через магнитные пускатели, контакторы или автоматические выключатели с расцепителями минимального напряжения и поэтому не принимает участие в самозапуске двигательной нагрузки. В тех случаях, когда допустимо и целесообразно участие АДН в самозапуске, применяется автоматическое повторное включение низковольтных ЭД, ввод задержки по времени, сохраняющей контактор включенным, или автоматические выключатели с сохранением включенного положения в режиме самозапуска.

С учетом изложенного выше можно сделать вывод, что возможности применения традиционного подхода для определения параметров режима самозапуска ЭД, основанного на использовании метода по [7-9], при расчётах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110–220 кВ ограничены его следующими недостатками:

– метод ориентирован в основном на расчёты Кзап, что приемлемо только при выборе уставок максимальных токовых защит (МТЗ);

– при проектировании не всегда доступны исходные данные по точному составу комплексной нагрузки питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответвительных подстанций, обеспечивающие возможность её разделения на указанные выше три условных категории;

– не учитывается действительная доля АДН, принимающих участие в самозапуске ЭД;

– не учитывается влияние длительности перерыва питания ЭД на параметры режима самозапуска;

– расчёт самозапуска ЭД выполняется по упрощенной чисто реактивной схеме замещения, что не позволяет определить угол ϕзап.

Отметим также, что в некоторых случаях при расчётах самозапуска ЭД применяются и более простые методы, не учитывающие влияние АДН [4 и др.]. Такой подход позволяет разделить комплексную нагрузку на две условные категории: АДВ и статическую нагрузку, сопротивление которой при самозапуске остается практически неизменным, что существенно упрощает методику приближенных расчётов параметров Кзап и ϕзап режима самозапуска двигательной нагрузки. В [2] с использованием данного подхода и исходных данных о соотношении долей и основных параметрах АДВ и статической нагрузки получены достаточно простые аналитические выражения для расчёта Кзап и ϕзап. Основные недостатки данного метода заключаются в том, что не может быть учтено при необходимости влияние на параметры режима самозапуска АДН, длительности перерыва питания ЭД и параметров элементов (линий, трансформаторов) схемы электроснабжения двигательной нагрузки.

Таким образом, рассмотренные упрощённые методы учитывают ограниченное число факторов, влияющих на параметры режима самозапуска, и не во всех случаях могут обеспечить приемлемую точность расчётов Кзап и ϕзап, используемых при расчётах уставок резервных ступеней ДЗ ЛЭП высокого напряжения.

**Метод приближенного расчёта параметров Кзап и ϕзап на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки.** При отсутствии достоверных данных об относительном составе потребителей узла комплексной нагрузки в [10] рекомендуется использовать типовой состав нагрузки отдельных отраслей народного хозяйства, выраженный в процентах от суммарной установленной мощности в рассматриваемом узле. При использовании в расчётах самозапуска ЭД данных о типовом составе комплексной нагрузки достаточно знать, к какой отрасли (отраслям) относятся потребители питаемых по защищаемой ЛЭП промежуточных и ответвительных подстанций и их суммарную установленную мощность.

При выполнении расчётов самозапуска ЭД на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки последнюю целесообразно разделить на три следующие условные категории:

– АДВ, учитываемые параметрами обобщенного двигателя, определенными по индивидуальным параметрам всех участвующих в самозапуске ЭД напряжением 3-10 кВ;

– АДН, учитываемые параметрами обобщенного двигателя напряжением менее 1 кВ;

– статическая нагрузка (электрическое освещение, электротермические установки, преобразователи и прочая нагрузка), учитываемая постоянными параметрами.

Предложенный подход позволяет:

– обеспечить приближенный расчёт параметров режима самозапуска ЭД при отсутствии достоверных данных по составу потребителей комплексной нагрузки;

– повысить точность расчётов параметров режима самозапуска ЭД при наличии данных о реальном составе потребителей комплексной нагрузки;

– учитывать большее число факторов, влияющих на самозапуск ЭД, обеспечивая повышение точности расчётов.

Целью данной работы является разработка на основе предложенного подхода методики и расчётной модели для определения параметров режима самозапуска ЭД Kзап и φзап, исследование их зависимости от доли высоковольтных КАДВ и низковольтных КАДН двигателей в составе комплексной нагрузки (Kзап = f(КАДВ, КАДН), φзап = f(КАДВ, КАДН)), а также построение зависимостей φзап = f(Kзап) для проверки обоснованности и при необходимости уточнения существующих рекомендаций по их выбору при расчётах уставок срабатывания резервных ступеней ДЗ ЛЭП 110-220 кВ.

**Материалы и методы.** Повышение точности расчётов параметров режима самозапуска ЭД возможно только за счёт усложнения расчётной модели защищаемого объекта и применения соответствующих методов расчёта. Наиболее доступным методом, не требующим создания специальных расчётных программ, является имитационное моделирование. В данной работе для реализации предложенного метода расчёта самозапуска ЭД использованы получившие широкое применение для моделирования электротехнических устройств и систем библиотека блоков SimPowerSystems и среда моделирования Simulink программного комплекса MATLAB.   
С помощью данных средств смоделирован участок электрической сети, содержащий ЛЭП 110-220 кВ и понизительную подстанцию с низшим напряжением 6-10 кВ, в состав комплексной нагрузки которой входят: АДВ, АДН и статическая нагрузка.

**Схема участка электрической сети для исследования режима самозапуска двигательной нагрузки, её параметрирование и условия для моделирования.** Схема моделируемого участка сети приведена на рис. 2. Участок сети состоит из: источника питания напряжением 110 кВ, ЛЭП с односторонним питанием и понижающим трансформатором с низшим напряжением 6 кВ, статической нагрузки на напряжении 6 кВ (центр питания), участка сети 6 кВ с кабельными линиями для питания группы

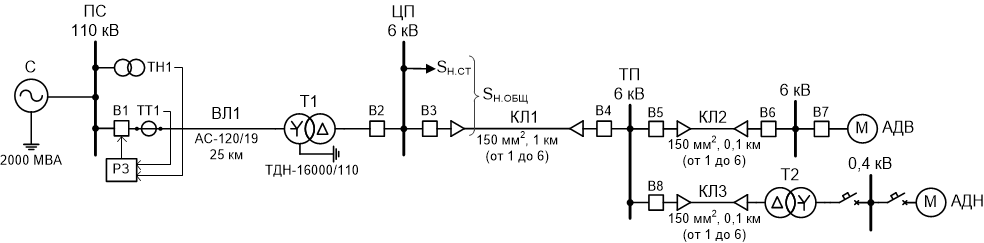


Рис. 2. Схема участка сети для исследования параметров Kзап и φзап ЭД нагрузки

АДВ, а также участка сети с кабельными линиями 6 кВ и понижающим трансформатором с низшим напряжением 0,4 кВ для питания группы АДН.

Данная схема может использоваться и при расчёте параметров режима самозапуска на линиях с двусторонним питанием, так как при этом расчётным режимом, как правило, является режим одностороннего питания, возникающий после аварии или при ремонте [6].

Из рис. 2 видно, что комплексная нагрузка разделена на три группы: статическая; высоковольтные асинхронные двигатели; низковольтные асинхронные электродвигатели.

Для исследуемой сети параметрирование производится следующим образом:

– для источника питания в MATLAB задано междуфазное напряжение и полная мощность;

– параметры воздушных и кабельных ЛЭП, силовых трансформаторов рассчитаны согласно [10, 12];

– коэффициент загрузки понижающих трансформаторов принят равным 0,7

– высоковольтная двигательная нагрузка представлена в виде обобщённого асинхронного электродвигателя 6 кВ с параметрами   
согласно [11]. При наличии данных о типах АДВ в составе нагрузки для определения   
параметров обобщённого ЭД используются расчётные формулы согласно [8, 9]. Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принят равным 1 о.е.;

– низковольтная двигательная нагрузка представлена в виде асинхронного электродвигателя 0,4 кВ с сопротивлением обобщённой нагрузки x\*нагр = 0,35 о.е [8, 9]. Коэффициент пуска Kпуск ≈ 1/x\*нагр = 1/0,35 ≈ 2,9. Номинальный момент сопротивления приводимого в движение механизма принят равным 0,7 о.е.;

– момент сопротивления АДВ и АДН изменяется пропорционально квадрату скорости вращения электродвигателя (механизмы   
вентиляторного типа, насосы, т.е. большинство используемых механизмов), согласно следующей формуле, приведённой в работе   
И.А. Сыромятникова по режимам работы ЭД [3] (используется также в методике расчёта самозапуска, составленной фирмой ОРГРЭС):

|  |  |
| --- | --- |
| Мс = Мс.нач + (Мс.ном – Мс.нач) ·  х (nтек/nном)2, | (4) |

где Mс.нач, о.е. – начальный момент сопротивления вращающегося механизма (без учёта   
Мтрения\_покоя); Mс.ном, о.е. – номинальный момент сопротивления механизма; nном, об/мин – номинальная скорость вращения ЭД, при которой момент сопротивления равен номинальному; nтек, об/мин – текущая скорость вращения ЭД.

Параметрирование модели производилось с учётом реальных характеристик её элементов, приведённых в справочных данных, а также с учётом методик расчёта параметров схем замещения, при этом учтены особенности стандартных блоков MATLAB [10, 12].

Для исследуемой сети принимаются   
следующие условия моделирования самозапуска, полностью учитываемые при построении модели:

– все электродвигатели групп АДВ и АДН участвуют в самозапуске;

– в процессе исследования состав комплексной нагрузки варьируется изменением долей статической нагрузки и двигательной нагрузки АДВ и АДН. Для учёта влияния на параметры режима самозапуска Kзап и φзап только группы АДВ соответственно отключается группа АДН и наоборот;

– напряжение, ток и угол между ними измеряются в месте установки защиты – РЗ   
(рис. 2), также измеряются токи статора, скорость вращения ротора и вращающий электромагнитный момент, как для АДВ, так и для АДН;

– самозапуск асинхронных электродвигателей производится при неподвижном состоянии роторов из-за длительного перерыва питания, при этом параметры режима самозапуска Kзап и φзап достигают максимальных значений;

– при исследовании влияния АДВ на   
Kзап и φзап рассматриваются также режимы с разными временами перерыва питания, в которых самозапуск осуществляется, когда двигатели ещё не успели полностью затормозиться.

Достоверность имитационной модели подтверждалась сравнением полученных на её основе результатов расчётов параметров режима самозапуска электродвигателей с результатами расчётов, выполненных другими методами, приведёнными в [2, 8].

**Результаты исследования влияния АДВ в составе комплексной нагрузки на параметры Kзап и φзап.** Рассмотрим влияние доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДВ в составе комплексной нагрузки потребителей различных отраслей народного хозяйства обычно составляет от 5-8% до 15-20%. Для отдельных отраслей промышленности доля АДВ может взрастать до 50% и более, например, в нефтедобывающей и газодобывающей отрасли.

Для построения зависимостей   
Kзап = f(KАДВ) и φзап = f(KАДВ) необходимо изменять долю АДВ в составе комплексной нагрузки от 0 до 80% с шагом 5%. При этом в каждом опыте снимаем временные осциллограммы тока в месте установки защиты, коэффициента самозапуска и угла самозапуска, токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДВ.

Как сказано выше, дополнительно при исследовании влияния АДВ на Kзап и φзап   
рассматриваются режимы с разными временами перерыва питания. При этом самозапуск АДВ осуществляется при полной остановке двигателей, а также, когда они ещё не успели полностью затормозиться.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента самозапуска от доли высоковольтных асинхронных ЭД в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

Рис. 3. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 – перерыв питания с tпер = 0,5 с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с tпер = 1,5 с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с tпер = 2,5 с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

Из рис. 3 видно, что при обычной доле АДВ равной 5-20% коэффициент самозапуска достигает значений 1,3-1,7, что примерно соответствует рекомендациям существующих методик. При доле АДВ более 30% величина Кзап при разных временах перерыва питания уже может не укладываться в стандартный рекомендованный диапазон 1,5-2,0 и с ростом доли АДВ достигать значений 2,5 и более.

На рис. 4 показана зависимость угла самозапуска от доли высоковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания.

Как видно из рис. 4, угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки высокого напряжения равной 5-20% может достигать значений до 50° и более, что существенно больше значений угла в нагрузочном режиме (при cosφнагр = 0,8-0,9; φнагр ≈ 25-35°). При дальнейшем увеличении доли АДВ, что имеет место для некоторых отраслей промышленности, значение φзап может достигать 70° и более, что может значительно изменить параметры срабатывания ДЗ линии.

На основе полученных зависимостей   
Kзап = f(KАДВ) и φзап = f(KАДВ) возможно выполнить построение зависимости φзап = f(Kзап).

На рис. 5 показана зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния после длительного перерыва питания.

Рис. 4. Зависимость угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при различных временах перерыва питания: 1 – перерыв питания с   
tпер = 0,5 с; 2 (пунктир, линия) – перерыв питания с tпер = 1,5 с; 3 (пунктир, точка) – перерыв питания с   
tпер = 2,5 с; 4 – длительный перерыв питания с полной остановкой АДВ

Рис. 5. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДВ в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДВ из неподвижного состояния

С помощью зависимости φзап = f(Kзап) становится возможным определение при заданном Kзап значения φзап, что особенно важно для выбора параметров срабатывания дистанционной защиты линии.

Как видно из рис. 5, при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от 55° до ≈70°.

Отметим, что согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДВ, например, при их доле в комплексной нагрузке равной 20%, составляет около 2,0 с.

**Результаты исследования влияния АДН в составе комплексной нагрузки на Kзап и φзап.** Рассмотрим влияние доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки на коэффициент самозапуска и угол самозапуска.

Согласно [10], доля АДН в составе комплексной нагрузки для большинства отраслей народного хозяйства значительна и в среднем составляет более 45%. Для отдельных отраслей промышленности доля АДН может взрастать до 75% и более, например, для пищевой и легкой промышленности.

Как отмечено в [13], в современных схемах электроснабжения АДН могут подключаются к шинным сборка 0,4 кВ через автоматические выключатели и оставаться подключёнными к питающей сети при перерывах питания. С учётом этого влияние низковольтных асинхронных двигателей на параметры режима самозапуска также необходимо рассмотреть.

Для построения зависимостей   
Kзап = f(KАДН) и φзап = f(KАДН) необходимо изменять долю АДН в составе комплексной нагрузки от 0 до 80% с шагом 5%. При этом в каждом опыте, аналогично опытам с АДВ, снимаем временные осциллограммы тока в месте установки защиты, Kзап и φзап, токов статора, скорости вращения ротора и вращающего электромагнитного момента АДН.

На рис. 6 показана зависимость коэффициента самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

Рис. 6. Зависимость коэффициента самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Из рис. 6 видно, что при обычной доле АДН равной 40-45% коэффициент самозапуска достигает значений выше 1,5, а при доле АДН до 60% и более Kзап принимает значения более 2, что выше рекомендуемого диапазона.

На рис. 7 показана зависимость угла самозапуска от доли низковольтных асинхронных электродвигателей в составе комплексной нагрузки.

Рис. 7. Зависимость угла самозапуска от доли АДН в составе комплексной нагрузки

Как видно из рис. 7, угол самозапуска уже при обычной доле двигательной нагрузки низкого напряжения равной 40-45% достигает значения ≈70°, что много больше значений угла в нагрузочном режиме. При дальнейшем увеличении доли АДН для некоторых отраслей промышленности, значение φзап может достигать 75° и более.

Аналогично рассмотренному выше случаю с влиянием на параметры самозапуска АДВ возможно построить также зависимость φзап = f(Kзап) при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки. Данная зависимость представлена на рис. 8.

Рис. 8. Зависимость угла самозапуска от коэффициента самозапуска при изменении доли АДН в составе комплексной нагрузки для случая самозапуска АДН из неподвижного состояния

Как видно из рис. 8, при стандартном рекомендованном диапазоне коэффициента самозапуска от 1,5 до 2,0 угол самозапуска принимает значения от 65° до ≈75°.

Отметим, что согласно полученным осциллограммам электрических величин, длительность процесса самозапуска при участии только группы АДН, например, при их доле в комплексной нагрузке равной 40%, составляет около 2,5 с.

**Результаты исследования совместного влияния АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки на Kзап и φзап.** Согласно данным [10], в составе комплексной нагрузки большинства отраслей народного хозяйства вместе со статической нагрузкой имеются как АДВ, так и АДН.

В ходе данного исследования доля АДН принималась равной от 0 до 70%, фиксировалась, и с её учётом далее варьировалась доля АДВ (от 0 до 25%) и, соответственно, оставшаяся доля статической нагрузки.

В результате получены семейства зависимостей Kзап = f(KАДВ) и φзап = f(KАДВ) при постоянной доле АДН для каждой из девяти зависимостей, представленных на рис. 9 и 10 соответственно.

Значения параметров самозапуска фиксировались в момент совместного участия АДВ и АДН в процессе самозапуска.

Рис. 9. Семейство зависимостей коэффициента самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае: 1 – доля АДН 0; 2 – доля АДН 5%;   
3 – доля АДН 10%; 4 – доля АДН 20%; 5 – доля АДН 30%; 6 – доля АДН 40%; 7 – доля АДН 50%; 8 – доля АДН 60%; 9 – доля АДН 70%

Из рис. 9 видно, что возможны случаи с таким сочетанием АДВ и АДН, что при их одновременном самозапуске коэффициент самозапуска будет выше рекомендуемых методиками значений даже при стандартных долях АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки.

Как показано на рис. 10, в большинстве случаев угол самозапуска при совместном самозапуске АДВ и АДН имеет значение существенно выше значения угла в нагрузочном режиме. При этом доля АДН в большинстве случаев не превышает обычного значения 45%.

При рассмотрении совместного влияния АДВ и АДН на параметры самозапуска большое значение имеет возможность их одновременного участия в процессе самозапуска.

Рис. 10. Семейство зависимостей угла самозапуска от доли АДВ в составе комплексной нагрузки при некоторой постоянной доле АДН в каждом случае:   
1 – доля АДН 0; 2 – доля АДН 5%; 3 – доля АДН 10%; 4 – доля АДН 20%; 5 – доля АДН 30%; 6 – доля АДН 40%; 7 – доля АДН 50%; 8 – доля АДН 60%; 9 – доля АДН 70%

**Выводы.** На основании изложенного материала и проведённого исследования можно сделать следующие выводы.

1. Предложен новый подход приближенного расчёта параметров самозапуска на основе данных о типовом составе потребителей узла комплексной нагрузки. Нагрузка делится на: АДВ, АДН и статическую нагрузку.

2. В программном комплексе MATLAB смоделирован участок сети, позволяющий исследовать параметры режима самозапуска.

3. Полученная зависимость Kзап = f(KАДВ) при обычной доле АДВ в целом соответствует рекомендуемому диапазону значений Kзап = 1,5-2,0. При большей доле АДВ Kзап может достигать значений 2,5 и более.

4. Анализ влияния АДН, которые также в некоторых случаях могут участвовать в самозапуске, показал, что при доле АДН равной 40-45% значение Kзап укладывается в рекомендуемый диапазон, но может превышать его при доле АДН равной 60% и более. Принимая решение об учёте влияния АДН, нужно учитывать тип их подключения, длительность процесса их самозапуска, возможность одновременного участия АДВ и АДН в процессе самозапуска.

5. Вероятно совместное присутствие АДВ и АДН в составе комплексной нагрузки. Тогда даже при их обычных долях Kзап может превышать рекомендуемые значения. Стоит отметить, что длительность процесса самозапуска как АДВ, так и АДН при их совместном участии в самозапуске увеличивается.

6. Значение угла самозапуска существенно выше значения обычного угла нагрузки   
(25-35°) даже при малой доле АДВ и/или АДН в составе комплексной нагрузки и может достигать 50-60° и более, что особенно важно учитывать при выборе параметров срабатывания дистанционной защиты линии.

7. Выполнено построение зависимостей φзап = f(Kзап), для определения при заданном Kзап значения φзап.

**Список литературы**

1. **Федосеев А.М., Федосеев М.А.** Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

2. **Нагай В.И.** Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.

3. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 528 с.

4. **Голоднов Ю.М., Хоренян А.Х.** Самозапуск электродвигателей – М.: Энергия, 1974. – 144 с.

5. **Руководящие** указания по релейной защите. Выпуск 7. Дистанционная защита линий 35-330 кВ. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 172 с.

6. **Методические** указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше. АО «СО ЕЭС», Москва, 2021. Режим доступа: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method\_distanc\_protect\_power\_lines\_281123.pdf

7. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

8. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с.

9. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

10. **Руководящие** указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 144 с.

11. **Жуков В.В.** Короткие замыкания в узлах комплексной нагрузки электрических систем/ Под ред. проф. А.Ф. Дьякова. - М.: Издательство МЭИ, 1994. – 224 с.

12. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

13. **Булычев А.В., Грибков М.А.** Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты // Релейная защита и автоматизация, 2023. – №1 (50). – С. 30-38.

**References**

1. Fedoseev, A.M., Fedoseev M.A. *Releynaya zashchita elektro-energeticheskikh sistem* [Relay protection of electrical power systems]: Textbook. for university. – 2nd ed., rev. and additional. - M.: Energoatomizdat, 1992. – 528 p.: ill.

2. Nagai V.I. *Releynaya zashchita otvetvitel’nykh podstanciy elektricheskikh setey* [Relay protection of branch substations of electrical networks]. – M.: Energoatomizdat, 2002. – 312 p., ill.

3. Syromyatnikov I.A. *Regimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley* [Operating modes of asynchronous and synchronous electric motors]. – M. – L.: Gosenergoizdat, 1963. – 528 p., with draw. and ill..

4. Golodnov Yu.M., Khorenyan A.Kh. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors] – M.: Energy, 1974. – 144 p.: ill.

5. *Rukovodyaschie ukazaniya po releynoy zaschite. Vypusk 7. Distancionnaya zaschita liniy 35-330 kV* [Guidelines for relay protection. Issue 7. Distance protection of 35-330 kV lines]. – M. – L.: Energiya, 1966. – 172 p., with draw.

6. *Metodicheskie ukazaniya po raschyotu i vyboru parametrov nastroyki distancionnykh zaschit liniy elektroperedachi 110 kV i vyshe* [Guidelines for calculating and selecting parameters for setting up distance protection for power transmission lines of 110 kV and higher]. JSC SO UES, Moscow, 2021. Access mode: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/method\_distanc\_protect\_power\_lines\_281123.pdf

7. Ulyanov S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye processy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transients in electrical systems]. – M.: Energiya, 1970. – 520 p.

8. Shabad M.A. Raschyoty releynoy zaschity i avtomatiki raspredelitel’nykh setey [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. – 3rd ed., revised and additional – L.: Energoatomizdat, Leningrad Publishing House, 1985. – 296 p.

9. Shabad M.A. Raschyoty releynoy zaschity i avtomatiki raspredelitel’nykh setey [Calculations of relay protection and automation of distribution networks]. – 4th ed., revised and additional - St. Petersburg. PEIPK publ., 2003, 350 p.

10. *Rukovodyaschie ukazaniya po raschyotu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya: RD 153-34.0-20.527-98* [Guidelines for calculating short-circuit currents and selecting electrical equipment / Edited by B.N. Neklepaev]. – M.: NC ENAS Publishing House, 2006. – 144 p.

11. Zhukov V.V. *Korotkie zamykaniya v uzlakh kompleksnoy nagruzki elektricheskikh sistem* [Short circuits in complex load nodes of electrical systems] / Edited by prof. A.F. Dyakov. - M.: MPEI P.H., 1994. - 224 p.

12. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. – M.: DMK Press; St. Petersburg: Piter, 2008. – 288 p.: ill.

13. Bulychev A.V., Gribkov M.A. *Analis processov samozapuska elektrodvigateley v sovremennykh elektricheskikh raspredelitelnykh setyakh s poziciy releynoy zaschity* [Analysis of self-starting processes of electric motors in modern electrical distribution networks from the standpoint of relay protection] // Relay protection and automation, 2023. - No. 1 (50). - P. 30-38.